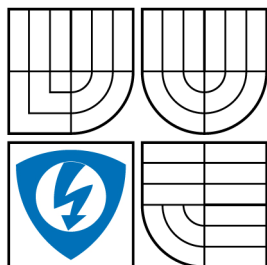


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

BEZDRÁTOVÝ PŘENOS LETOVÝCH ÚDAJŮ Z LETOUNU NA KRÁTKOU VZDÁLENOST

WIRELESS TRANSMISSION OF FLIGHT DATA FOR LOW DISTANCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

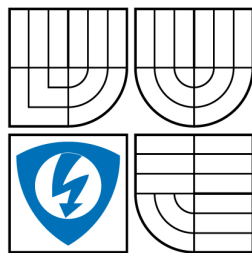
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Petr Kučera

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jan Prokopec, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Petr Kučera

ID: 88836

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátový přenos letových údajů z letounu na krátkou vzdálenost

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete komunikační systém pro přenos dat mezi letadlem a pozemní stanicí. Systém přenáší data ze senzorů v různých částech letadla. Navrhnete řetězec zpracování signálu.

Realizujte navržený systém přenosu letových údajů včetně části pro pozemní zpracování (komunikace s PC).

Pečlivě ověřte funkčnost systému, vypracujte jeho podrobnou dokumentaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ZigBee. Dostupné na WWW: <http://www.zigbee.org/>

[2] IEEE Standards: 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), New York: IEEE, 2003.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 29.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Jan Prokopec, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá bezdrátovým přenosem letových dat z letounu na pozemní stanici. Jedná se o data odesílaná z akrobatického letadla během závodů, konkrétně o GPS pozici a data ze senzorů akcelerace a sklonu letadla. Je zde řešen teoretický rozbor návrhu rádiového spoje a návrh zařízení, které rádiový přenos obstarává. V letadlové části je řešen sběr dat a jejich vyslání pomocí rádiového modulu. Pozemní část zpracovává přijatá data a poté je odesílá k dalšímu zpracování. Jsou zde uvedena dvě řešení rádiového modulu a v poslední části řešení sběru dat z více letounů.

Klíčová slova

Bezdrátový přenos, ISM, rádiový spoj, telemetrie

Abstract

This diploma thesis deals with the flight data wireless transmission from aircraft to the ground station. This is the data sent from the acrobatic aircraft during races, specifically the GPS position and data from sensors of acceleration and rotation of the aircraft. It dealt with the theoretical analysis of the radio link and design of device that receives radio transmission. In aircraft it is dealt with data capturing and their deployment through the radio module. Data are sending to another post-processing on the ground station after receiving. There are two solutions of radio module and in the last part is a solution for capturing data from more airplanes.

Keywords

Wireless transmission, ISM, radio data communication, telemetry

Bibliografická citace

KUČERA, P. *Bezdrátový přenos letových údajů z letounu na krátkou vzdálenost*
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
2009. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Prokopec, Ph.D, externí vedoucí Ing. Vladimír
Machula.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Bezdrátový přenos letových údajů z letounu na krátkou vzdálenost jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji svému externím konzultantovi Ing. Vladimíru Machulovi, který je zadávajícím diplomové práce, za metodickou a odbornou pomoc při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Prokopci, Ph.D. pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	6
2	Projekt WAC.....	7
3	Požadavky na systém přenosu dat.....	8
3.1	Letadlová část systému	8
3.1.1	Řídící modul letadlové části.....	8
3.1.2	Rádiový modul letadlové části.....	8
3.1.3	Anténní systém letadlové části.....	9
3.2	Pozemní část systému	9
3.2.1	Umístění pozemní části.....	9
3.2.2	Řídící modul pozemní části	10
3.2.3	Rádiový modul pozemní části.....	10
3.2.4	Anténní systém pozemní části	10
3.3	Přenosový kanál	11
4	Návrh rádiového spoje.....	12
4.1	Kmitočtová pásma	12
4.1.1	Pásmo SRD	12
4.2	Modulace.....	13
4.2.1	GMSK.....	13
4.3	Útlum rádiového spoje.....	14
4.4	Parametry rádiového spoje.....	15
4.5	Energetická bilance rádiového spoje	18
5	Hardware zařízení	20
5.1	Řídící modul vysílací části.....	20
5.1.1	Napájení	21
5.1.2	Mikroprocesor.....	21
5.1.3	I/O obvody	22
5.2	Řídící modul přijímací části.....	23
5.2.1	Mikroprocesor	23
5.2.2	I/O obvody	24
5.2.3	Napájení	24
5.3	Rádiový modul.....	25
5.3.1	Výběr radiomodemu	25
5.3.2	Realizace rádiového modulu.....	27

5.4	Výběr antén	27
5.4.1	Anténa pozemní stanice	28
5.4.2	Anténa letové části	28
5.5	Návrh planárního dipólu	29
5.6	Přenos paralelním kanálem	32
6	Software zařízení.....	34
6.1	Formát vstupních dat.....	34
6.2	Firmware vysílače	35
6.2.1	Inicializace	35
6.2.2	Příkazy radiomodemu	35
6.2.3	Hlavní program	36
6.3	Firmware přijímače	37
6.3.1	Hlavní mikroprocesor	38
6.3.2	Druhý mikroprocesor	39
7	Přenos z více letadel	40
8	Závěr	42
9	Seznam použité literatury:	43
10	Seznam použitých zkratk:	45
11	Seznam příloh:	46

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Logo WAC 2008	7
Obr. 2.2: Pohled na pilota při soutěži	7
Obr. 3.1: Varianty umístění pozemní části systému	9
Obr. 4.1: Sériový modulátor GMSK [16]	13
Obr. 4.2: Vymezení letového prostoru.....	15
Obr. 4.3: Model šíření radiových vln.....	15
Obr. 4.4: Graf závislosti intenzity pole v místě příjmu na vzdálenosti vysílače	17
Obr. 4.5: Diagram výkonové bilance rádiového spoje	18
Obr. 5.1: Struktura systému	20
Obr. 5.2: Fotografie hlavní desky	20
Obr. 5.3: Blokové schéma vysílací části na hlavní desce	21
Obr. 5.4: Blokové schéma řídicího modulu přijímače	23
Obr. 5.5: Ethernetový převodník XPort	24
Obr. 5.6: Blokové schéma rádiového modulu	25
Obr. 5.7: Příklad a) radiomodulu , b) radiomodemu.....	25
Obr. 5.8: B868 – TinyPro v provedení DIP [10]	26
Obr. 5.9: Schéma zapojení rádiového modulu.....	27
Obr. 5.10: Základní geometrie planárního dipólu.....	29
Obr. 5.11: Kmitočtová závislost činitele odrazu na vstupu dipólu	30
Obr. 5.12: Průběh poměru stojatých vln	31
Obr. 5.13: Průběh vstupní impedance: a) modul b) fáze	31
Obr. 5.14: Směrová charakteristika planárního dipólu	32
Obr. 5.15: Schéma přenosu dat pomocí systému pro přenos videa	32
Obr. 5.16: Schéma zapojení komunikačního modulu.....	33
Obr. 5.17: Fotografie modulu z vrchní strany.....	33
Obr. 6.1: Struktura datových rámců.....	34
Obr. 6.2: Rámec odesílaných dat	34
Obr. 6.3: Vývojový diagram hlavního programu vysílače	37
Obr. 6.4: Vývojový diagram hlavního programu přijímače	38
Obr. 6.5: Vývojový diagram programu druhého mikroprocesoru přijímače	39
Obr. 7.1: Ukázka komunikace mezi letadly a pozemní stanicí.....	40
Obr. 7.2: Blokové schéma systému pro zpracování dat z více letounů	41
Obr. 7.3: Blokové schéma jednotky řídicí datový tok rádiových modulů.....	41

Seznam tabulek

Tab. 4.1: Přehled ISM pásem v České republice	12
Tab. 5.1: Parametry radiomodemu B868 – TinyPro [10]	26
Tab. 5.2: Parametry přijímacího dipólu EXE821BNX [12]	28
Tab. 5.3: Parametry vysílacího dipólu EXC821BN [12].....	28
Tab. 6.1: Soubory firmwaru vysílače.....	35
Tab. 6.3: Rámec AT-příkazu [10].....	35
Tab. 6.3: Přehled AT-příkazů a registrů radiomodemu [10]	36

1 Úvod

Letecká akrobacie je druh sportovní disciplíny, při níž pilot s akrobatickým letadlem provádí co nejpřesněji předem stanovené akrobatické prvky za účelem dosažení nejlepšího bodového hodnocení. Aby se divák, sledující toto vystoupení, mohl lépe vcítit do pocitů pilota, začal se vyvíjet systém podobný prezentaci závodů Formule 1. Spočívá ve snímání a přenosu video signálů z kokpitu letounu, měření a přenosu letových údajů a online vyhodnocování výsledků soutěžního letu. Přímý přenos soutěže pak mohou diváci sledovat na velkoplošných obrazovkách přímo na letišti, na internetu a hlavně v televizním vysílání.

Tato práce se zabývá přenosem letových údajů z akrobatického letounu na pozemní stanici. Konkrétně se jedná o GPS pozici a údaje ze senzorů akcelerace a náklonu letadla. Úkolem je vytvořit systém, který bude z letadla kontinuálně posílat data na zem, kde budou následně zpracována a použita jednak k online vyhodnocování letu, tak i jako doplňující informace při televizním přenosu.

V teoretickém úvodu je představen projekt WAC, pro který je tento systém vytvářen. Je zde popsán přínos systému při soutěži a přiblíženy její parametry. Další část je věnována požadavkům jednotlivých částí systému. Jsou zde podrobně popsány požadované parametry letadlové části, pozemní části i přenosového kanálu.

Čtvrtá kapitola se zabývá návrhem rádiového spoje. V úvodu jsou uvedena nejznámější bezlicenční kmitočtová pásma, především pásmo SDR, a popsána modulační technika GMSK. Další částí je popis parametrů a návrhu rádiového spoje, a uvedení jeho energetická bilance.

Další kapitoly se věnují vlastnímu návrhu jednotlivých zařízení systému, jak po stránce hardwarové, tak i softwarové. Je zde řešen konkrétní návrh desek plošných spojů, výběr komponentů potřebných k přenosu a návrh antény pro užití SDR pásmo. V softwarové části je pomocí vývojových diagramů ukázána funkce mikroprocesorů jednotlivých částí zařízení. V poslední části je ukázána realizace přenosu dat z více letadel.

V příloze jsou obsažena celková schémata zapojení jednotlivých částí zařízení, podklady pro výrobu a osazovací plán plošných spojů.

2 Projekt WAC

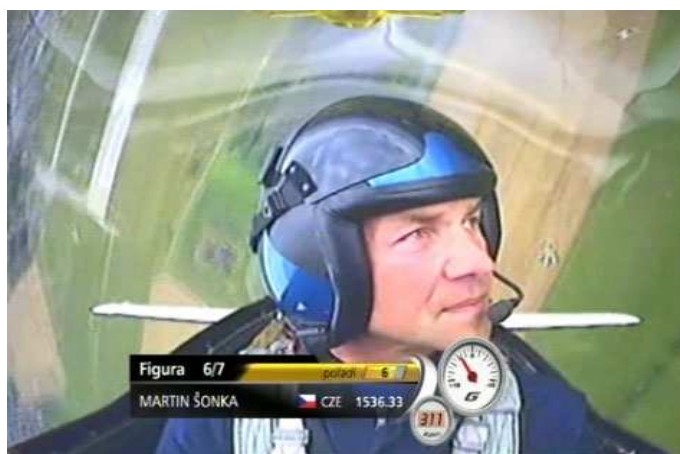
Projekt WAC (World Aerobatic Cup) je soutěž, která nabízí mnoho nového ve světě akrobacie a přitom zůstává leteckou akrobacií v pravém slova smyslu. Její první ročník se uskutečnil v termínu 6.6 – 8.6. 2008 na letišti v Roudnici nad Labem. Účelem tohoto projektu je dostat tento zajímavý a divácky velice atraktivní sport do popředí zájmu široké veřejnosti, jako je tomu například u automobilového sportu. Jde o velice náročný sport, a to jak po stránce fyzické, tak i finanční. Pilotování akrobatického letadla vyžaduje absolutní přesnost, soustředění i odhad, neboť piloti jsou vystavováni přetížení až 10 g a létají maximální rychlostí 450 km/h.



Obr. 2.1: Logo WAC 2008

Přímý přenos soutěžního letu mohou diváci sledovat na velkoplošných obrazovkách přímo na letišti, na internetu a hlavně v televizním vysílání. K vidění jsou akrobatické prvky letu, a díky přenosu videa i obličej pilota v kokpitu. Díky našemu systému bude tento přenos doplněn o informace, jako je okamžitá rychlost letadla, přetížení působící na pilota a rotace letadla. Divák, který sleduje soutěžní let, je pak schopen se orientovat a porozumět průběhu závodu, což stávající stav naprosto neumožňuje. Pro takto informovaného diváka se závody v letecké akrobacii stávají zajímavější a srozumitelnější.

Dalším přínosem tohoto systému je pomoc rozhodčím při zadávání penalt. Ti mohou během soutěžního letu online sledovat jeho trajektorii a podle ní např. lépe vyhodnotit sporné momenty, kdy se letadlo dostane mimo vymezený prostor nebo klesne pod povolenou výšku.



Obr. 2.2: Pohled na pilota při soutěži

3 Požadavky na systém přenosu dat

Jak vyplývá ze zadání, účelem projektu je bezdrátový přenos letových údajů z letadla do pozemní stanice. Tato data by měla být v letadle zpracována, zabezpečena a přenášena na zem, kde dojde k jejich vyhodnocení a následnému posílání jednak k anténnímu rotátoru, tak i k zařízení, kde dochází k dalšímu zpracování.

Celý systém pro přenos letových dat se dá rozdělit na tři dílčí části, a to na vysílací část uvnitř letadla, přijímací pozemní stanici a na přenosovou cestu.

3.1 Letadlová část systému

Úkolem části umístěné uvnitř letounu je zpracování přijatých dat a jejich poslání k pozemní části systému. Jelikož se jedná o akrobatický letoun a data se přenášejí především při akrobatických soutěžích, musí být toto zařízení navrženo tak, aby žádným způsobem neohrožovalo pilota a nebránilo mu v podávání vrcholových výkonů. Proto nesmí kabina obsahovat nadbytečné předměty nebo kabely, nesmí být omezen výhled pilota z kabiny nebo dokonce nějakým způsobem zhoršeny aerodynamické vlastnosti letounu.

3.1.1 Řídící modul letadlové části

Úkolem řídicího modulu je příjem dat ze senzorů letadla, jejich zpracování a poslání k rádiovému modulu. Příjem se odehrává po SPI sběrnici od mikroprocesoru vyhodnocujícího naměřená data ze senzorů. Tato data mají pevně stanovenou velikost rámce a datový tok 520 B/s. Zařízení musí být schopno zabezpečit tyto požadavky:

- malé rozměry
- příjem dat z SPI sběrnice
- napájecí napětí 24 V DC
- nízká spotřeba
- možnost přehrání firmwaru modulu
- předání dat rádiovému modulu vhodným způsobem

3.1.2 Rádiový modul letadlové části

Rádiový modul přijímá od řídicího modulu data, která připraví na vlastní rádiový přenos. Způsob předání dat spočívá v potřebách použitého zařízení. Nejčastěji se jedná o sériový přenos přes sběrnici RS-232 nebo přímo v úrovních TTL. Další požadavky závisí až na přesném typu použitého média:

- pracovní kmitočet v oblasti UHF
- dostačující vysílací výkon a možnost jeho regulace
- nízká spotřeba
- možnost multiplexování
- cena

3.1.3 Anténní systém letadlové části

Letoun se při akrobatickém letu nachází v různých pozicích. Aby se dosáhlo téměř 100% přímé viditelnosti mezi letounem a pozemní stanicí, je nejvýhodnějším řešením použití dvou antén, a to na horním a spodním trupu letounu. Další možností je umístění antén na konce křídel letounu, ale při jeho řešení narážíme na množství konstrukčních problémů. Je zapotřebí použití dlouhého vysokofrekvenčního vedení od vysílače k anténě a samotná anténa, umístěná na konci křídel, ovlivňuje aerodynamické parametry letounu. Pokud bychom použili pouze jednu anténu, jediné možné umístění, z hlediska jejího nezastínění, by bylo na zadní část trupu letadla. To je ale po konstrukční stránce většiny letounů prakticky nerealizovatelné.

Požadavky kladené na anténní systém jsou:

- všesměrová anténa
- maximální kruhová vertikální i horizontální vyzařovací charakteristika
- dostatečný zisk antény (alespoň 3dB)
- ztráty napájecího vedení do 2dB

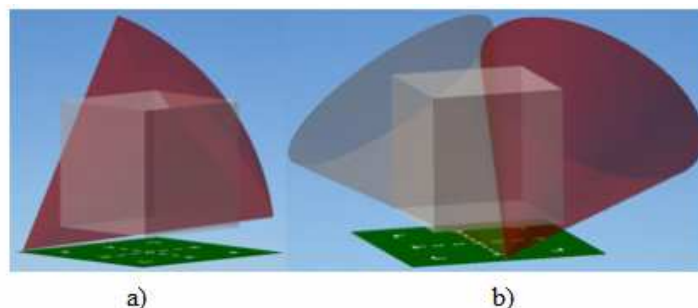
Pokud si shrneme předchozí úvahy, optimální variantou je umístění dvou antén na horním a spodním trupu letounu. Jedinými rušivými vlivy jsou pak výstupky na trupu letounu, kabinový prostor a podvozek. Při použití dvou antén je třeba vyřešit problém jejich napájení. Nejjednodušším řešením je rozdělení VF signálu pomocí výkonového děliče, který symetricky rozdělí vstupní výkon ze vstupní brány do obou bran výstupních.

3.2 Pozemní část systému

Pozemní přijímací část slouží k přijímání dat, jejich zpracování a předání dalším zařízením.

3.2.1 Umístění pozemní části

Jedním z hlavních úkolů tohoto systému je dodávání dat o pozici letounu, díky nimž dochází k navádění anténního rotátoru a příjmu videí z letounu. To znamená, že pozemní přijímací část by měla být umístěna přímo na rotátoru.



Obr. 3.1: Varianty umístění pozemní části systému

Na Obr. 3.1 jsou znázorněny možnosti jeho umístění vzhledem k použitým sektorovým anténám, které slouží k příjmu videosignálů prostřednictvím Wifi spoje, a vzhledem k oblasti letu. Kužel s vrcholem v místě stanoviště pozemní stanice představuje vyzařovací charakteristiku sektorové antény. První možností je umístění rotátoru na roh oblasti jak ukazuje varianta a). Tato možnost je, hlediska přenosu videosignálů, nejhorší možnou variantou a to jak z hlediska vzdálenosti letadla od stanice, tak i s podmínkou pilota dodržet vymezený prostor. Druhou možnost zobrazuje varianta b), kde je rotátor umístěn doprostřed hrany oblasti letu. Tato možnost je vyhovující i pro všesměrovou anténu přijímače, avšak jejím nejvýhodnějším umístěním by byl střed oblasti letu.

3.2.2 Řídící modul pozemní části

Řídící modul slouží k příjmu dat z rádiového modulu, jejich zpracování a předání dalším zařízením. Veškerá přijatá data se posílají přes ethernetové rozhraní, ale anténnímu rotátoru se přes sériové rozhraní RS-232 předávají pouze data udávající polohu letounu. Zařízení musí být schopno zabezpečit tyto požadavky:

- napájecí napětí do 12 V DC
- výstupní data přes Ethernetové a sériové rozhraní
- připraven pro sběr dat od více rádiových modulů

3.2.3 Rádiový modul pozemní části

Rádiový modul přijímací pozemní stanice musí samozřejmě pracovat ve stejném rádiovém pásmu jako vysílač umístěný v letounu. Jeho úkolem je příjem rádiového signálu, jeho zpracování a poslání řídicímu modulu. Způsob přenosu opět závisí na typu přenosového média a bude se jednat buď o sběrnici RS-232, nebo půjde o signál přímo v úrovních TTL. Požadavky přijímacího modulu:

- pracovní kmitočet v oblasti UHF
- dostačující vysílací výkon a možnost jeho regulace
- nízká spotřeba
- možnost multiplexování
- cena

3.2.4 Anténní systém pozemní části

Anténa přijímací části bude umístěna na anténním rotátoru asi 1,5 m nad zemským povrchem. Nebude nikterak stíněna a stále bude v přímé viditelnosti s letounem. Požadavky kladené na anténní systém jsou:

- všesměrová anténa
- maximální kruhová vertikální i horizontální vyzařovací charakteristika
- zisk antény 3dB
- ztráty napájecího vedení do 2dB

3.3 Přenosový kanál

Možností bezdrátového přenosu je mnoho. Od systému bluetooth, zigbee, přes rádiový přenos a wifi, až po družicové radiokomunikační systémy. Nejdůležitější požadavky kladené na přenosový kanál:

- cena
- přenos na jednotky km
- nízký útlum rádiového signálu
- přenosová rychlost 4,2kb/s

Zigbee je systém použitelný na vzdálenost několika sto metrů a přenos přes Wifi je na požadovanou vzdálenost několika kilometrů podmíněn směrovostí spoje, což v tomto případě není možné. V oblasti použitelné pro tento systém přichází v úvahu pouze realizace spoje v rádiovém pásmu UHF, nejlépe v jednom z rádiových kanálů v bezlicenčním pásmu.

4 Návrh rádiového spoje

Datový přenos v bezdrátových sítích se neodehrává pomocí cest v podobě metalických nebo optických vedeních, ale elektromagnetické vlnění se šíří volným prostorem. Komunikačním systémem se nemůže v určeném časovém intervalu přenášet libovolné množství dat, ale pouze tolik, kolik dovoluje jeho přenosová kapacita.

4.1 Kmitočtová pásma

Využití rádiového spektra se v České republice řídí předpisy, které Český telekomunikační úřad vydal v souladu s Mezinárodní telekomunikační unií. Ty, mimo jiné, definují užívání kmitočtového spektra a uvádí jeho rozdělení na jednotlivá pásma s přidělením jednotlivým radiokomunikačním službám.

Jedním z důležitých požadavků celého systému je jeho cena. Z toho důvodu by bylo výhodné provádět přenos dat z letounu na zem v bezplatném pásmu. Bezlicenční rádiová pásma ISM (Industrial, Scientific, Medical) lze využívat pro průmyslové, vědecké a lékařské účely. Podle podmínek uvedených v [2] je v současné době prakticky celosvětově podporováno několik bezlicenčních ISM pásem. Přehled nejznámější ISM pásem v České republice ukazuje tabulka 4.1.

Kmitočtové pásmo	Charakteristika
150,00 – 160,00 MHz	pásmo určené pro mnoho aplikací, např. ovládání zařízení, zabezpečení v železniční dopravě, apod.
433,05 – 434,79 MHz	pásmo využitě jak pro aplikace dálkového ovládání dveří automobilů, garáží apod., tak i pro rádiovou komunikaci
863,00 – 870,00 MHz	SRD pásmo, využití pro poplachové aplikace, signalizaci, dálkové ovládání strojů, jeřábů, vozíků a podobných zařízení; rádiovou komunikaci
2,4000 – 2,4835 GHz	pásmo využívají např. WiFi systémy

Tab. 4.1: Přehled ISM pásem v České republice

4.1.1 Pásmo SRD

Podle standardních licenčních podmínek ITU je pásmo SRD prakticky celosvětově (země CEPT) přiděleno pro bezplatný bezdrátový přenos telemetrie (General Telemetry and Telecommand) a výstražnou signalizaci (Alarms). V České republice bylo toto pásmo uvolněno v roce 2000 a je možné ho využít např. pro dálkové ovládání, automatizaci, alarmy nebo výstražnou signalizaci. V celém SRD pásmu je pro tyto aplikace uvolněno 80 kanálů s kmitočtovým rozestupem 25 kHz. Maximální povolený vyzářený výkon v tomto pásmu závisí na zvoleném subpásmu a pohybuje se od 5 do 500 mW EIRP.

4.1.2 Výběr kmitočtového pásma

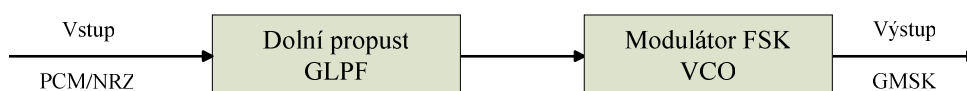
Díky vlastnostem SDR pásma a dostupnosti radiomodulů, které toto pásmo využívají, probíhá přenos mezi letounem a pozemní přijímací stanicí v jednom z jeho subpásem, a to v subpásmu s frekvenčním rozsahem od 869,40 do 869,65 MHz a nejvyšším povoleným výkonem (tedy 500 mW EIRP). Je zde k dispozici 10 kanálů s šířkou pásma 25 kHz a podmínka dodržení poměru doby klíčování k celkové době provozu maximálně 10% .

4.2 Modulace

Pro efektivnější využití přenosových kanálů a potlačení rušení používáme pro přenos informace různých modulačních technik. U digitální modulace je vysokofrekvenční nosná vlna modulována signálem některé diskrétní modulace v základním pásmu. K modulaci se většinou používá binární signál, kterým je možné modulovat amplitudu, kmitočet nebo fázi nosné vlny. U dvojstavových modulací se modulovaný parametr této vlny mění pouze mezi dvěma diskrétními stavy, z nichž jeden odpovídá modulačnímu bitu 0 a druhý bitu 1. Proto se tyto modulace označují pojmem klíčování nebo zkratkou SK (Shift keying). Mezi nejzákladnější modulační techniky používané při modulaci digitálních signálů patří modulace ASK (Amplitude-Shift Keying), FSK (Frequency-Shift Keying) a PSK (Phase-Shift Keying) [4], [16].

4.2.1 GMSK

Rádiový modul, popisovaný v kapitole o návrhu rádiové části, podporuje pouze tuto modulaci. Modulace GMSK (Gaussian-filtered MSK) je variantou modulace MSK (Minimum Shift Keying), tedy dvojstavového kmitočtového klíčování s minimálním zdvihem. Jedná se o modulaci se spojitou fází, to znamená, že při změně kmitočtu v okamžicích změn modulačních symbolů je vždy zachována spojitost fáze modulovaného kmitočtu.



Obr. 4.1: Sériový modulátor GMSK [16]

U modulace GMSK procházejí pravoúhlé modulační impulsy před modulátorem MSK Gaussovskou dolní propustí GLPF (Gaussian Low Pass Filter), která kmitočtově omezí spektrum vstupního digitálního signálu, což se projeví nejen v zaoblení jeho hran, ale především v tom, že výsledný modulovaný signál GMSK má výrazně potlačeny postranní laloky kmitočtového spektra a nemusí být tedy již dále filtrován [6], [16].

4.3 Útlum rádiového spoje

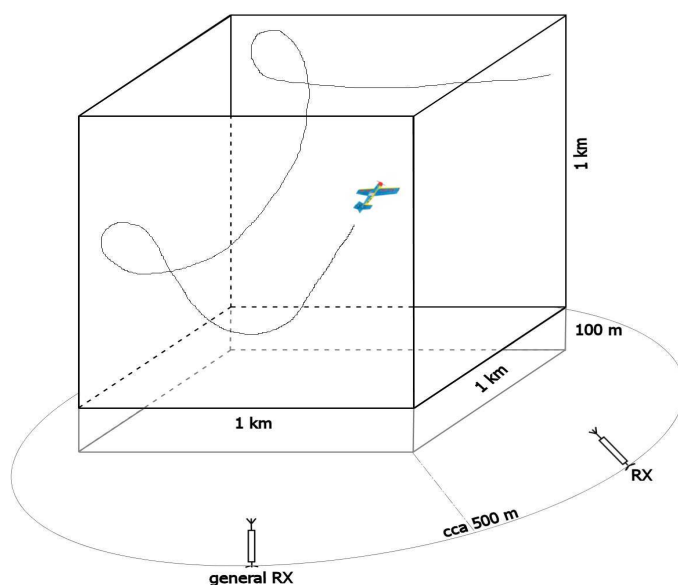
Ve volném prostoru jsou přítomny rušivé jevy, které mohou způsobit vysílači komplikaci příjmu relativně malých užitečných signálů, nebo zvyšují chybovost a tím způsobují pokles přenosové rychlosti. Mezi nejčastější způsoby rušení a útlumu rádiových vln patří:

- Odraz (reflexe) – vzniká při dopadu elektromagnetické vlny na vodivou i nevodivou plochu s rozměry podstatně větším než její vlnová délka.
- Lom (refrakce) – elektromagnetická vlna se láme o vyšší vrstvy atmosféry.
- Ohyb (difrakce) – vzniká o překážky s ostrými konturami v trase šíření.
- Rozptyl - objevuje se při průchodu elektromagnetické vlny přes drobné překážky s rozměry mnohem menšími než její vlnová délka.
- Mnohocestné šíření – k přijímači přichází kromě vlny přímé i řada vln odražených, u kterých dochází ke zpoždění a ke změnám fáze a výkonové úrovně.
- Ztráty šířením - představují útlum, který závisí na délce spoje a typu prostředí. Do této skupiny patří i ztráty způsobené šířením volným prostorem.
- Vliv atmosférických jevů – do této skupiny řadíme déšť, mlhu, sníh a jiné, při kterých dochází k útlumu elektromagnetické vlny.
- Pomalé úniky – útlum způsobený zastíněním spoje při pohybu antény. Ke kolísání přijímací úrovně dochází vzhledem k vlnové délce pomalu.
- Rychlé úniky – jsou způsobeny rychlým kolísáním úrovně signálu. Jsou způsobeny vícecestným šířením signálu a dopplerovým posuvem, který vzniká v důsledku pohybu mobilní antény vůči okolním objektům. [16]

V případě rádiového přenosu dat, jehož rozbor je uveden v následující kapitole, budou některé jevy způsobovat útlum spoje, ale některé můžeme zanedbat. Mezi rušivé vlivy, které můžeme zanedbat, patří lom vlny od atmosféry, rozptyl a ohyb vlny a ztráty vlivem atmosférických jevů. Ostatní druhy rušení, které se podílejí na útlumu spoje, jsou popsány v následujících kapitolách.

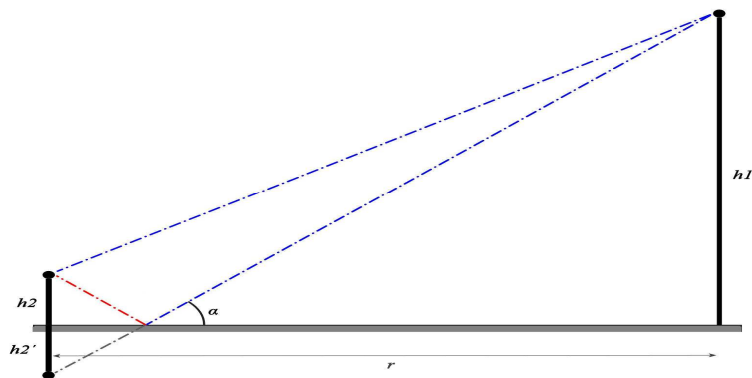
4.4 Parametry rádiového spoje

Rádiový přenos dat je určen pro akrobatické letadlo, které se během soutěžního letu pohybuje v prostoru, tzv. boxu, který je vymezen mezinárodními pravidly pro uskutečňování akrobatických soutěží. Tento prostor má tvar krychle o velikosti strany 1000 m a začíná 100 m nad zemským povrchem. To, že pravidla přesně definují velikost boxu neznámá, že se z něj letadlo nemůže dostat, avšak maximální vzdálenost letounu od přijímací stanice by neměla nepřesáhnout 3 km. Vymezení akrobatického boxu je zobrazeno na Obr. 4.2. Box je vytyčen nad plochou letiště a blízkého okolí, tzn. z hlediska návrhu rádiového spoje se jedná o hladký zemský povrch bez terénních překážek s parametry půdy $\epsilon_r = 5$ a $\gamma = 5 \cdot 10^{-4}$ S/m. Akrobatické lety se uskutečňují pouze za dobrého počasí, tzn. při návrhu rádiového spoje se není nutné zabírat vlivem srážek, mlhy nebo jiných vlivů špatného počasí.



Obr. 4.2: Vymezení letového prostoru

Pro pásmo decimetrových vln se uplatňuje především mechanismus šíření prostorovou vlnou (tj. interference prostorové vlny přímé a vlny odražené od zemského povrchu) a v menší míře i vlnou povrchovou. Obr. 4.3 popisuje model šíření přímé, odražené a povrchové vlny.



Obr. 4.3: Model šíření radiových vln

Odraz se uskutečňuje od plochy letiště, jedná se tedy o rovinný povrch bez překážek, a můžeme říci, že podmínka 1. Fresnelovy zóny, která určuje velikost rovinné části terénu v okolí místa odrazu, bude vždy splněna.

Interference prostorové vlny je podle [14] určena podmínkou větší výšky přijímací antény (výška h_2 vysílací antény bude vždy větší než výška h_1 antény přijímací) než je mezní výška h_0 , kterou vypočítáme dle vztahu (4.1)[14], a přímou rádiovou vzdáleností r_p , která vyjadřuje přímou viditelnost mezi anténami a určíme ji pomocí vztahu (4.2)[14].

$$h_0 = \frac{\lambda}{2\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\epsilon_r^2 + (60\lambda\gamma)^2}}{\sqrt{(\epsilon_r - 1)^2 + (60\lambda\gamma)^2}}, \quad (4.1)$$

kde: h_0 - mezní výška
 λ - vlnová délka
 ϵ_r - relativní permeabilita půdy
 γ - vodivost zemského povrchu.

$$r_p = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (4.2)$$

kde: r_p - přímá rádiová vzdálenost
 h_1, h_2 - výšky antén.

Pro kmitočet 869,4 Mhz je mezní výška rovna 0,54 m a přímá rádiová vzdálenost se pohybuje v rozmezí 90 až 160 km, což závisí na momentální výšce letadla.

Při šíření povrchové vlny vzniká útlum, který závisí na vodivosti půdy a na kmitočtu a polarizaci šířící se vlny. Útlum je tím větší, čím větší je kmitočet vlny a čím sušší je půda, nad kterou se vlna šíří.

Ve frekvenčním SDR subpásmu 869,40 do 869,65 MHz je povolený maximální vysílací výkon $EIRP = 500\text{mW}$. Při výpočtu intenzity pole v místě příjmu jsem podle [14] vycházel ze vztahů pro šíření prostorovou vlnou s uplatněním vlny povrchové. Útlum vlny určíme dle vztahu (4.3)[14].

$$W = \frac{4\pi}{r\lambda} h_0^2, \quad (4.3)$$

kde: W - útlum vlny
 r - vzdálenost mezi anténami
 λ - vlnová délka
 h_0 - mezní výška.

Výslednou intenzitu v místě příjmu určíme dle vztahu (4.4)[14].

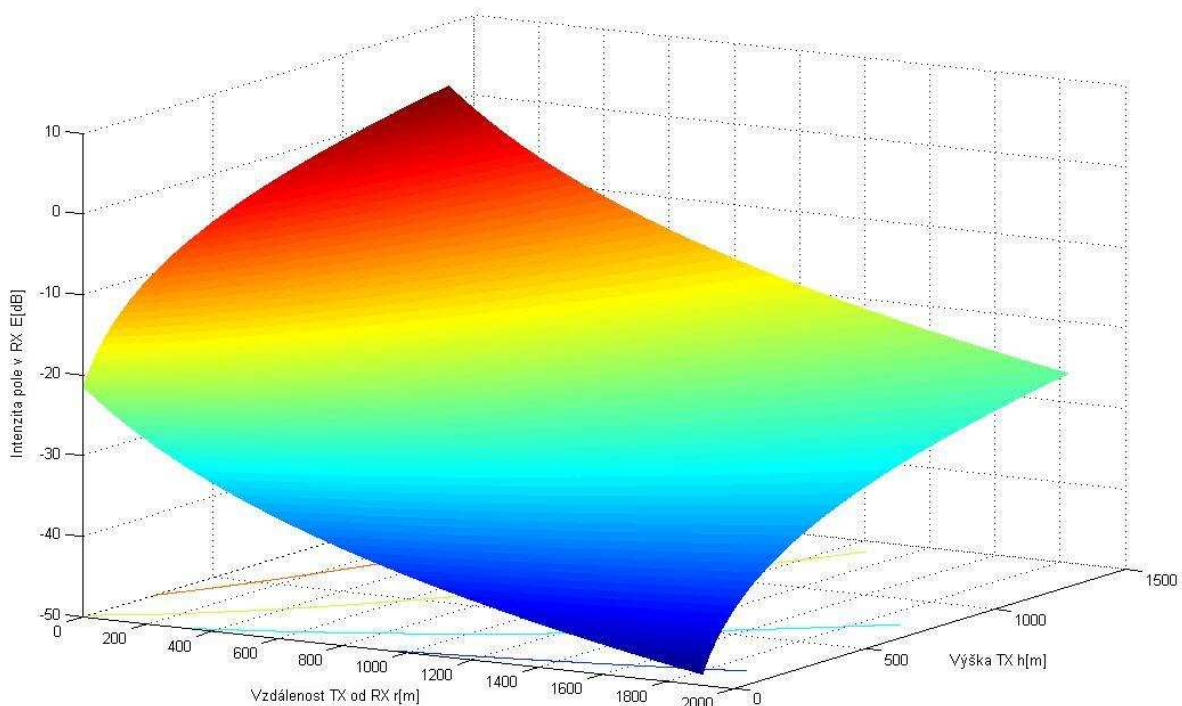
$$E = \frac{\sqrt{30 EIRP}}{r} 4\lambda \frac{h_{1ekv} h_{2ekv}}{\lambda r}, \quad (4.4)$$

kde: E - intenzita pole
 $EIRP$ - vyzářený výkon
 r - vzdálenost mezi anténami
 λ - vlnová délka
 h_{1ekv} a h_{2ekv} - určíme ze vzorce (4.5)[14].

$$h_{1,2ekv} = \sqrt{h_{1,2}^2 + h_0^2}, \quad (4.5)$$

kde: $h_{1,2ekv}$ - ekvivalentní výška antén
 $h_{1,2}$ - skutečná výška antén h
 h_0 - mezní výška.

Na Obr. 4.4 je pomocí programu Matlab spočítána intenzita pole závislosti na vzdálenosti a výšce letadla od pozemního přijímače, jejíž výpočet vychází ze vztahů uvedených výše. Nejmenší intenzita pole -49dB nastává při minimální výšce a maximální vzdálenosti letadla od přijímače, kde se značně projevuje útlum povrchové vlny.



Obr. 4.4: Graf závislosti intenzity pole v místě příjmu na vzdálenosti vysílače

4.5 Energetická bilance rádiového spoje

Důležitým parametrem určujícím kvalitu a dosah rádiového spoje je odstup užitečného signálu od šumu na vstupu přijímače a minimální přijímaná úroveň výkonu signálu, která se dá označit jako šumový práh přijímače. Pro spolehlivou realizaci spoje musí být úroveň přijímaného signálu vyšší než-li šumový práh, který lze určit ze vztahu 4.5 [18]:

$$P_{P_{min}} \leq P_P = P_V + G_V + G_P + L_{FSL} + L_{OST} \quad [dBm], \quad (4.6)$$

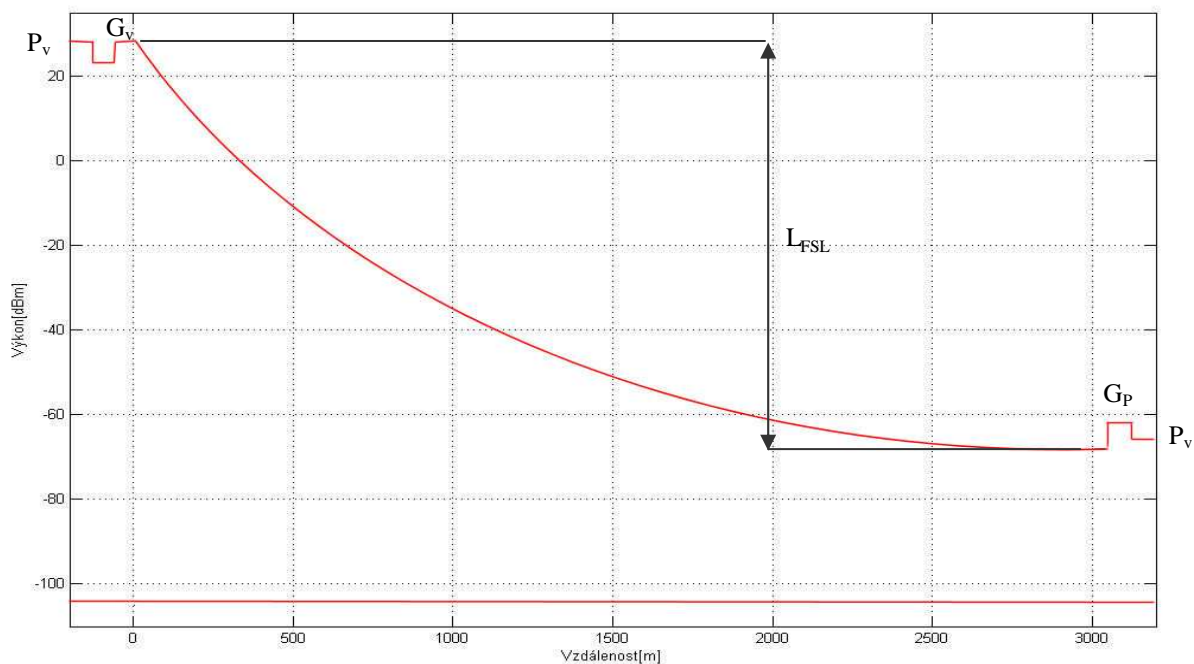
kde :

- $P_{P_{min}}$ – šumový práh přijímače
- P_P – výkon signálu do přijímače
- P_V – výstupní výkon vysílače
- G_V – zisk vysílací antény
- G_P – zisk přijímací antény
- L_{FSL} – celkové ztráty způsobené průchodem volným prostorem bez překážek
- L_{OST} – ostatní ztráty v systému.

Celkové ztráty způsobené průchodem elektromagnetické vlny volným prostorem bez překážek lze vypočítat dle vztahu 4.7 [18]:

$$L_{FSL} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right), \quad (4.7)$$

kde: d – vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
 λ – vlnová délka.



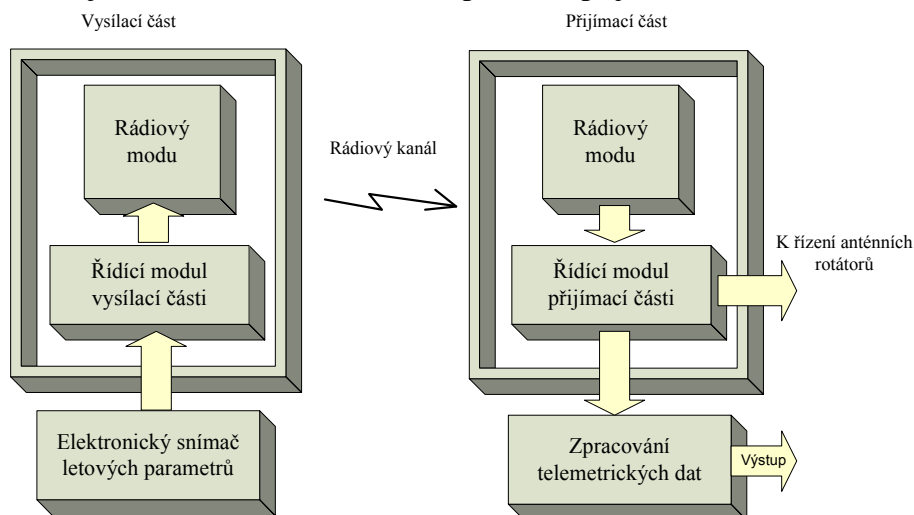
Obr. 4.5: Diagram výkonové bilance rádiového spoje

Mějme situaci, v níž bude komunikace probíhat ve frekvenčním pásmu SDR a budou použity radiomodemy a anténní systém, které jsou uvedeny v kapitole 5. Diagram výkonové úrovně po celé délce rádiového spoje je zobrazen na Obr. 4.5.

Citlivost přijímače pozemního modulu je -105 dBm, to znamená, že úroveň přijímaného signálu nesmí klesnout pod tuto hodnotu. Z výše uvedených vztahů byla vypočtena hodnota šumového prahu, která činí -70,8 dBm. Z toho je vidět dostatečná rezerva pro další rušivé jevy, které by mohli na rádiový spoj působit. Při výpočtu byla uvažována maximální vzdálenost spoje, tedy 3 km. Zisk přijímací antény je 3 dBi a antény umístěné v letounu také 3 dBi. Rádiové moduly jsou na obou stranách stejné. Vysílací výkon má hodnotu 27 dBm a citlivost přijímače již zmíněných -105 dBm. Velikost ostatních ztrát, jako jsou ztráty na anténních napájecích nebo konektorovými přechody, byla vyčíslena na hodnotu 3 dB.

5 Hardware zařízení

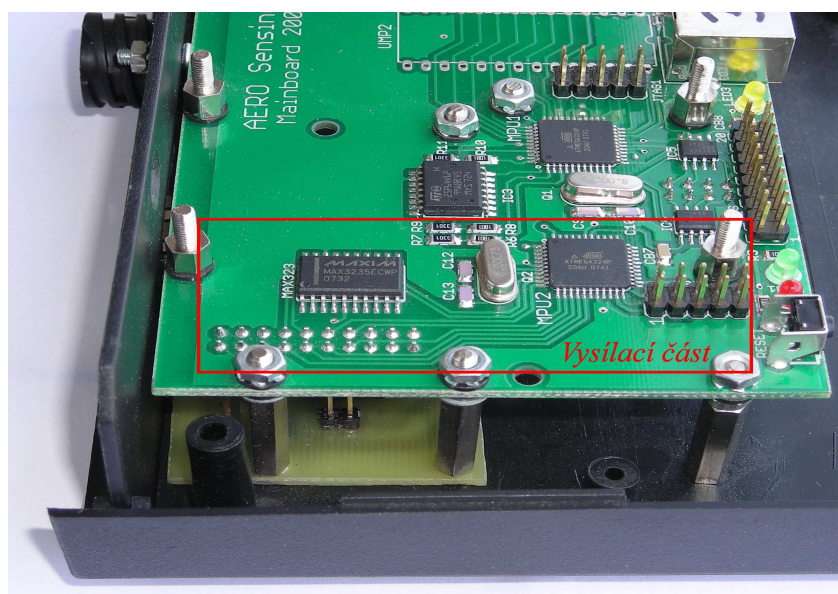
Struktura celého zařízení pro přenos letových dat z jednoho letadla je zobrazena na obrázku Obr. 5.1. Z něj je patrné, že hardware systému lze rozdělit na dvě části, na část vysílací, která je umístěná uvnitř letounu, a pozemní přijímací část.



Obr. 5.1: Struktura systému

5.1 Řídicí modul vysílací části

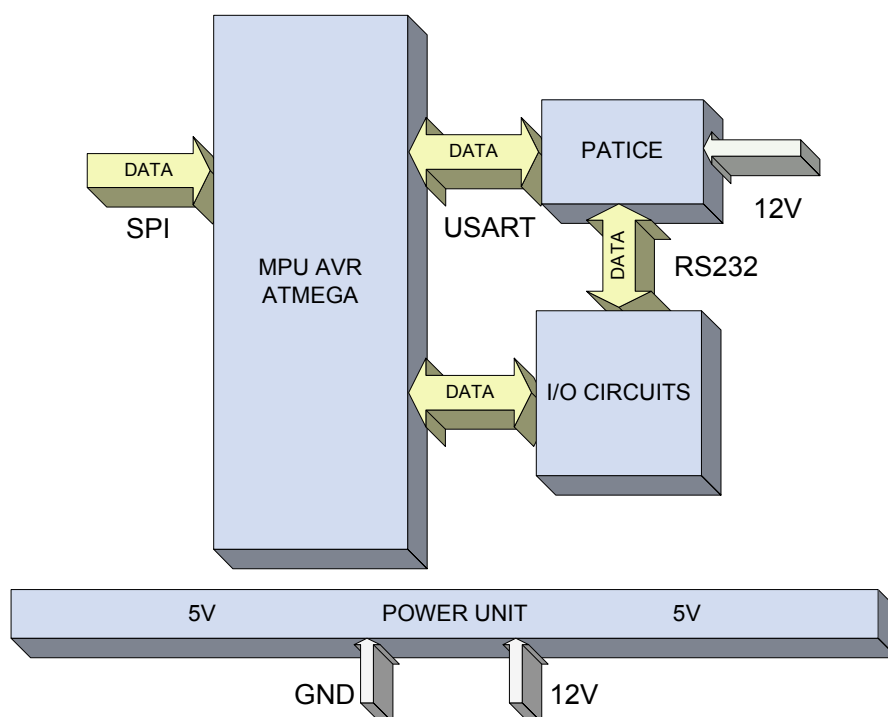
Jak jsem již předeslal, účelem vysílací části je příjem dat z letových senzorů, jejich zpracování a odeslání na zem. Jedná se o data z GPS přijímače, gyrosenzorů, akcelerometru a do budoucna i dalších parametrů z připojených přístrojů (např. fyziologické informace, informace o motoru, stavu baterie). Tato data jsou k vysílacímu zařízení přenášena po SPI sběrnici.



Obr. 5.2: Fotografie hlavní desky

Celé vysílací zařízení se skládá ze dvou samostatných desek, a to z hlavní desky a desky zabezpečující vlastní rádiový přenos. Spojení obou desek je realizováno přes patice, jejíž popis je uveden v kapitole 5.1.3. Obě desky jsou umístěny v plastové krabici a spojeny s ní distančními kovovými sloupky, aby byla docílena odpovídající tuhost konstrukce.

Blokové schéma vysílací části hlavní desky je zobrazeno na obrázku Obr.5.3. Tato část je na společné desce se zařízením na zpracování dat ze senzorů, viz Obr.5.2. Byla vyrobena v předchozí fázi projektu a navrhoval jsem ji univerzálně pro použití různých možností přenosu. Je brána jako prototyp, ale je plně funkční. Schéma a desky plošných spojů jsou uvedeny v příloze č. 1 a 2.



Obr. 5.3: Blokové schéma vysílací části na hlavní desce

5.1.1 Napájení

Celá deska je napájena stejnosměrným stabilizovaným napětím 12V. Součástky umístěné na desce potřebují napájení 5V. Toho je docíleno použitím lineárního stabilizátoru 7805, který je zapojen podle doporučeného katalogového zapojení se dvěma blokovacími kondenzátory o velikosti 100nF. Pro napájení druhé desky je do patice svedeno mimo napětí 5V i napětí 12V.

5.1.2 Mikroprocesor

Srdcem vysílací části hlavní desky je mikroprocesor Atmel typu ATmega324P v SMD provedení, který obstarává řízení celého zařízení. Procesory tohoto typu disponují poměrně velkou pamětí Flash, integrovanou pamětí RAM a EEPROM. Dále obsahují

časovače, watchdog, sběrnice I2C, SPI, hodiny reálného času, A/D převodník, modulátor PWM a řadu dalších vylepšení. Mimo jiné jsou běžně dostupné a jsou k nim zdarma vývojové prostředky a kompilátor jazyka C. Zde je z [9] uveden přehled nejdůležitějších parametrů:

- napájecí napětí 1,8 – 5,5 V
- architektura RISC
- 32 Kbyte flash
- 1 Kbyte EEPROM
- 2 Kbyte RAM paměti
- 32 I/O pinů a registrů
- RTC
- dva 8-bitové a jeden 16-bitový časovač / čítač
- 6 PWM kanálů
- 2 USART a 1 SPI
- 8-kanálový 10-bitový ADC převodník
- analogový komparátor
- Watchdog časovač s interním oscilátorem
- JTAG programování a debugging
- pouzdro TQFP-44
- malé rozměry
- dostupnost a nízká cena

Největší výhodou tohoto mikroprocesoru je přítomnost dvou rozhraní USART, což bylo jedno z hlavních kritérií při výběru vhodného řídicího prvku. Procesor je taktován vnějším krystalem o frekvenci 8MHz.

5.1.3 I/O obvody

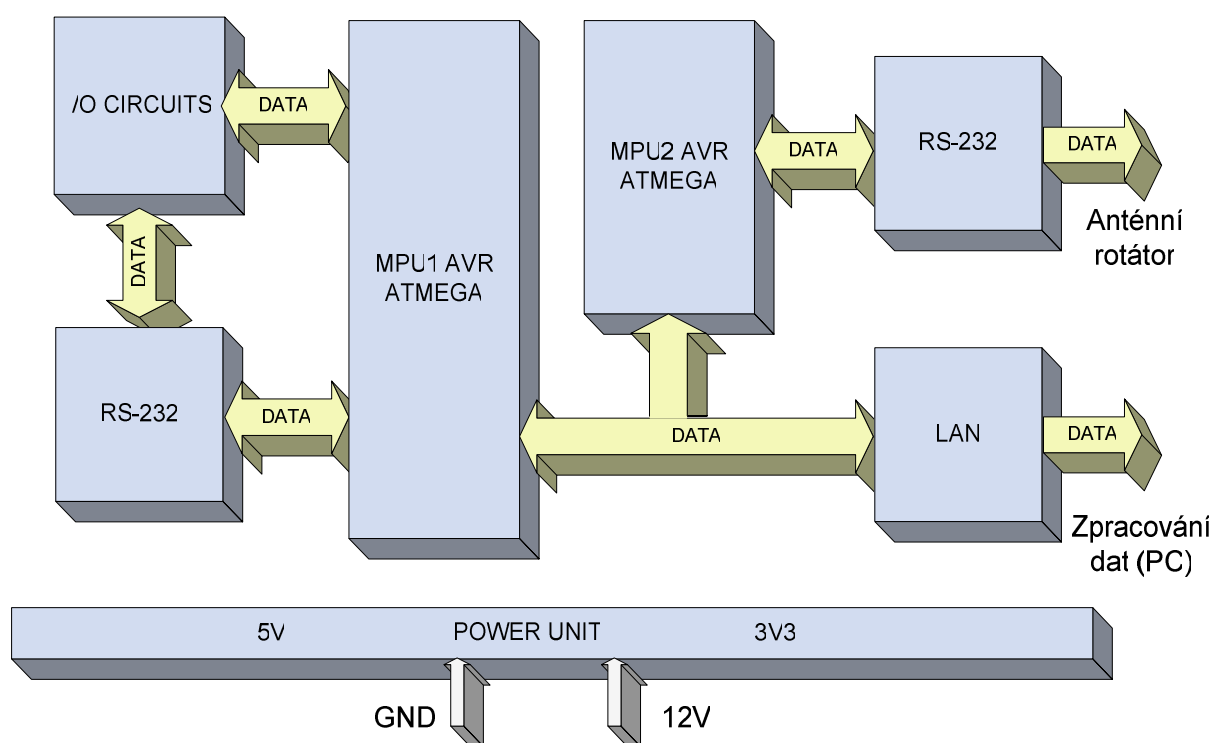
Pro propojení hlavní desky a desky obstarávající rádiový přenos je použita na hlavní desce dutinková lišta a do druhé desky napájena lámací lišta. Do dutinkové lišty jsou svedeny signály, které jsou potřeba pro funkci komunikační desky, a to již zmíněné napájení, centrální reset, signál z UARTu a čtyři pomocné piny mikroprocesoru, pokud by bylo nutné ovládnutí potřebných funkcí rádia nebo jiného přenosového zařízení.

Deska obsahuje obvod MAX2325E, jehož signály jsou také svedeny do dutinkové lišty. Jedná se o převodník TTL úrovně mikroprocesoru do úrovně RS232. Je napájen 5V a k převodu využívá nábojové pumpy pro tvorbu vyššího výstupního napětí. Největší předností tohoto typu převodníku jsou již integrované kapacitory, čímž je návrh DPS jednodušší a přehlednější.

Posledním důležitým I/O obvodem je rozhraní JTAG, které slouží k programování mikroprocesoru.

5.2 Řídící modul přijímací části

Přijímací část slouží k příjmu dat vysílaných z letounu, jejich zpracování a odeslání k dalším zařízením. Celý koncept vychází ze zařízení umístěného v letounu. Přijímač se opět skládá ze dvou desek plošných spojů, a to řídicí desky a desky obstarávající vlastní rádiový příjem. Blokové schéma řídicího modulu je zobrazeno na Obr. 5.4. Celkové schéma a deska plošných spojů jsou uvedeny v přílohách č. 3 a 4.



Obr. 5.4: Blokové schéma řídicího modulu přijímače

5.2.1 Mikroprocesor

Řídící modul obsahuje dva mikroprocesory. Jedná se opět o typ ATmega324P v SMD provedení. První, hlavní, mikroprocesor MPU1 zabezpečuje příjem dat z rádiového modulu, která se přenášejí buď pomocí sériového rozhraní RS-232, nebo přes TTL úrovně. Propojení obou desek je provedeno stejným způsobem jako u části letadlové. K řídicímu modulu jsou přivedeny dva piny pro potřeby multiplexace při příjmu dat z více rádiových modulů. Druhý mikroprocesor MPU2 vykonává pouze selekci dat potřebných pro anténní rotátor od veškerých přijatých dat. Tato selekce mohla být realizována pomocí multiplexeru, ale z důvodu časové náročnosti výkonu programu hlavního mikroprocesoru bylo zvoleno takovéto řešení, i když sebou přináší zvětšení desky a nepatrně zvětšuje spotřebu.

5.2.2 I/O obvody

Komunikace mezi přijímačem a okolím bude probíhat přes dvě rozhraní. Prvním je sériové rozhraní RS-232, které zajišťuje transport dat k anténnímu rotátoru. Pro převod TTL úrovní mikroprocesoru je opět použit obvod MAX2325E.

Druhým požadavkem komunikace přijímače s okolními zařízeními bylo pomocí lokální sítě Ethernet. Pro převod mezi linkami USARTu a ethernetovým rozhraním je použit modul Lantronix XPort.



Obr. 5.5: Ethernetový převodník XPort

Jedná se o kompletní síťové rozhraní umístěné do kompaktního krytu konektoru RJ-45. Uvnitř modulu se nachází DSTni-LX 186 procesor s řadiči, paměť, obvody rozhraní Ethernet 10/100, rychlý port RS232, diagnostické LED a 3 programovatelné I/O piny [17]. Další základní vlastnosti převodníku:

- protokoly TCP/IP, UDP/IP, Telnet, HTTP a další
- sériová linka CMOS (Asynchronní, 5V Tolerant)
- přenosová rychlost sériové linky až 921600 Bd
- napájení 3,3 V
- interní webové stránky a možnost odesílání e-mailů

Dále se na řídicí desce nacházejí tři programovatelné svítivé LED diody, které informují o stavu zařízení. Samozřejmostí jsou i JTAG rozhraní pro programování jednotlivých mikroprocesorů a tlačítko Reset.

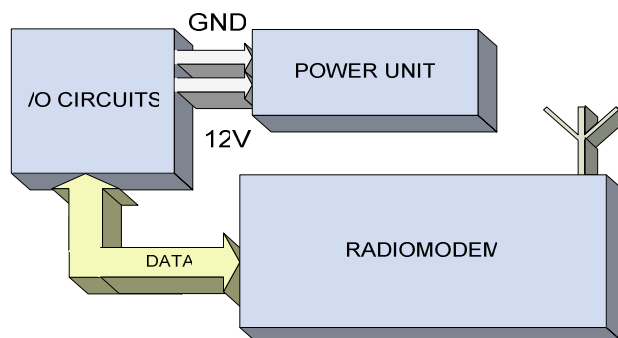
5.2.3 Napájení

Řídicí deska je napájena stejnosměrným stabilizovaným napětím 12V, které je lineárním stabilizátorem 7805 upraveno na 5V v klasickém katalogovém provedení se dvěma blokovacími kondenzátory o velikosti 100nF. Pro ethernetový převodník s odběrem asi 0,2 A je potřeba napětí 3,3V, kterého je dosaženo použitím stabilizátoru LF33CV.

Pro napájení rádiového modulu je do patice spojující obě desky přivedeno kromě napětí 5 V i napětí 12 V.

5.3 Rádiový modul

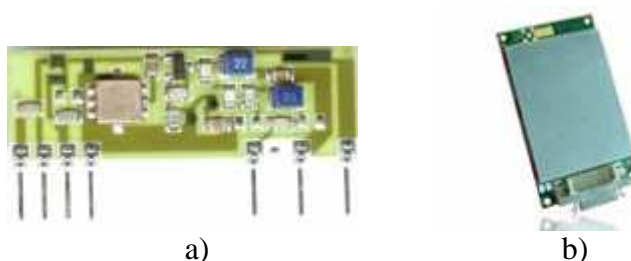
Pomocí rádiových modulů v letadlové části a části pozemní je uskutečňován vlastní rádiový přenos. Jejich úkolem je v letadlové části převod datových signálů na signál rádiový a naopak v pozemní části převod rádiového signálu na data. Blokové schéma modulu je zobrazeno na Obr. 5.6.



Obr. 5.6: Blokové schéma rádiového modulu

5.3.1 Výběr radiomodemu

Na kmitočtu 869 MHz funguje mnoho zařízení. Dají se rozdělit do dvou základních skupin, a to na jednoduché radiové moduly nebo komplexnější radiové modemy.



Obr. 5.7: Příklad a) radiomodu , b) radiomodemu

První skupina, radiomoduly, jsou velice malá jednoduchá zařízení, vyznačují se malým vysílacím výkonem, s tím souvisejícím malým proudovým odběrem, a většinou mají pouze jeden přenosový kanál. Neobsahují žádnou složitou logiku, která by např. obstarávala zabezpečení nebo potvrzování přijatých dat, ani žádné konektory. To vše si musí uživatel navrhnout sám a samozřejmě napsat i příslušný obslužný program. Oproti modemům jsou podstatně levnější.

Jelikož je zapotřebí konstrukčně spolehlivé a odzkoušené zařízení, výběr se soustředil především mezi radiomodemy. V Semestrálním projektu 2, ze kterého tato práce vychází, byly nalezeny dva vhodné radiomodemy, a to B868MC-POWER a X8200, ze kterých byl vybrán druhý jmenovaný. Jednalo se o kvalitní radiomodem s velkým dosahem, maximálním vysílacím výkonem v použitém ISM pásmu a dobrou implementací do rádiového modulu přes sériové rozhraní. Avšak jeho značnou nevýhodou se ukázala být jeho cena, která nemohla být pokryta. Po hledání jiného

radiomodemu se stejnými nebo podobnými parametry, ale výhodnější cenou, byl nalezen radiomodem TinyPro.

TinyPro 500mW

Tento modem vyrábí firma One RF Technology a vyznačuje se nastavitelným vysílacím výkonem až 500 mW. Mimo rozhraní RS232 nabízí i RS485 a RS422. Komunikace je ve všech případech poloduplexní. K výběru je několik přenosových módů: transparentní, se zabezpečením přenášených dat, s adresací, repeater, server/klient, přenos binárních stavů. Dále je připraven firmware pro síť MESH. Pro přenos lze zvolit jeden z deseti rádiových kanálů, každý o šířce 25kHz. Přenosová rychlost kanálu je 9,6 kbit/s (až 115,2 kbit/s na sériové lince). Konfigurace radiomodemu je snadná a rychlá pomocí textových příkazů (AT commands). Dodává se v provedení SMD pro povrchovou montáž nebo DIP. [10]

Další jeho parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

B868 - TinyPro				
Společné parametry				
	MIN	TYP	MAX	Jednotka
Pracovní frekvence	869,400 – 869,650			MHz
Vysílací vzdálenost			4	km
Počet kanálů	10 (první na 869,4125 MHz)			
Šířka kanálu		25		kHz
Rádiový přenos	4,8		38,4	kbit/s
Napájecí napětí	+3,0	+3,6	+3,7	V
Impedance antény		50		Ω
Doba spuštění		135	150	ms
Parametry vysílače				
Proudový odběr		630	650	mA
Modulace	GMSK			
Max. výstupní výkon	20		27	dBm
	100		500	mW
Parametry přijímače				
Proudový odběr		30	35	mA
Citlivost (BER10^{-3})	-100	-105		dBm

Tab. 5.1: Parametry radiomodemu B868 – TinyPro [10]

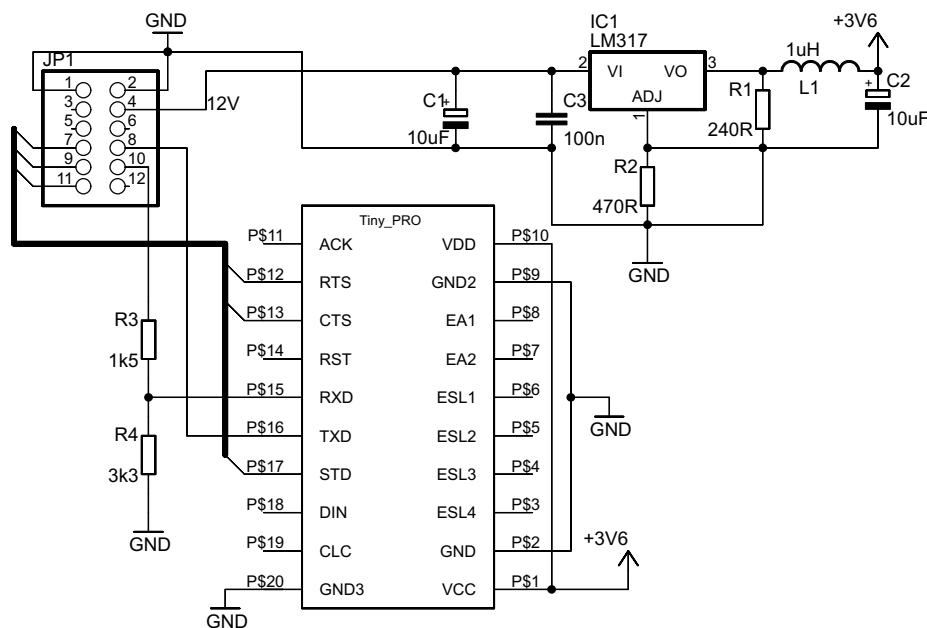


Obr. 5.8: B868 – TinyPro v provedení DIP [10]

5.3.2 Realizace rádiového modulu

Blokové schéma modulu bylo uvedeno na Obr. 5.6. Z něj vyplývá, že celá DPS se bude skládat ze tří částí. První z nich je patice, pomocí které jsou z řídicí desky přivedeny důležité datové signály, což jsou linky TX a RX od sériového převodníku a tři piny mikroprocesoru pro potřeby řízení modemu, a napájení. Dalšími částmi jsou jednotka upravující napájení pro modem a samotný radiomodem.

Pro modul byl použit vybraný radiomodem TinyPro v provedení DIP, jehož výhodou je mimo jiné konektor SMA pro připojení anténního systému. Jediným problémem bylo napájení, protože modem pracuje na napětí 3,6 V. Jelikož lineární stabilizátory toto napětí nepodporují, bylo nutné nalézt jiné řešení. První možností bylo umístit za 5V lineární stabilizátor dvojici diod, např. 1N4007, snižující napětí na hodnotu $(U_{\text{napajecí}} - 2 \cdot U_{\text{dioda}}) = (5 - 2 \cdot 0,7) = 3,6 \text{ V}$. Lepší možností je použití nastavitelného lineárního stabilizátoru, obvodu LM317, který podle odporu nastaví na výstupu požadované napětí. Pro napětí 3,6 V byla hodnota odporu R2 vypočítána na 470 Ω . Na Obr. 5.9 je znázorněno zapojení rádiového modulu a DPS obsahuje příloha č. 5.



Obr. 5.9: Schéma zapojení rádiového modulu


5.4 Výběr antén

Pro dosažení kvalitního rádiového spojení mezi letadlem a pozemním přijímačem je zapotřebí použít antény s následujícími parametry:

- pracovní frekvence v pásmu 869,400 – 869,650 MHz
- všesměrová anténa
- anténa zakončena impedancí 50 Ω
- maximální možný zisk přijímací antény

5.4.1 Anténa pozemní stanice


Přijímací anténa je umístěna na vrchu anténního rotátoru 1,5 m nad zemí. Pro tuto aplikaci byla vybrána anténa vyhovující požadovaným parametrům, a to anténa EXE821BNX firmy Antenex Laure. Jedná se o půl-vlnný dipól, který je dlouhý necelých 20 cm a má zisk 2,5 dB. Jeho nejdůležitější parametry uvádí následující tabulka.

½ vlnný dipól	
Frekvence 821,00 – 902,00 MHz	
Centrální frekvence 861,50 MHz	
Zisk 2,5 dB	
Vertikální polarizace	
Impedance antény 50 Ω	
BNC konektor	
Max. VSWR 1,5:1	
Délka 8“ (cca 20cm)	
Vysoká odolnost a výkonnost	

Tab. 5.2: Parametry přijímacího dipólu EXE821BNX [12]

5.4.2 Anténa letové části

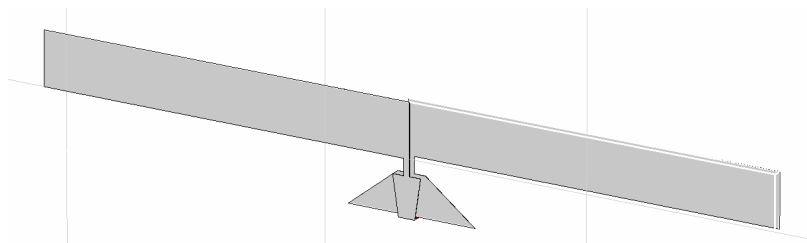
Vysílací anténa umístěná v trupu letadla musí být malá, ohebná, s běžně dostupným konektorem. Vybral jsem anténu s označením EXC821BN od stejné firmy jako anténa přijímací části. Jedná se také o půl-vlnný dipól a jeho nejdůležitější parametry obsahuje následující tabulka.

½ vlnný dipól	
Frekvence 821,00 – 902,00 MHz	
Centrální frekvence 861,50 MHz	
Zisk 0 dB	
Vertikální polarizace	
Impedance antény 50 Ω	
BNC konektor	
Max. VSWR 1,5:1	
Délka 4“ (cca 10cm)	
Vysoká odolnost a výkonnost	

Tab. 5.3: Parametry vysílacího dipólu EXC821BN [12]

5.5 Návrh planárního dipólu

Jedním z dalších možných typů antén, použitelných pro akrobatický letoun, jsou antény planární. Jejich hlavní výhodou, oproti dipólům, spočívá v jejich velikosti a možnosti upevnění, „nalepení“, na povrch letounu, aniž by došlo ke zhoršení jeho aerodynamického tvaru.



Obr. 5.10: Základní geometrie planárního dipólu

Problematika návrhu planárních antén je velice rozsáhlá a specifická. Jedním z typických představitelů je planární dipól. Jedná se o anténu s velmi dobrými parametry a jednoduchou konstrukcí. Základní geometrie je znázorněna na Obr. 5.10. Anténa je navržena pro substrát RF4 ($\epsilon_r = 4,25$, $h = 1,58$ mm) dle následujících návrhových vztahů.

- Určení délky ramene podle [11]

$$l = \frac{\lambda_d}{4}, \quad (5.1)$$

kde: h je výška mikrovlnného substrátu.

- Určení vlnové délky λ_d pro daný substrát podle [11]

$$\lambda_d = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (5.2)$$

kde: c - rychlost světla

f_r - pracovní kmitočet antény

ϵ_r - relativní permitivitu mikrovlnného substrátu.

- Určení permitivity podle [11]

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{A}}} \quad \text{pro } \frac{A}{h} \geq 1, \quad (5.4)$$

kde: ϵ_{ef} - efektivní permitivitu mikrovlnného substrátu

A - délka ramene dipólu vypočtená dle vztahu 5.1 [11].

- Pro výpočet napájecího vedení o charakteristické impedanci $Z = 50 \Omega$ je nutné určení pomocných konstant a, b podle [11]

$$a = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}} \cdot \left[0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right], \quad (5.5)$$

$$b = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (5.6)$$

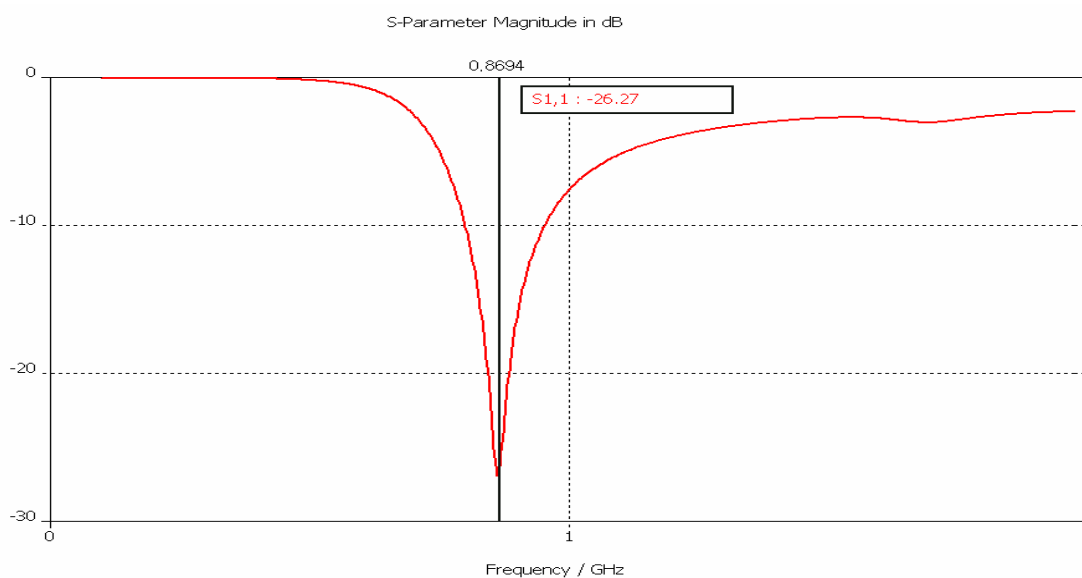
kde: $Z_0 = 50 \Omega$ je požadovaná charakteristická impedance
 ϵ_r - relativní permitivitu mikrovlnného substrátu.

- Pro výpočet požadované šířky mikropásku [11]

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \exp(a)}{\exp(2a) - 2} \quad \text{pro } a > 1,52, \quad (5.7)$$

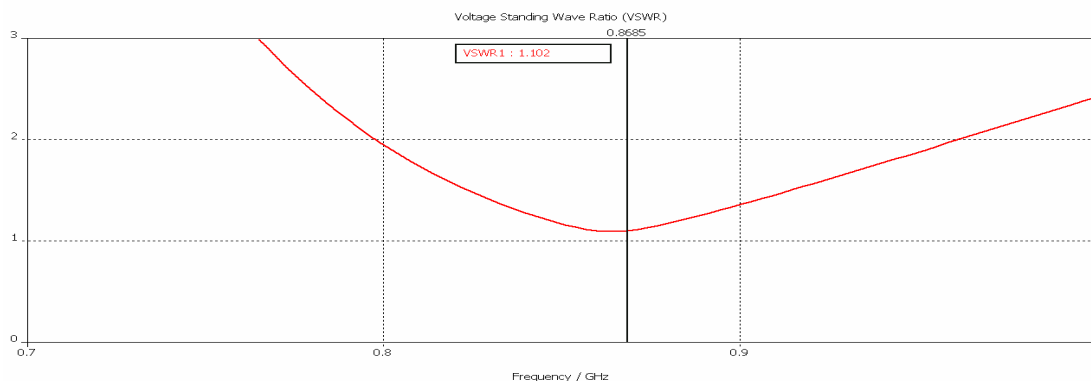
$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ b - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(b - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad \text{pro } a \leq 1,52 \quad (5.8)$$

V souladu s výše uvedenými vztahy byl vytvořen model v programu CST Microwave Studio. Na obr. 5.11 je vykreslena kmitočtová závislost činitele odrazu antény získaná také pomocí CST Microwave Studia.



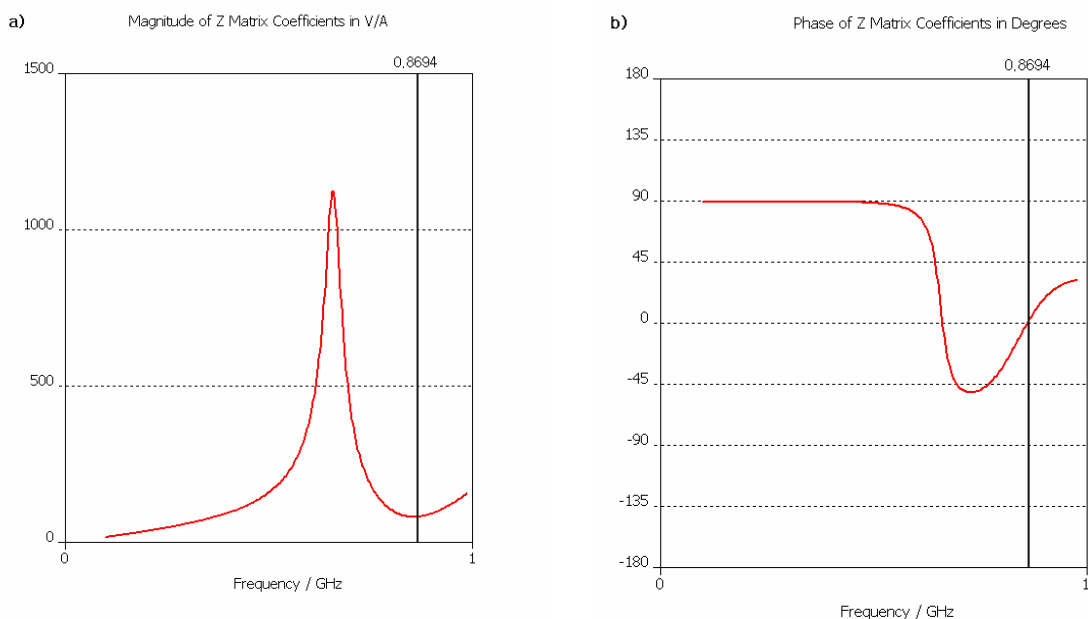
Obr. 5.11: Kmitočtová závislost činitele odrazu na vstupu dipólu

Výsledky simulace dokazují dostačující šířku pásma dipólu (pokles velikosti činitele odrazu na vstupu o 10 dB). Ekvivalentně lze impedanční šířku pásma vyjádřit poměrem stojatých vln, který by v daném kmitočtovém pásmu neměl překročit hodnotu 1,5 (viz obr. 5.12).



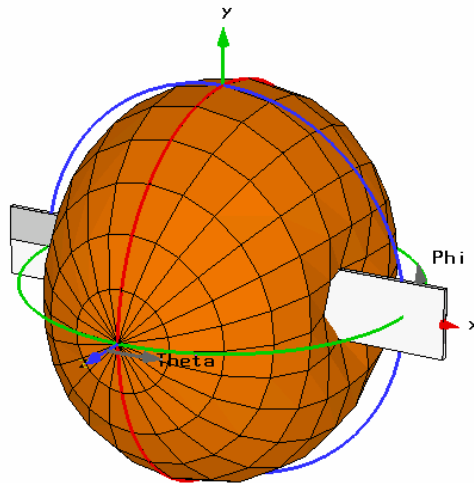
Obr. 5.12: Průběh poměru stojatých vln

Neméně důležité je zachování správné vstupní impedance z důvodu připojeného napáječe. Modul vstupní impedance a fáze je na obr. 5.13.



Obr. 5.13: Průběh vstupní impedance: a) modul b) fáze

Požadavkem na dipól je jeho všesměrové vyzářování. Tvar směrové charakteristiky je závislý na pracovním kmitočtu. Na obr. 5.14 je znázorněna směrová charakteristika antény na středním kmitočtu $f = 869,4$ MHz. Anténa dosahuje zisku 2,9 dBi.

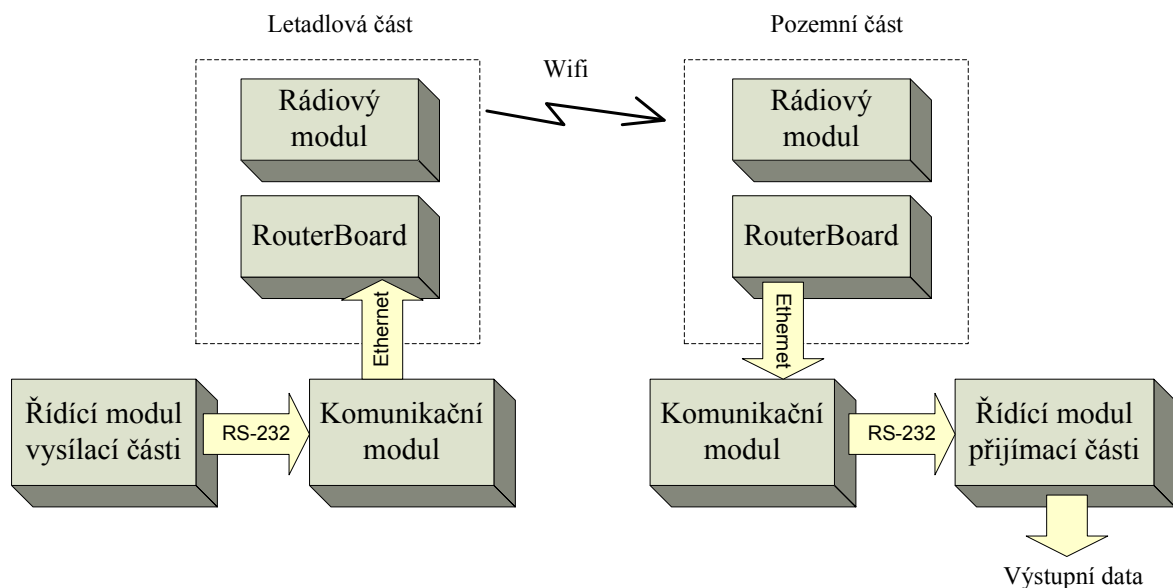


Obr. 5.14: Směrová charakteristika planárního dipólu

5.6 Přenos paralelním kanálem

Z letounu se mimo dat ze snímače letových parametrů přenášejí videesignály z kokpitu pilota. Systém tohoto přenosu byl vytvořen před dvěma lety a je zcela funkční a bezproblémový, což bylo ukázáno např. při Mistrovství České republiky v letecké akrobacii 2008. Je realizován protokolem IEEE 802.11a v kmitočtovém pásmu 5,20 – 5,82 GHz.

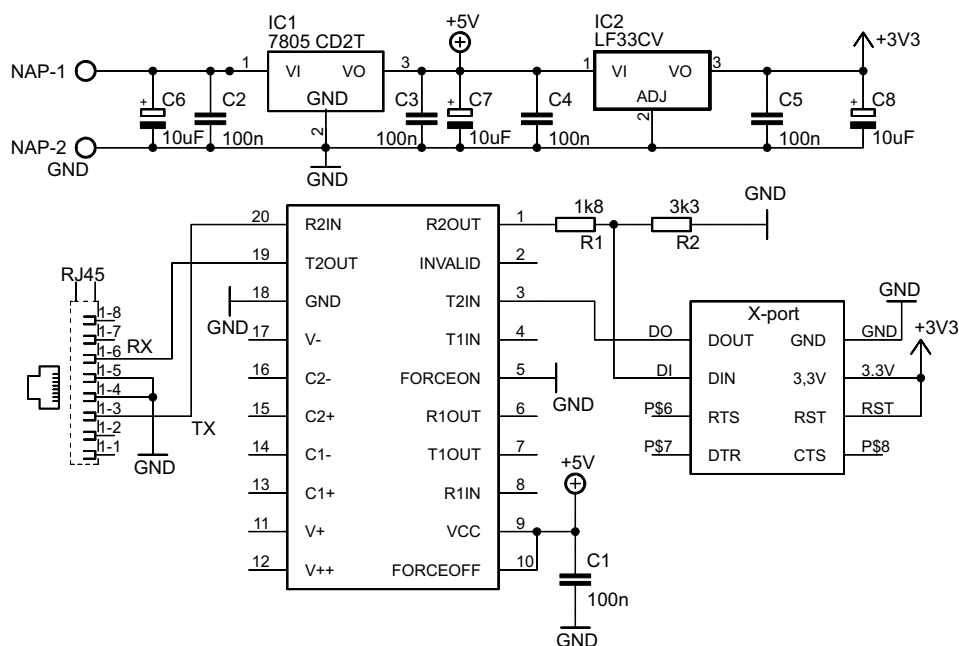
Z důvodu nedostatku finančních prostředků nebyl doposud realizován nákup radiomodemů. Aby bylo docíleno požadovaného přenosu dat ze snímače letových parametrů, realizovalo se propojení obou systémů jak ukazuje Obr. 5.15.



Obr. 5.15: Schéma přenosu dat pomocí systému pro přenos videa

Komunikační modul je napájen 12 V DC. Pro potřebu napájení dílčích částí obsahuje 5V lineární stabilizátor 7805 a 3,3V stabilizátor LF33CV. Deska obsahuje převodník TTL úrovní mikroprocesoru na Ethernet, zařízení Xport. Jeho funkce a vlastnosti byly popsány výše. Data jsou do modulu přiváděna pomocí upraveného UTP kabelu ve formě sériových signálů, které jsou pomocí obvodu MAX3235E převedeny na TTL úroveň pro potřeby Xportu. Z důvodu rozdílného napájecího napětí obou převodníků je mezi ně zařazen odporový dělič, který zajišťuje velikost vstupní úrovně Xportu na hodnotu 3,3V.

Komunikační deska je součástí řídicí jednotky systému pro přenos videa a tomu odpovídá i její tvar a velikost. Schéma zapojení modulu zobrazuje Obr. 5.16 a DPS je uvedena v příloze č. 6.



Obr. 5.16: Schéma zapojení komunikačního modulu



Obr. 5.17: Fotografie modulu z vrchní strany

6 Software zařízení

Program pro obsluhu mikroprocesorů vysílací i přijímací části byl vytvořen v jazyku C ve vývojovém prostředí AVR Studio od firmy Atmel. To mimo editace a ladění programu umožňuje i samotné programování mikroprocesoru, které probíhá díky programátoru AVR Dragon pomocí JTAG rozhraní.

Každý z mikroprocesorů vykonává své specifické funkce, které jsou v následujících kapitolách popsány vývojovými diagramy. Nejdříve je ale popsán formát přijímaných dat a ukázáno časové rozvržení posílání dat.

6.1 Formát vstupních dat

Komunikace mezi jednotlivými bloky systému probíhá v přesně stanoveném tvaru a délce datového rámce. Data přijímaná ze snímače letových parametrů se skládají z údajů GPS přijímače a dat ze senzorů. Strukturu obou rámců zobrazuje Obr. 6.1.

GPS

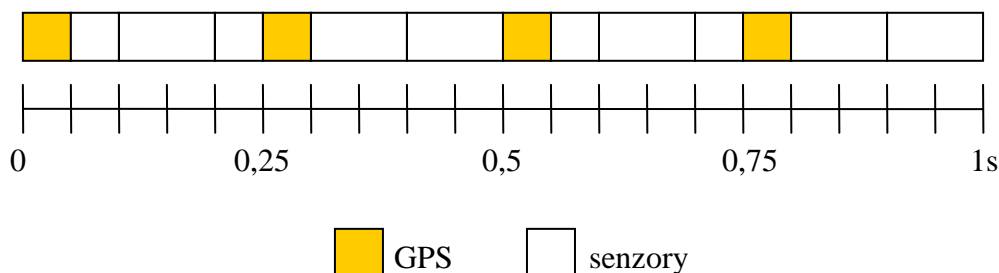
SYNC. CHAR		CLASS	ID	LENGTH	PAYLOAD	CHECKSUM	
0xB5	0x62	0x01	0x06	0x0034	52 Bytes	CK_A	CK_B

Sensors

SYNC. CHAR		CLASS	ID	LENGTH	PAYLOAD	CHECKSUM	
0xB5	0x62	0x10	0x60	0x0016	22 Bytes	CK_A	CK_B

Obr. 6.1: Struktura datových rámců

První čtyři byty rámce označují hlavičku, která označuje, jedná-li se o data z GPS nebo senzorů. Hlavičku GPS dat tvoří sekvence B5 62 01 06 a celý rámec má délku 60 bytů. Data ze senzorů jsou opatřeny hlavičkou B5 62 10 60 a celý rámec je složen z 28 bytů. Obr. 6.2 ukazuje posílání jednotlivých datových rámců. Čtyřikrát za sekundu jsou odeslány data GPS přijímače a každých 100 ms údaje ze senzorů.



Obr. 6.2: Rámec odesílaných dat

6.2 Firmware vysílače

Obslužný program mikroprocesoru vysílací letadlové části se skládá z jednotlivých souborů, jejichž výčet a funkci znázorňuje Tab. 6.1. Tyto soubory jsou obsaženy v příloženém CD.

Soubor	Popis
inic. c	Inicializace sběrnic a I/O pinů
main. c	Hlavní program
at_com. c	Příkazy radiomodemu
inic. h	Hlavičkový soubor inic. c
main. h	Hlavičkový soubor main. c
at_com. h	Hlavičkový soubor at_com. c

Tab. 6.1: Soubory firmwaru vysílače

6.2.1 Inicializace

Po spuštění je třeba nejprve nastavit parametry jednotlivých sběrnic a vlastnosti vstupních/výstupních pinů, které budou využívány. Mikroprocesor v letadlové části pracuje se sběrnicí SPI, ze které data přijímá, a USART, na kterou data vysílá. SPI sběrnice je nastavena na SLAVE a data jsou přijímána maximální rychlostí. USART je nastavena na asynchronní přenos s rychlostí 9600 Bd, jedním stop bitem a žádným bitem paritním. Dále soubor obsahuje funkce pro přijetí a vyslání dat po této sběrnicí.

6.2.2 Příkazy radiomodemu

Tento soubor je společný jak pro vysílací část umístěnou letounu, tak i pozemní přijímací část, a proto bude jeho popis uveden pouze jednou.

Výhodou použitého radiomodemu je možnost jeho programování pomocí AT-příkazů. Tyto příkazy jsou podobné klasickým modemovým příkazům, ale mají i svá specifika. V tomto souboru jsou uloženy všechny použitelné AT-příkazy modemu TinyPro a funkce pro jejich výběr a poslání radiomodemu. Rámec vysílaného AT-příkazu je naznačen v Tab. 6.2.

A	T	Příkaz	Doplňující data	<CR>
---	---	--------	-----------------	------

Tab. 6.2: Rámec AT-příkazu [10]

Doba mezi jednotlivými částmi příkazu nesmí být delší než 10s. Rámec je uvozen znaky AT a zakončen potvrzujícím znakem <CR> (Carriage Return). Mezi nimi je obsažen konkrétní příkaz a jeho doplňující informace.

Soubor dále obsahuje funkci pro zpracování přijatých dat od radiomodemu, a to konkrétně potvrzení vybrané funkce příjmem <OK> nebo neuskutečnění příkazu příjmem <ERROR> .

Nejpoužívanější AT-příkazy se stručným popisem a nejdůležitější registry radiomodemu uvádí Tab. 6.3.

Příkaz	Popis
+++	Mód konfigurace modemu
ATO	Operační mód modemu
ATSn?	Zjištění hodnoty registru n
ATSn=m	Změna hodnoty registru n na hodnotu m
ATR	Reset parametrů na tovární hodnoty
Registr	Popis
206	Single channel / multi channel
200	Frekvenční pásmo použité ke komunikaci
201	Rychlost rádiového přenosu
202	Hodnota výstupního výkonu vysílače
210	Rychlost sériové linky
212, 213	Nastavení sériových rámců (parita, stopbity, ...)
220	Komunikační mód
255	Nastavení sítě

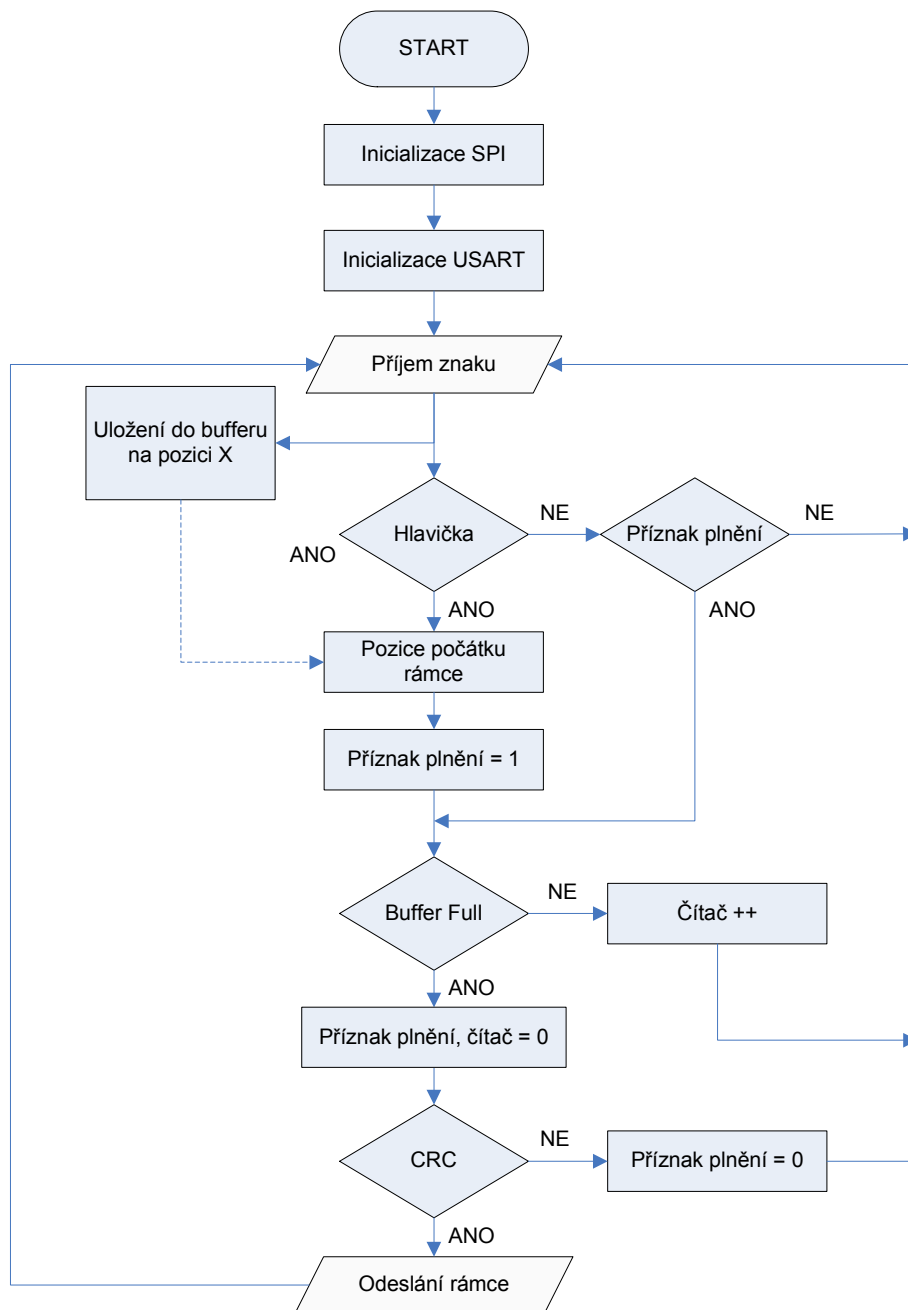
Tab. 6.3: Přehled AT-příkazů a registrů radiomodemu [10]

6.2.3 Hlavní program

Hlavní program mikroprocesoru vykonává veškeré řídicí funkce potřebné pro fungování zařízení. Obsahuje funkce pro kontrolu kontrolních součtů, tedy správnosti přijatých dat, plnění vstupního bufferu a tvorbu rámců pro posílání dat k rádiovému modulu, a funkce pro vlastní řízení a případné přeprogramování radiomodemu. Algoritmus jeho činnosti je zobrazen na Obr. 6.3.

Po inicializaci se čeká na příchozí data. Jejich příjem z SPI sběrnice se provádí v obsluze přerušení. Během něj je znak uložen do vstupního bufferu a spočítán kontrolní součet. Sekvence 4 přijatých znaků je porovnána s hlavičkou GPS rámce a rámce senzorů. Pokud sekvence odpovídá jednomu z rámců, je zaznamenána pozice počátku rámce, spustí se čítač přijatých znaků a nastaví se příznak plnění příslušného rámce. Při naplnění příslušného bufferu je zkontrolován kontrolní součet a pokud souhlasí s kontrolním součtem spočítaným v mikroprocesoru snímače letových parametrů, jsou data poslána k rádiovému modulu.

Při chybě kontrolního součtu nebo při příchodu hlavičky, kdy není zcela zaplněn rámeček všemi hodnotami, dojde k vynulování vstupního bufferu a plnění začne od začátku.



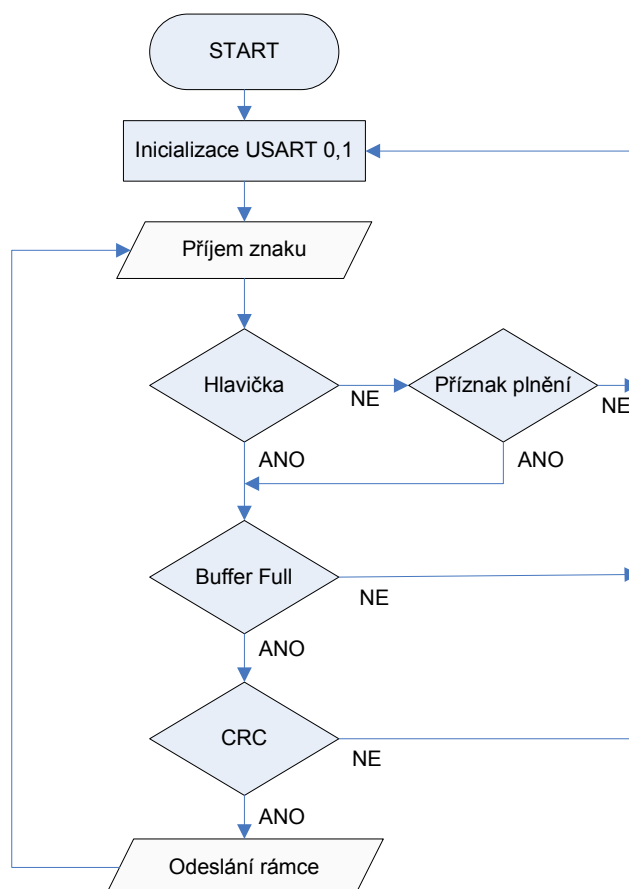
Obr. 6.3: Vývojový diagram hlavního programu vysílače

6.3 Firmware přijímače

Obslužný software přijímače se skládá ze stejných částí uvedených při popisu firmwaru vysílače. Přijímací modul obsahuje dva mikroprocesory, z čehož první z nich (hlavní) vykonává veškeré řídicí funkce, a druhý je použit pouze pro předávání údajů obsahující GPS pozici, jak bylo zmíněno výše.

6.3.1 Hlavní mikroprocesor

Funkce hlavního mikroprocesoru pozemní části jsou obdobné funkcím mikroprocesoru části letové. Zjednodušený vývojový diagram je znázorněn na Obr. 6.4.



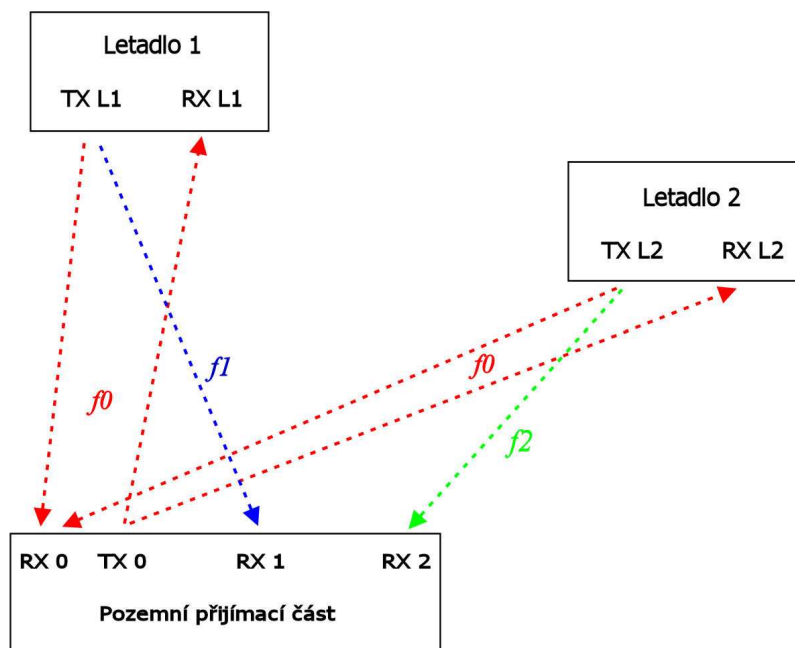
Obr. 6.4: Vývojový diagram hlavního programu přijímače

Příjem dat se provádí pomocí přerušení USART sběrnice. Poté je znak uložen do vstupního bufferu. Po nalezení hlavičky příslušného rámce a příjmu všech jeho očekávaných hodnot se provede kontrolní součet a pokud je vše v pořádku, odešle se na druhou USART sběrnici. Mikroprocesor obsahuje i potřebné funkce pro řízení radiomodemu.

Mikroprocesor ovládá i LED diody, které jsou na přijímací desce k rychlému zjištění stavu příjmu. Po připojení napájení svítí zelená dioda a při příjmu dat bliká oranžová dioda. Pokud přijde neúplný nebo poškozený rámeček, zabliká červená dioda.

7 Přenos z více letadel

Dalším krokem je rozšíření systému pro přenos dat z více letadel. Při soutěži v akrobatickém létání se ve vzduchu mohou pohybovat pouze dva letouny, a to letoun provádějící soutěžní let, a letadlo, které se na něj připravuje. Tato kapitola ukazuje řešení přenosu dat z více letadel.



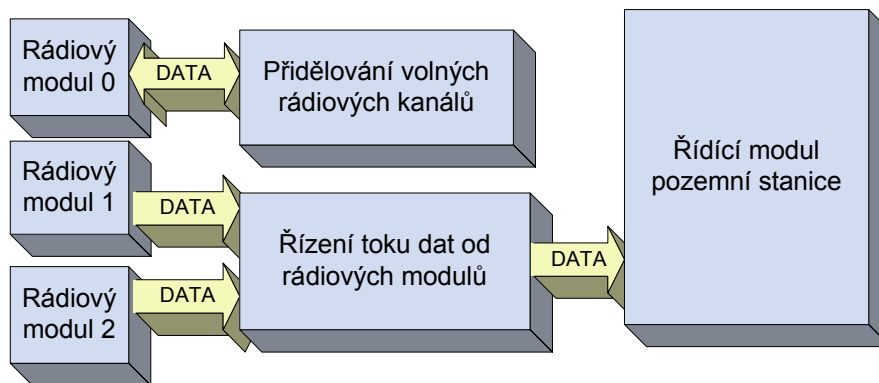
Obr. 7.1: Ukázka komunikace mezi letadly a pozemní stanicí

Na Obr. 7.1 je naznačena komunikace mezi dvěma letouny a pozemní stanicí. První letadlo se na frekvenci f_0 ohlásí pozemní stanici a požádá ji o přidělení volného rádiového kanálu. Ta letounu odešle informaci o prvním volném kanálu a nařídí rádiu přeladit se na ni. Následná komunikace probíhá na nové frekvenci f_1 , po které jsou odesílána data ze snímače letových parametrů. Pokud se objeví další letoun, vysílá opět na základní frekvenci f_0 žádost o přidělení volného kanálu. Příjemní stanice vyhodnotí jeho žádost a jelikož je první kanál již obsazen, pošle letounu informaci o volném druhém rádiovém kanálu a příkaz na jeho naladění. Další komunikace probíhá na frekvenci f_2 . Pomocí tohoto principu lze komunikovat i s více letadly, závisí pouze na počtu rádiových modulů v pozemní části.

Návrh systému

Veškerá zařízení a komponenty, které byly uvedeny v předchozích kapitolách, byly vytvářeny a vybírány pro možnost tohoto rozšíření. I když jsou v této práci zařízení pojmenovány jako vysílač v letadlové části a přijímač v pozemní části, obě jsou schopny plnit vysílání i příjem. Byl vybrán radiomodem se schopností přijímat signál na různých kmitočtech a snadným přeladěním na vybrané pásmo.

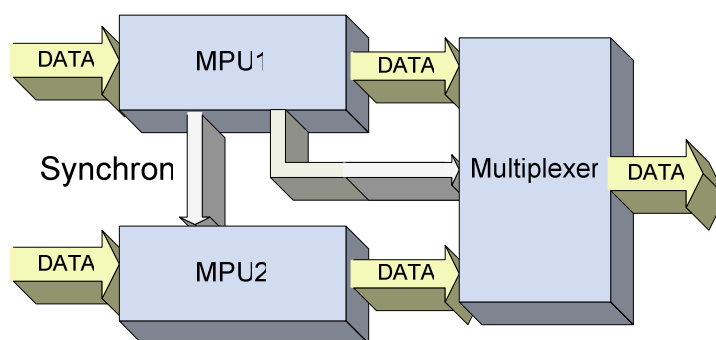
Zařízení umístěné v letounu je, po hardwarové i softwarové stránce, na toto rozšíření kompletně připraveno. K hardwaru pozemní stanice je nutné vložit před řídicí modul, obstarávající vlastní zpracování přijatých dat, logiku, která by obstarávala kontrolu a řízení přidělování volných kanálů. Dále by řídila tok dat z rádiových modulů z pohledu časového multiplexování. Blokové schéma návrhu logiky pro pozemní stanici je zobrazeno na Obr. 7.2.



Obr. 7.2: Blokové schéma systému pro zpracování dat z více letounů

Funkci jednotky pro přidělování volných rádiových kanálů by mohl vykonávat jediný mikroprocesor. Jeho úkolem by bylo zpracování dotazu na přidělení volného kanálu a vyslání pokynů řídicí jednotce v letadlové části. Jednotku pro řízení datového toku od rádiových modulů by bylo nejjednodušší vytvořit pomocí multiplexeru a mikroprocesoru, který by jeho ovládáním určoval, která data se budou přenášet do řídicího modulu.

Při kontinuálním přenosu dat z dvou nebo více letounů najednou bude jednotka řízení toku obsahovat další mikroprocesory, jejichž počet závisí na počtu radiomodulů. Blokové schéma jednotky pro řízení toku od dvou letounů je znázorněno na Obr. 7.3.



Obr. 7.3: Blokové schéma jednotky řídicí datový tok rádiových modulů

Hlavní mikroprocesor má mít tři hlavní funkce: příjem dat z prvního rádiového modulu, synchronizace druhého mikroprocesoru a řízení multiplexeru. Druhý mikroprocesor přijímá data z druhého rádiového modulu a v určitých časových intervalech odesílá data k řídicímu modulu pozemní části. Toto řešení zaručuje časově přesné odesílání dat, jediným omezením je počet vstupních bran použitého multiplexeru.

8 Závěr

Tato práce se zabývá systémem pro bezdrátový přenos letových údajů z letounu na pozemní stanici. Konkrétně se jedná o data obsahující GPS pozici a údaje o akceleraci a náklonu letadla, která se přenášejí během soutěžního akrobatického letu a jsou použita k jeho online vyhodnocování.

V úvodních kapitolách jsou uvedeny požadavky na celý systém přenosu dat a zpracován úvod do problematiky přenosu rádiových signálů. Jsou zde uvedeny informace o bezlicenčních pásmech a přehled typických digitálních modulací. Dále je zpracován návrh rádiového spoje pro frekvenci 869 MHz a určena jeho energetická bilance. Další kapitoly se zabývají konkrétním návrhem zařízení.

Byl navržen princip přenosu dat, které je použitelný v uvedených podmínkách mezi akrobatickým letounem a pozemní stanicí. Přenos se odehrává v rádiovém volném pásmu SDR, konkrétně v subpásmu 869,40 – 869,65 MHz. V tomto pásmu pracuje mnoho zařízení. V Semestrálním projektu 2, ze kterého tato práce volně vychází, byly vybrány dva radiomodemy s vhodnými parametry. Jejich nevýhodou se ale ukázala jejich příliš vysoká cena, a tak bylo nalezeno vhodnější řešení v podobě cenově dostupnějšího, avšak požadovaným parametrům vyhovujícího, radiomodemu TinyPro. Bylo navrženo a realizováno schéma zapojení a desky plošných spojů letadlové části a části pozemní, i obslužné programy jednotlivých řídicích mikroprocesorů. Dále byla navržena planární anténa, které splňuje požadavky uvedeného radiomodemu a jejíž předností je snadná instalace na akrobatický letoun.

Z důvodu nedostatku finančních prostředků nebylo možné realizovat nákup navržených radiomodulů. Aby bylo docíleno požadovaného přenosu letových údajů, bylo uskutečněno propojení toho systému se systémem pro přenos videesignálů z letounu na pozemní stanici. Toto řešení je pouze dočasné. Po sehnání potřebných prostředků se počítá s plnou realizací systémů a práce na vývoji systému zdaleka nekončí.

Na závěr bych chtěl poděkovat celému týmu podílejícího se na realizaci kompletního systému, především Ing. Vladimíru Machulovi, jež je zadávajícím této práce a autorem systému pro přenos videa. Bez jeho cenných rad a znalostí problematiky přenosu dat z letounu by byly návrh a realizace zařízení značně obtížnější.

9 Seznam použité literatury:

- [1] PROKEŠ, A. *Rádiové přijímače vysílače, přenášky*. Skriptum. VUT Brno. Brno, 2005.
- [2] *Všeobecné oprávnění č. VO–R/10/08.2005-24 k využívání rádiových kmitočtu a k provozování zařízení krátkého dosahu* [online]. Český telekomunikační úřad, Praha, 2005. Dostupné z WWW: <http://www.ctu.cz/>.
- [3] *Plán přidělení kmitočtových pásem* . [online]. Český telekomunikační úřad, Praha, 2004. Dostupné z WWW: <http://www.ctu.cz/>.
- [4] KOCOUREK, J., NOVÁK, J. *Přenos informace*. Skriptum. České vysoké učení v Praze. Praha, 2006.
- [5] BIOLEK, D. *Datová komunikace* [online]. Elektronické skriptum. Brno 2003. Dostupné z WWW: <http://www.vabo.cz/stranky/biolek/vyukaVUT/skripta/DKO.pdf>.
- [6] PROKEŠ, A. *Rádiové a mobilní komunikace*. Elektronické skriptum. VUT Brno. Brno, 2005.
- [7] Wikipedia. *Frequency-shift keying*. [online]. 2008. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift_keying.
- [8] Wikipedia. *Hammingův kód*. [online]. 2008. Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Hamming%C5%AFv_k%C3%B3d.
- [9] ATMEL 8-bit AVR Microcontroller with 32K In-System Programmable Flash. Data Sheet [online]. Atmel Corporation, 2007. Dostupné na: <http://www.atmel.com>.
- [10] *B868-TINYPRO*. Data Sheet [online]. ONE RF Technology, 2007. Dostupné na: http://www.rf-solutions.co.uk/acatalog/Manual_B868-TinyPro_v1-1-1.pdf.
- [11] POULARIKAS, A. *Antenna handbook of antennas in wireless communications*. CRC Press: Godara 2002.
- [12] Sale Stores. *Antenex Laure EXC821BN* [online]. 2008. Dostupné z WWW: <http://salestores.com/antene338.html>.
- [13] Sale Stores. *Antenex Laird EXE821BNC* [online]. 2008. Dostupné z WWW: <http://salestores.com/antene383.html>.
- [14] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z. *Navrhování rádiových spojů*. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2002.
- [15] Petr Faltus. *Interaktivní výpočet rádiové trasy*. [online]. 2005. Dostupné z WWW: <http://www.qsl.net/ok1cfp/lincal.htm>.

- [16] ŽALUD, V. *Moderní radioelektronika*. 1. vydání. BEN – technická literatura. Praha, 2000.
- [17] Lantornix. *XPort Data Sheet*. [online]. 2005. Dostupné z WWW: http://www.lantronix.com/pdf/XPort_DS.pdf.
- [18] PECHAČ, P., ZVÁNOVEC, S. *Základy šíření vln*. 1. vydání. BEN – technická literatura. Praha, 2007.

10 Seznam použitých zkratek:

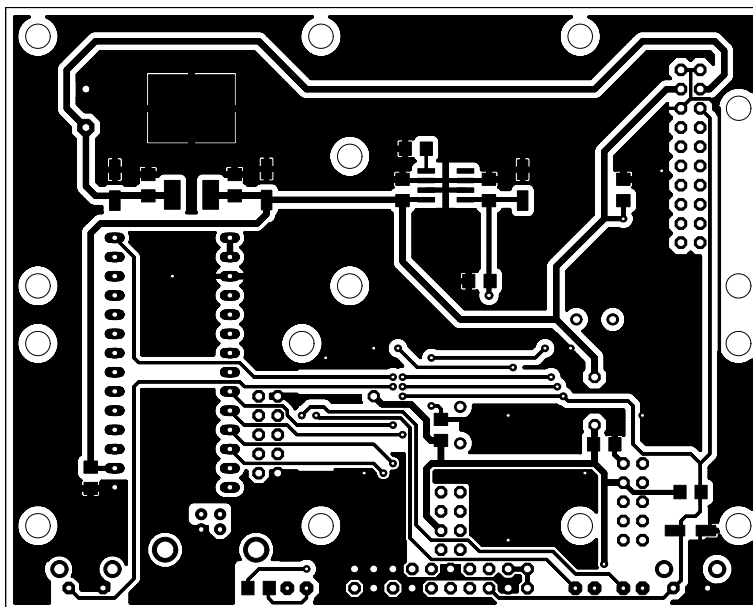
BER	Chybovost signálu [Bit Error Rate]
DC	Stejnoseměrné napětí [Direct Current]
EIRP	Ekvivalentní izotropně vyzářený výkon [Equivalent Isotropically Radiated Power]
FSK	Frekvenční modulace [Frequency-shift keying]
GPS	Globální polohový systém [Global Positioning System]
GMSK	Dvojstavové kmitočtové klíčování s minimálním zdvihem s Gaussovskou dolní propustí [Gaussian Minimum Shift Keying]
GSM	Globální systém pro mobilní komunikaci [Global System for Mobile communication]
ISM	Průmyslové, vědecké a lékařské aplikace [Industry, Science and Medical application]
JTAG	Architektura pro programování [Joint Test Action Group]
ITU	Mezinárodní telekomunikační unie [International Telecommunication Union]
PWM	Modulace délkou nebo šířkou impulsu [Pulse Width Modulation]
RS232	Sériové linka [Serial cable]
RTC	Hodiny reálného času [Real Time Counter]
SPI	Sériové periferní rozhraní [Serial Peripheral Interface Bus]
SRD	Zařízení s krátkým dosahem [Short Range Device]
SK	Klíčování [Shift keying]
UHF	Ultra krátké vlny [Ultra High Frequency]
USART	Synchronní a asynchronní sériové rozhraní [Addressable universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter]
TTL	Tranzistorově-tranzistorová logika [Transistor-Transistor Logic]
VSWR	Poměr stojatých vln [Voltage Standing Wave Ratio]
WAC	Světový pohár v akrobatickém létání [World Aerobatic Cup]
Wifi	Lokální bezdrátová síť [Wireless Fidelity]

11 Seznam příloh:

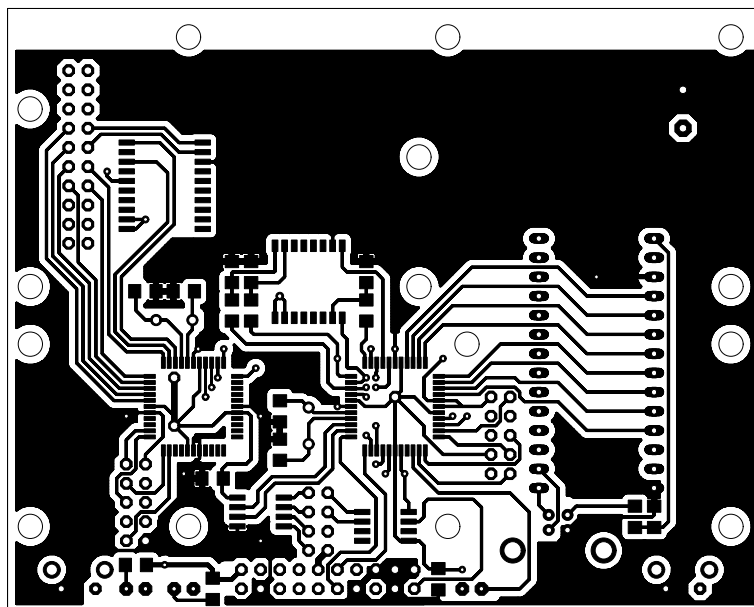
1. Schéma zapojení řídicího modulu letadlové části
2. Výkresová dokumentace řídicího modulu letadlové části
3. Schéma zapojení řídicího modulu přijímače pozemní části
4. Výkresová dokumentace přijímače pozemní části
5. Komunikační modul – TinyPro
6. Komunikační modul – Ethernet
7. Seznamy součástek desek plošných spojů
8. Výkres planárního dipólu
9. Paměťové médium CD-ROM

2. Výkresová dokumentace vysílače letadlové části

2.1 Desky plošných spojů

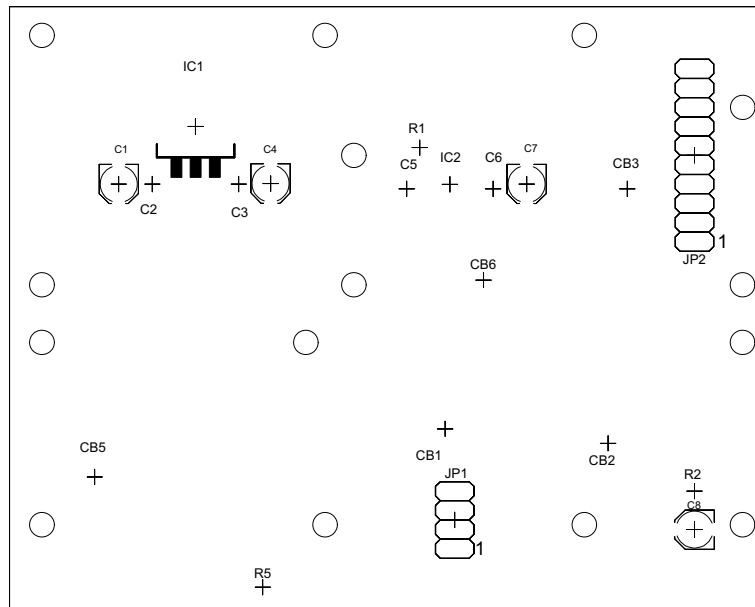


Spodní strana, měřítko 1:1

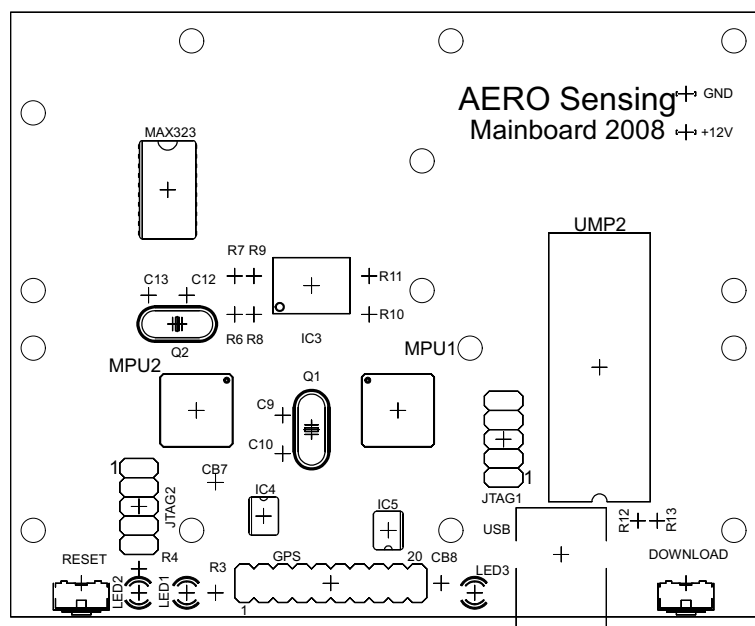


Vrchní strana, měřítko 1:1

2.2 Osazovací plány

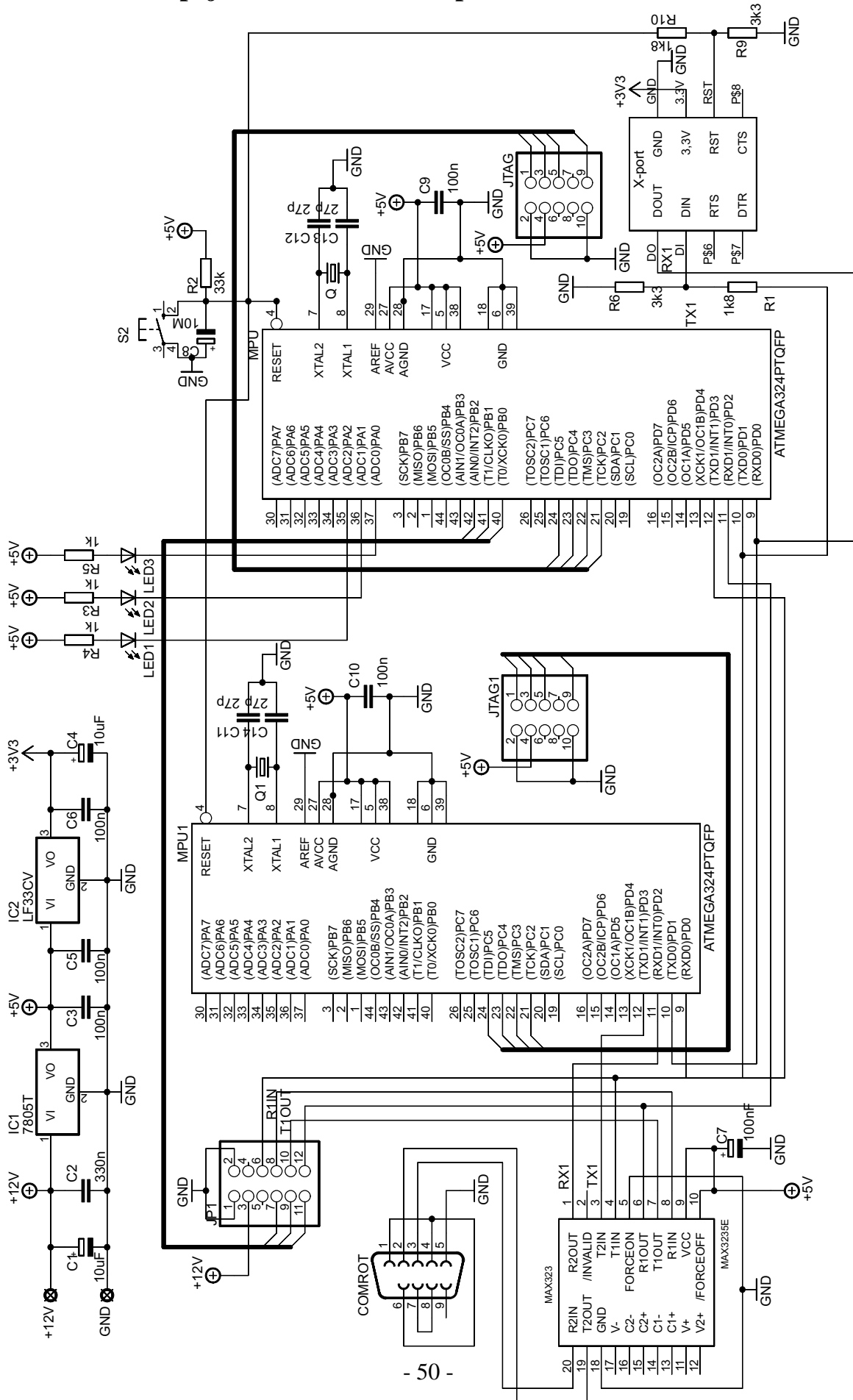


Spodní strana, měřítko 1:1



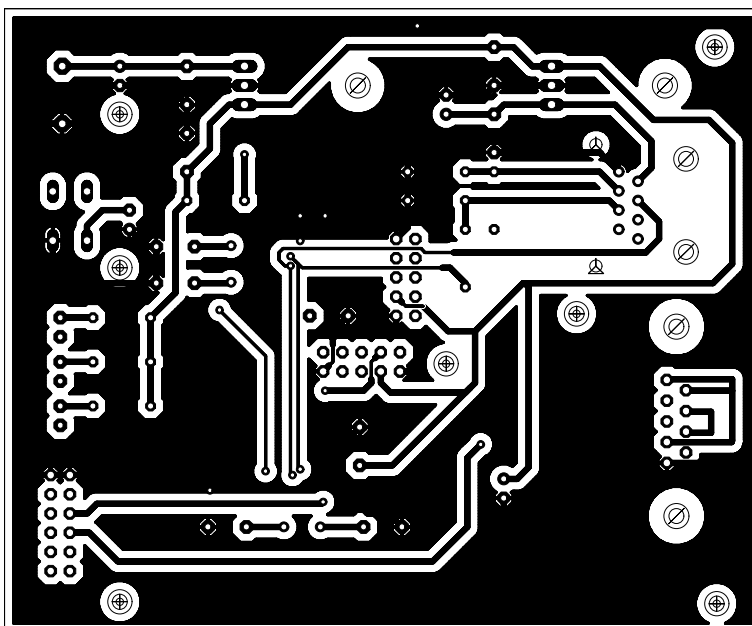
Vrchní strana, měřítko 1:1

3. Schéma zapojení řídicího modulu pozemní části

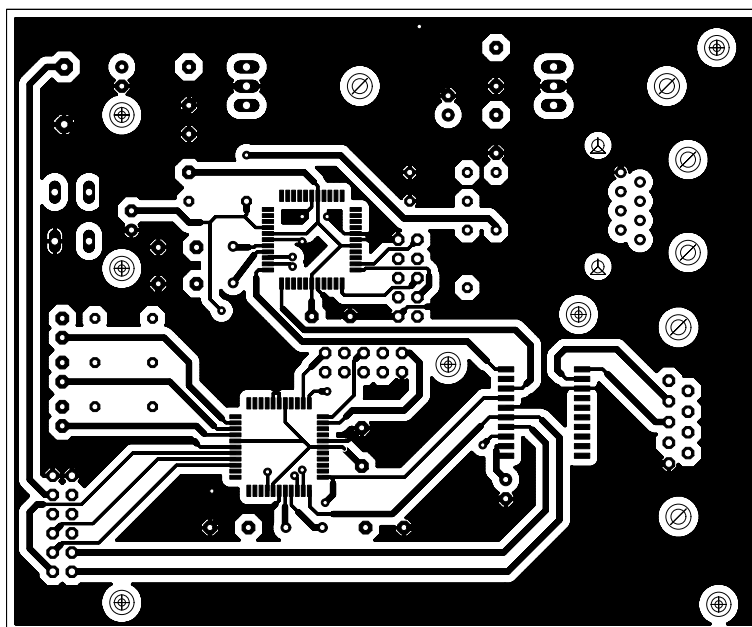


4. Výkresová dokumentace řídicího modulu přijímače pozemní části

4.1 Desky plošných spojů

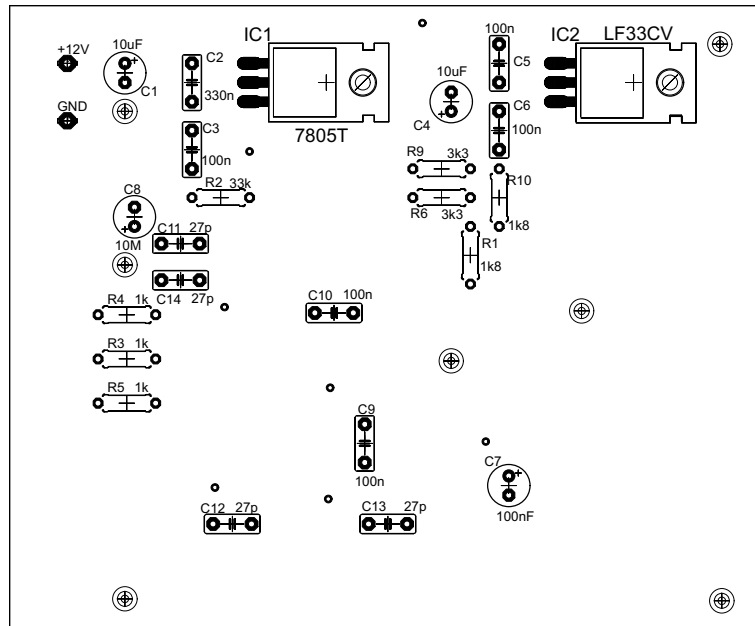


Spodní strana, měřítko 1:1

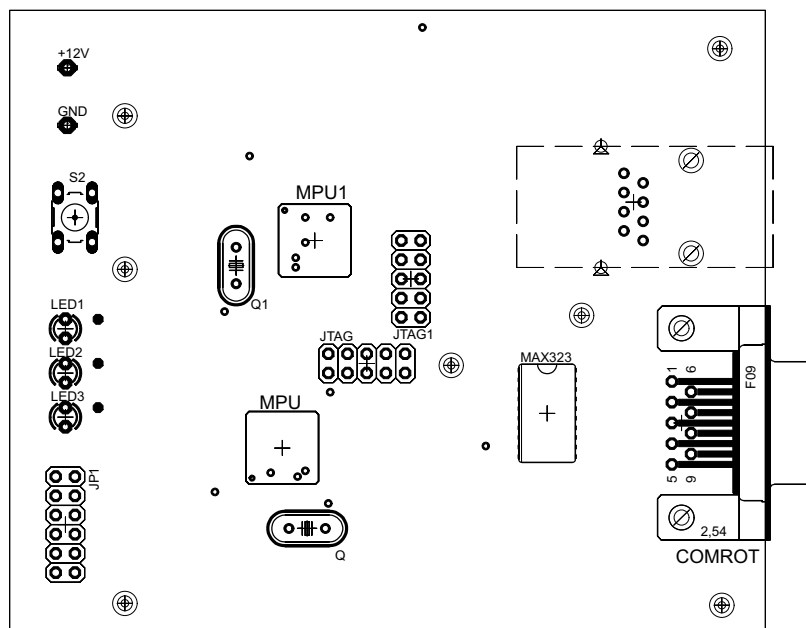


Vrchní strana, měřítko 1:1

4.2 Osazovací plány



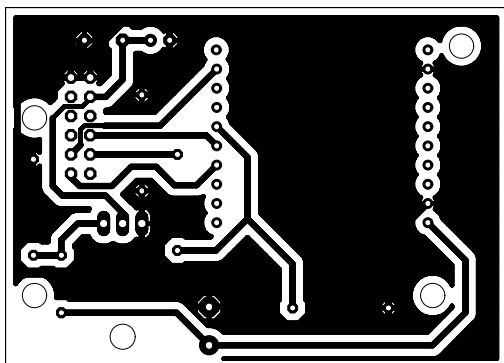
Spodní strana, měřítko 1:1



Vrchní strana, měřítko 1:1

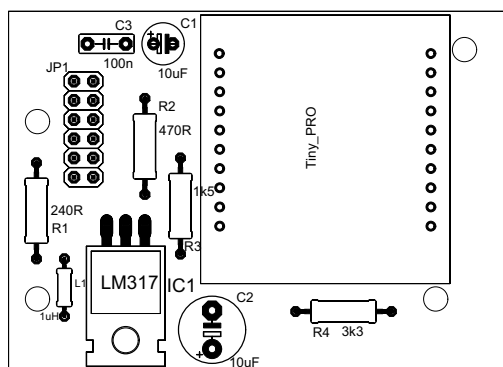
5. Komunikační modul – TinyPro

5.1 Deska plošných spojů



Spodní strana, měřítko 1:1

5.2 Osazovací plán



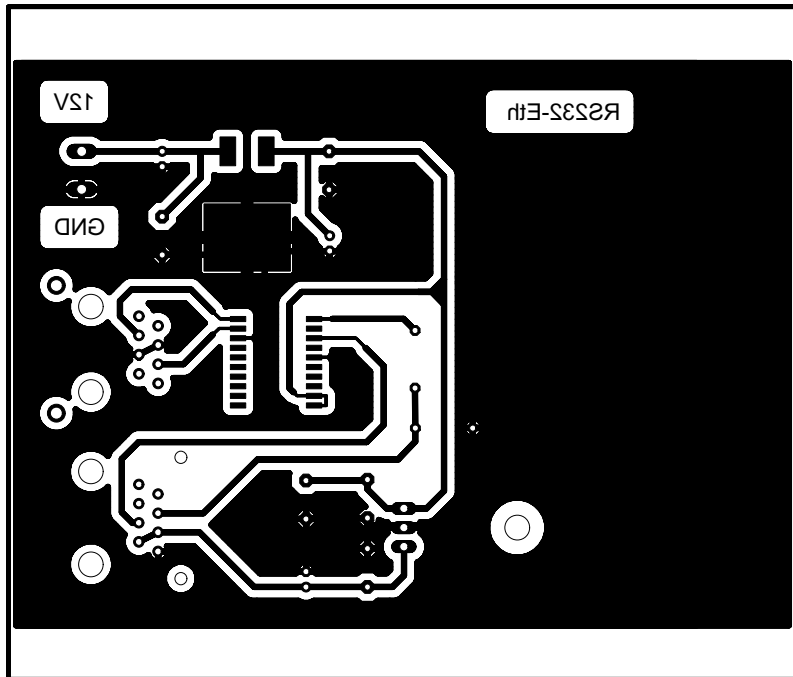
Spodní strana, měřítko 1:1

5.3 Seznam součástek

C1, C3	10uF	elektrolytický kondenzátor, Cpol
C2	100nF	keramický kondenzátor C1206
IC1	LM317	stabilizátor, TO-220
JP1	PINHD-2X6	konektor
L1	1uH	tlumivka
R1	240R	rezistor, R1206
R2	470R	rezistor, R1206
R3	3k3	rezistor, R1206
R4	1k5	rezistor, R1206

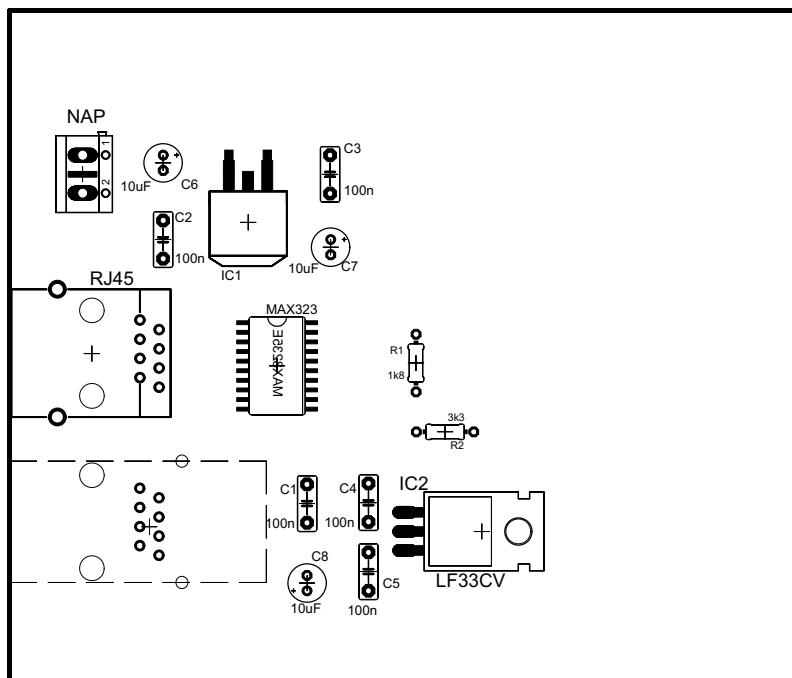
6. Komunikační modul – Ethernet

6.1 Deska plošných spojů



Spodní strana, měřítko 1:1

6.2 Osazovací plán



Spodní strana, měřítko 1:1

7. Seznamy součástek desek plošných spojů

7.1 Řídící modul letadlové části

C1, C4, C7	10uF	CPOL
C2, C3, C5, C6	100nF	ker. C1206
C8	10mF	CPOL
C9, C10, C12, C13	27pF	ker. C1206
CB1 – CB8	100nF	ker. C1206
DOWNLOAD	B3F-31XX	tlačítko
IC1	7805	stabilizátor , D2PACK
IC2	LE33CD	stabilizátor, SO08
IC3	SERIALFLASH	paměť, SO16-1
IC4, 5	MAX488CSA	SO08
JP1	PINHD-2X4	konektor
JP2	PINHD-2X10	konektor
JTAG1, 2	PINHD-2X5	konektor
LED1 - 3	LED3MM	LED 3 mm dioda
MAX323		MAX3235E, SO20L
MPU1		ATMEGA324PTQFP, TQFP44
MPU2		ATMEGA324PTQFP, TQFP44
Q1	HC49U-V	Krystal
Q2	HC49U-V	Krystal
R1	1R	R1206
R2, R7, R9, R11	33k	R1206
R3, R4, R5	1k	R1206
R6, R8, R10	1k8	R1206
R12	4k7	R1206
R13	10k	R1206
RESET	31-XX	tlačítko
UMP2		FTDI modul – DIL28
USB		MINI-USB konektor

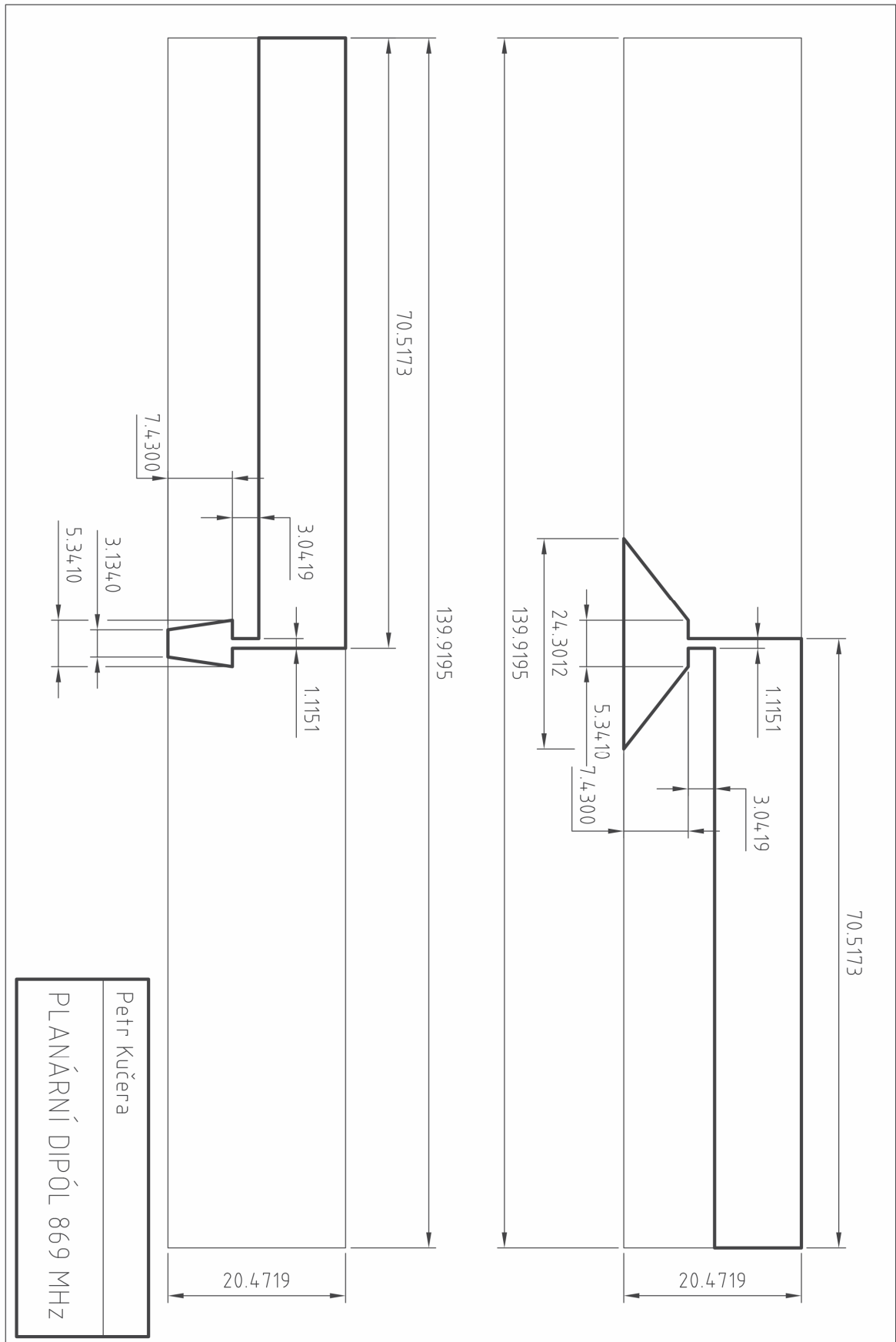
7.2 Řídící modul pozemní části

C1, C4	10uF	CPOL
C7	100nF	CPOL
C3, C5 - 6, C9, C10	100nF	ker. C1206
C2	330nF	ker. C1206
C8	10mF	CPOL
C11 - C14	27pF	ker. C1206
RESET	B3F-31XX	tlačítko
IC1	7805	stabilizátor , D2PACK
IC2	LE33CD	stabilizátor, SO08
JP1	PINHD-2X6	konektor
JTAG1, 2	PINHD-2X5	konektor
LED1 - 3	LED3MM	LED 3 mm dioda
MAX323		MAX3235E, SO20L
MPU1		ATMEGA324PTQFP, TQFP44
MPU2		ATMEGA324PTQFP, TQFP44
XPORT		XPORT
COMROT		konektor Canon 9pin
Q1	HC49U-V	Krystal
Q2	HC49U-V	Krystal
R1, R8	1k8	R1206
R7, R6	3k3	R1206
R3, R4, R5	1k	R1206
R2	33k	R1206

7.3 Komunikační modul - Ethernet

C1 – C6	100nF	keramický kondenzátor C1206
C6, C8	10uF	elektrolytický kondenzátor
IC1	7850	stabilizátor 5V, D2PACK
IC2	LF33CV	stabilizátor 3,3V, TO-220
MAX323		MAX3235E, SO20
NAP	ARK500/2 B	svorkovnice
R1	1k8	rezistor, R1206
R2	3k3	rezistor, R1206
RJ45		RJ45
XPORT		XPORT

8. Výkres planárního dipólu



9. Paměťové médium CD-ROM

Obsah:

DP\	- elektronická verze Diplomové práce
HW\EAGLE	- DPS a schémata
HW\DATASH	- datasheety (MPU, Xport, TinyPro)
SW\EAGLE	- obslužné programy mikroprocesorů