

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Komunikační systém pro bezpilotní letouny založený na
mobilních sítích**

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 24.5.2019

Bc. Vladimír Chuman

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou bezdrátového komunikačního systému pro bezpilotní prostředky. Jsou zde popsány základní požadavky na komunikační moduly a systém z pohledu strany pozemní stanice a strany autonomního prostředku. Následně je zde realizován návrh plně duplexního přenosu mezi operátorem a bezpilotním prostředkem pomocí vhodného modulárního řešení.

V rámci této diplomové práce byl proveden průzkum v technologiích s cílem najít platformu umožňující stavbu takového systému. Jsou zde nastíněny pohledy na technologie používané při stavbě profesionálních hardwarových řešení, ale i nízkonákladové varianty. V praktické části je realizován systém založený na Wi-Fi technologii s podporou 802.11 b/g/n. Jako základ pro tento systém byl použit jednodeskový mikropočítač typu Raspberry Pi, doplněný 3G/4G USB modemem. Pomocí tohoto hardwaru byl pak prakticky realizován systém, který je schopen navázání data linku mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí. V rámci něhož je schopen přenášet online video v HD kvalitě, telemetrické data apod.

Technologie prezentované v této práci by měli poukazovat na možné řešení komunikačních systémů pro bezpilotní prostředky. Takováto řešení pak lze aplikovat nejenom v rámci bezpilotních letounů, ale všech dálkově ovládaných systémů. Zároveň je zde kladen důraz na modularitu a budoucí rozvoj celého systému, jako jsou technologie pro komunikaci s rojem bezpilotních prostředků, prodlužování dosahu pomocí technologie MESH sítí apod.

Klíčová slova

bezpilotní letoun, komunikace, video přenos, WiFi, celulární síť, komunikační systém

Abstract

This thesis is dealing with an issue of the wireless communication system for unmanned vehicles. It describes basic requirements on communication modules, and the system from point of views of a ground station and an autonomous vehicle. Subsequently, it depicts a draft of a full duplex transfer between an operator and an unmanned vehicle using a suitable module solution.

Within this thesis, the technologies have been surveyed to find a platform allowing building such a system. Several views on technologies used while building professional hardware solutions as well as low-cost options have been outlined. In the practical part, the system based on Wi-Fi technology with the 802.11 b/g/n support has been implemented. The single-board computer of the Raspberry Pi series supplemented by 3G/4G USB modem has been used as a basis for this system. Using this hardware that is able to establish a datalink between an unmanned vehicle and a ground station, the system has been practically implemented. Within the system, it is able to transmit online video in HD quality, telemetric data etc.

The technologies presented in this thesis should refer to an optional solution of communication systems for unmanned vehicles. These solutions may be used within unmanned aerial vehicles as well as all remotely controlled systems. The emphasis is placed on modularity and future development of the whole system, such as technologies for communication with a swarm of unmanned vehicles, lengthening the range through the MESH network technology etc.

Key words

unmanned aircraft, communication, video transmission, WiFi, cellular networks, communication system

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	VII
1 ÚVOD	1
1.1 CÍLE PRÁCE	1
2 ANALÝZA TECHNOLOGIÍ PRO REALIZACI BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU DAT	2
2.1 ARCHITEKTURA KOMUNIKAČNÍHO SYSTÉMU	2
2.2 KOMUNIKAČNÍ SYSTÉM PŘES WiFi.....	3
2.2.1 Legislativní omezení v rámci WiFi sítě.....	3
2.2.2 Standardy 802.11 b/g/n/a	4
2.2.3 Fyzické rozhraní	4
2.2.4 Zabezpečení přenosu	5
2.3 KOMUNIKAČNÍ SYSTÉM PŘES MOBILNÍ SÍŤ.....	6
2.3.1 Síť třetí generace 3G/3G+	6
2.3.2 Síť čtvrté generace LTE.....	7
2.3.3 Zabezpečení přenosu v mobilních sítích	7
2.3.4 Pokrytí 3G a LTE signálem na území ČR.....	8
2.4 KOMUNIKAČNÍ SYSTÉM PŘES SATELITNÍ SÍŤ	8
3 PROBLEMATIKA DATA LINKU PRO FPV BEZDRÁTOVÝ PŘENOS VIDEA.....	9
3.1 PŘENOS VIDEA S NÍZKOU LATENCÍ.....	9
3.2 KOMPRESI / KÓDOVÁNÍ.....	9
3.2.1 H.264	10
3.3 PŘENOS A PŘÍJEM	10
3.4 DEKOMPRESI / DEKÓDOVÁNÍ	10
3.5 ZOBRAZENÍ	11
3.5.1 Zobrazení první osoby (FPV)	11
4 OMEZENÍ ŠÍŘENÍ SIGNÁLU V PROSTORU	11
4.1 INTERFERENCE (RUŠENÍ).....	11
4.2 VÍCECESTNÉ ŠÍŘENÍ V DŮSLEDKU ODRAZŮ	12
4.3 ZAMEZENÍ ODRAŽENÝCH SIGNÁLŮ	13
4.3.1 Přímá viditelnost LOS (Line of Sight).....	14
4.4 KONSTRUKTIVNÍ KOMBINACE ODRAŽENÝCH SIGNÁLŮ	14
5 MOŽNÉ SMĚRY BUDOUCÍHO VÝVOJE KOMUNIKAČNÍHO SYSTÉMU.....	14
6 REŠERŠE JEDNODESKOVÝCH POČÍTAČŮ PRO REALIZACI KOMUNIKAČNÍHO	

SYSTÉMU.....	15
6.1 UNIVERZÁLNÍ JEDNODESKOVÉ POČÍTAČE.....	15
6.1.1 <i>Raspberry Pi</i>	15
6.1.2 <i>Orange Pi</i>	16
6.1.3 <i>UP jednodeskové počítače</i>	18
6.1.4 <i>ASUS Tinker Board S</i>	20
6.2 SPECIFICKY ZAMĚŘENÉ JEDNODESKOVÉ POČÍTAČE.....	21
6.2.1 <i>MikroTik RouterBOARD</i>	21
6.2.2 <i>Microhard Dragon-LTE</i>	24
7 HARDWARE PRO STAVBU KOMUNIKAČNÍHO SYSTÉMU.....	25
7.1 ZVOLENÝ HARDWARE PRO BEZPILOTNÍ PROSTŘEDEK.....	26
7.2 ŘEŠENÍ PRO POZEMNÍ STANICI.....	28
8 NASTAVENÍ ZÁKLADNÍHO HARDWARU / SOFTWARE PRO BEZPILOTNÍ PROSTŘEDEK.....	31
8.1 ZPROVOZNĚNÍ PLATFORMY JEDNODESKOVÉHO POČÍTAČE.....	31
8.2 NASTAVENÍ KOMUNIKACE A INSTALACE MODULŮ.....	34
8.2.1 <i>SSH</i>	34
8.2.2 <i>Kamera</i>	36
8.2.3 <i>WiFi adaptér</i>	38
8.2.4 <i>Modem pro mobilní síť</i>	40
8.2.5 <i>Net-ISP-Balance</i>	43
8.2.6 <i>Gstreamer</i>	44
8.2.7 <i>Dataplicity</i>	45
9 NASTAVENÍ ZÁKLADNÍHO HARDWARU A SOFTWARE PRO POZEMNÍ STANICI.....	48
9.1 WINBOX.....	48
9.2 NASTAVENÍ MISSION PLANER.....	50
10 TESTOVÁNÍ KOMPLETNÍHO SYSTÉMU.....	51
10.1 TEST ZPOŽDĚNÍ V RÁMCI POUŽITÝCH BEZDRÁTOVÝCH TECHNOLOGIÍ.....	51
10.1.1 <i>Záznam videa</i>	52
10.1.2 <i>Záznam a přenos prostřednictvím lokální sítě WiFi</i>	52
10.1.3 <i>Záznam a přenos prostřednictvím celulárních sítí</i>	53
10.1.4 <i>Výsledky zpoždění přenosu videa</i>	54
10.2 TEST DOSAHU VIDEO STREAMU.....	55
10.2.1 <i>Dosah video streamu v rámci WiFi</i>	55

10.2.2	Dosah video streamu v rámci celulárních sítí	56
11	ZÁVĚR.....	56
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	59
	SEZNAM TABULEK	61
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	62

Seznam symbolů a zkratek

<i>UAV</i>	(Unmanned Aerial Vehicle) Bepilotní letadlo
<i>ČTU</i>	Český telekomunikační úřad
<i>WLAN</i>	(Wireless LAN) Bezdrátová lokální síť
<i>TCP</i>	(Transmission Control Protocol) Primární přenosový protokol síťové vrstvy
<i>WiFi</i>	(wireless fidelity) standardy popisující bezdrátovou komunikaci
<i>SCM</i>	(Single Carrier Modulation) systém využívající jednu nosnou vlnu
<i>MCM</i>	(Multi Carrier Modulation) systém využívající více nosných vln
<i>OFDM</i>	(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ortogonální multiplex s frekvenčním dělením
<i>DSSS</i>	(Direct Sequence Spread Spectrum), přímé rozprostírání spektra
<i>FHSS</i>	(Frequency Hopping Spread Spectrum), rozprostírání spektra pomocí frekvenčního skákání
<i>e.i.r.p</i>	(equivalent isotropically radiated power), ekvivalentní izotropně vyzářený výkon
<i>WEP</i>	(Wired Equivalent Privacy), soukromí ekvivalentní drátovým sítím
<i>WAP</i>	(Wi-Fi Protected Access), chráněný přístup k Wi-Fi
<i>LTE</i>	(Long Term Evolution)
<i>UMTS</i>	(Universal Mobile Telecommunication System)
<i>HSPA</i>	(High Speed Packet Access)
<i>EDGE</i>	(Enhanced Data for GSM Evolution)
<i>GPRS</i>	(General Packet Radio Service)
<i>USB</i>	(Universal Serial Bus), univerzální sériová sběrnice
<i>WCDMA</i>	(Wideband Code Division Multiple Access), širokopásmový vícenásobný přístup s kódovým dělením
<i>GSM</i>	(Groupe Spécial Mobile) nejrozšířenější standard pro mobilní telefony
<i>LEO</i>	(Low Earth Orbit) Nízká oběžná dráha
<i>GEO</i>	(Geostationary orbit) Geostacionární oběžná dráha
<i>GOP</i>	(Group of Pictures) skupina obrázků
<i>FPV</i>	(First person View) pohled první osoby
<i>BTS</i>	(Base transceiver station) Základnová stanice
<i>LNA</i>	(Low-noise amplifier) Nízko šumový zesilovač
<i>GPS</i>	(Global Positioning System), Globální polohový systém
<i>LOS</i>	(Line-of-sight) přímá viditelnost
<i>CPU</i>	(Central processing unit) Centrální procesorová jednotka
<i>IOT</i>	(Internet of Things) internet věcí
<i>HD</i>	(High definition) vysoké rozlišení

AP(Access point) přístupový bod
GCS.....(Ground Control Station) pozemní řídicí stanice
GNL(General Public License), všeobecná veřejná licence
UDP(User Datagram Protocol) jeden ze sady protokolů internetu
http(Hypertext Transfer Protocol) internetový protokol určený pro komunikaci
s web servery
SSH(Secure Shell) zabezpečený komunikační protokol
APN.....(Access Point Name) poskytovatele mobilní sítě
SIM(subscriber identity module)
SSID(Service Set Identifier) identifikátor bezdrátové sítě
WAN.....(Wide Area Network) rozlehlá síť
WWAN(Wireless wide area network) širokopásmová rozlehlá síť

1 Úvod

Bezpilotní letadlo (UAV) je vzdáleně pilotované nebo samo pilotované letadlo, které může nést kamery, snímače, komunikační zařízení nebo jiný užitečný náklad. Všechny letové operace (včetně vzletu a přistání) jsou prováděny bez přítomnosti pilota na palubě. V posledních letech zažívají bezpilotní prostředky UAV obrovský boom. A to jak v armádě tak i v civilní oblasti. V civilním sektoru se práce s UAV uplatňuje například ve filmovém odvětví, zeměměřičství ale v neposlední řadě i jako hračky pro obyčejné lidi. V důsledku tohoto rozvoje jde i o rozvoj technologií pro stavbu těchto systémů. Tím je možné i za relativně malých vstupních nákladů a s určitou dávkou technické zručnosti vyvinout takovýto systém. Předkládaná práce se snaží popisovat jen jednu z částí celku systémů, jako jsou například drony. Úkolem této práce je dále prozkoumat možné postupy návrhu komunikačního systému pro UAV. V práci, která je rozdělena na čtyři hlavní části, jsou popsány požadavky a technologie využívané při komunikaci mezi operátorem a bezpilotním letounem. Popsány jsou i možné problémy týkající se bezdrátového přenosu video signálu z palubní kamery. Dále se v této práci hovoří o konkrétních hardwarových možnostech pro stavbu takového systému. To je provedeno v podobě rešerše nejvýznamnějších jednodeskových počítačů dostupných na dnešním trhu. Zmíněné jsou také alternativy k těmto počítačům, které nepřinášejí takovou pružnost řešení tohoto problému, na druhou stranu přicházejí s hardwarem, který je již z výroby určen pro takovéto subsystemy. Druhá část práce pak řeší praktickou implementaci schopností do vybraného jednodeskového počítače a také problematiku pozemní řídicí stanice. Výstupem jsou pak reálné testy, provedené na systému popsaném v této práci.

1.1 Cíle práce

Na komunikační systém pro přenos dat mezi pozemní stanicí operátora a bezpilotním letounem jsou kladeny některé požadavky.

- Systém musí pracovat s různými infrastrukturami bezdrátové komunikace. V blízkém okolí schopnost komunikace v rámci lokálně vytvářené pozemní stanicí. Nutná je i schopnost spolupracovat s infrastrukturou celulárních sítí jako záložní

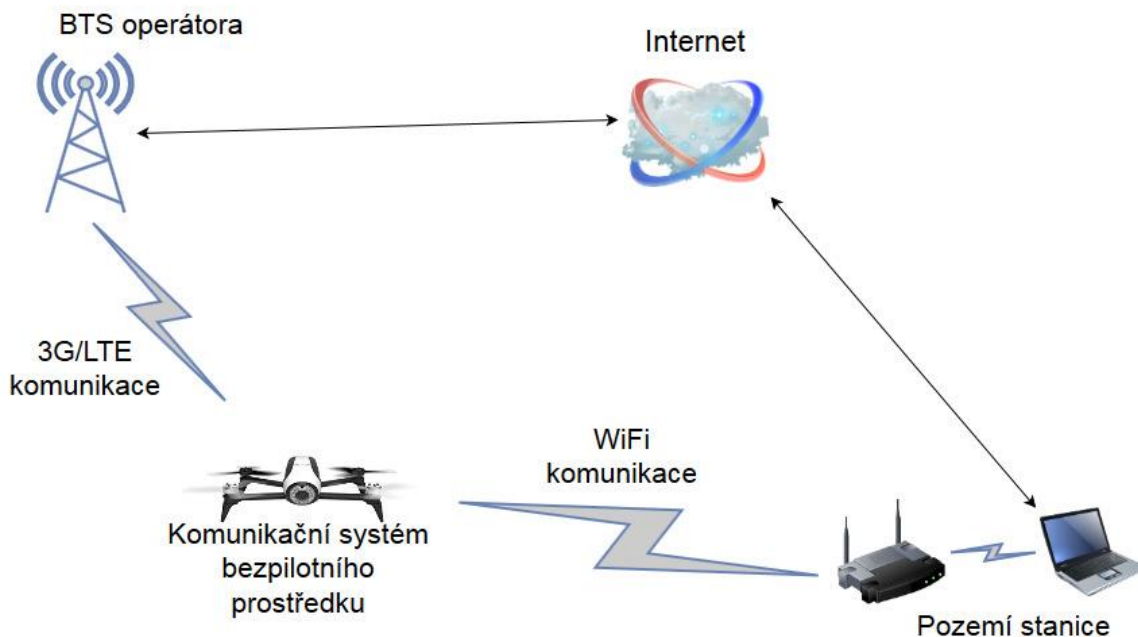
spojení mimo dosah sítě WiFi do které se letoun připojuje autonomně na základě vyhodnocení aktuálních přenosových možností primární sítě. A možnost implementace komunikačního hardwaru pro komunikaci v satelitních sítích.

- Systém musí podporovat přenos video signálu z bezpilotního letounu k operátorovi ve vysokém rozlišení v rámci primárního spojení a s nižším rozlišením v celulárních sítích představující záložní variantu.
- Systém jako celek na rozdíl od systému pro přímé řízení operátorem vyvíjet pro autonomně řízené bezpilotní letouny, u kterých je letový plán nahrán do paměti letounu již před startem a operátor pak pouze dohlíží na let. Popřípadě dráhu letu modifikovat či aktivně zadávat příkazy v průběhu letu.
- Koncipovat systém s co největším důrazem na modularitu, které umožňuje rozšíření o různé komunikační systémy dle potřeby. Myslet i na budoucí rozšíření o funkci spolupráce s rojem bezpilotních letounů s možností například retranslace signálu ke vzdálenějšímu letounu.

2 Analýza technologií pro realizaci bezdrátového přenosu dat

2.1 Architektura komunikačního systému

Představa topologie komunikačního systému bezpilotního prostředku vyvíjeného pro účely této diplomové práce je na obrázku 1. Systém jako primární spojení používá lokální síť WLAN. Tu představuje pozemní stanice vybavena přenosným počítačem a routerem s anténou pro vytvoření Access Pointu. Sekundární spojení představují celulární sítě mobilních komunikačních technologií. Toto spojení bude využíváno mimo dosah lokální sítě případně že systém vyhodnotí lepší podmínky pro komunikaci. Pozemní stanice je proto nutné mít připojenou i do sítě internet.



Obrázek 1 Představa architektury komunikačního systému

2.2 Komunikační systém přes WiFi

Slouží jako hlavní přenosový systém na kratší vzdálenosti, s maximální datovou propustností a nízkou latencí datové komunikace. Pro bezpilotní prostředky existuje celá řada modulů pro komunikaci v těchto pásmech. Nejlepší možností je vybírat moduly s konektory miniPCIe, které oproti USB připojitelným modulům disponují lepší datovou propustností na úrovni sběrnic a jsou schopny pracovat se zvýšeným výstupním výkonem (1 W, 30 dBm), s podporou 802.11 b/g/n, dual chain (dva anténní výstupy pro použití dvou výklopných prutových antén nebo dvou flexibilních antén lepených na konstrukci letounu). Pozemní stanice v této síti je řešena trojicí sektorových antén s integrovanými přístupovými body se zvýšeným výstupním výkonem. Trojice sektorových antén ideálně se 120° šířkou svazku které následně pokryjí oblast v celém 360° okruhu kolem pozemní stanice.

2.2.1 Legislativní omezení v rámci WiFi sítě

Provoz sítí WiFi na území České Republiky je vymezen licencí ČTU VO-R/12/08.2005-34 která upravuje provozování širokopásmových přenosů dat v pásmech ISM. ISM jsou bez licenční celosvětově rozšířená pásma s frekvencemi

900MHz, 2,4 GHz až 2,48 GHz a 5,1 až 5,8 GHz. V pásmech 2,4 GHz je pro českou republiku definováno 13 kanálů se šířkou pásma 22MHz. Co se týče vyzařovaného výkonu, u kmitočtů 2,4 GHz, nesmí překročit 100 mW e.i.r.p. , u kmitočtů v pásmu 5 GHz nesmí být větší než 200 mW s podmínkou použití pouze uvnitř budov. Toto se však vztahuje jen na území České republiky. V rámci jiných států jako jsou například U.S.A je povoleno v pásmech 2,4 GHz používat vysílací výkon až 1000 mW e.i.r.p. To pak dovoluje při výběru hardwaru používat karty s vyšším výstupním výkonem což vede i k rozšíření dosahu.

2.2.2 Standardy 802.11 b/g/n/a

IEEE 802.11 je skupina standardů pro lokální bezdrátové sítě WLAN. Zahrnuje několik druhů modulací pro přenos rádiového signálu. Standardy vyvíjené od roku 1997 se od sebe odlišují jednak písmenem a/b/g/n což specifikuje rok vydání a používané frekvenční pásmo ale také se odlišují v maximálních přenosových rychlostech a použitým fyzickým rozhraním.

Standard	Pásmo [GHz]	Maximální rychlost [Mbit/s]	Fyzická vrstva
IEEE 802.11	2,4	2	DSSS a FHSS
IEEE 802.11a	5	54	OFDM
IEEE 802.11b	2,4	11	DSSS
IEEE 802.11g	2,4	54	OFDM
IEEE 802.11n	2,4 / 5	600	MIMO OFDM

Tabulka 1 Přehled standardů IEEE 802.11

2.2.3 Fyzické rozhraní

Pro bezdrátový přenos dat se využívá modulovaná nosná vysoko frekvenční elektromagnetická vlna. V dnešní době se používají dva typy systémů. Systém SCM (Single Carrier Modulation) neboli systém využívající jednu nosnou vlnu nebo systém MCM (Multi Carrier Modulation) využívající více nosných vln. U systémů MCM se setkáme s využíváním OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplex). U systému s jednou nosnou se setkáme s využíváním DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) neboli přímé rozprostírání spektra a systém FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), což je rozprostírání spektra pomocí frekvenčního skákání.

2.2.3.1 OFDM

Ortogonální multiplex s frekvenčním dělením u systémů SCM přenášená data rozdělují do několika paralelních bitových toků s mnohem menší bitovou rychlostí oproti jedinému. Každému bitovému toku je přidělena nosná vlna o jiné frekvenci. OFDM využívá překrývající se sub kanály, čímž je frekvenční pásmo využito mnohem účinněji. Jednotlivé kanály se vzájemně neovlivňují. To je dosaženo tím, že každá nosná je od sebe vzdálena o celočíselný násobek převrácené hodnoty délky symbolu. Tím je splněna podmínka ortogonality.

2.2.3.2 DSSS

Pro rozprostírání spektra se u této fyzické vrstvy používá tzv. 11 bitová Barkerova sekvence. Pomocí této sekvence se do přenášených dat zavede mnohonásobná redundance která zvyšuje kvalitu rekonstrukce signálu na přijímací straně. Tato technologie má velmi nízkou spektrální výkonovou hustotu signálu. To je docíleno rozložením do širokého frekvenčního pásma. Díky tomu je DSSS imunní vůči úzkopásmovému rušení.

2.2.3.3 FHSS

Tato fyzická vrstva disponuje pásmem o šířce 83,5 MHz děleného do 79 kanálů se šířkou 1 MHz. Zbylé pásmo slouží jako ochrana proti rušení ze sousedních pásem. Signál u FHSS v pseudonáhodném pořadí skáče po těchto kanálech. Každý kanál bývá obsazen z pravidla po dobu 100 ms.

2.2.4 Zabezpečení přenosu

Vzhledem k snadnému odposlechu rádiových přenosů je žádoucí zabezpečit komunikaci proti útokům snažícím se komunikaci napadnout nebo dokonce převzít nad komunikací kontrolu. Proto bylo s příchodem prvních WiFi sítí vyvinuto i zabezpečení pro sítě tohoto typu s názvem WEP (Wired Equivalent Privacy). WEP pracuje na linkové vrstvě, kde přenášené rámce šifruje pomocí proudové šifry RC4. WEP je tedy založen na šifrovacím algoritmu RC4 s tajným klíčem o délce 40 nebo 104 bitů v kombinaci s 24 bitovým inicializačním vektorem. V dnešní době je však

WEP překonaná technologie, proto byl vyvinut nástupce pod označením WPA/WPA2. Při tvorbě této části bylo vycházeno z [1]

2.3 Komunikační systém přes mobilní sítě

Slouží jako sekundární komunikační systém na větší vzdálenosti mimo dosah WiFi spojení. V těchto sítích je nutné počítat s vyšší latencí přenosu v porovnání s primární WIFI sítí. Je nutné brát v potaz lokální dostupnosti generací mobilních sítí souvisejících s možnými poklesy datové propustnosti. Pro běžně používané systémy LTE, UMTS, HSPA, EDGE, GPRS jsou k dispozici USB nebo miniPCIE modemy podporující konektivitu přes všechny uvedené systémy s nastavitelnou prioritou a automatickým přechodem mezi generacemi dle lokální dostupnosti signálu. V rámci lepších vysílacích schopností preferovat modemy s diverzitou (dva anténní konektory, použití dvou výklopných prutových antén nebo dvou flexibilních antén lepených na konstrukci letounu), u LTE systému volit variantu CAT3 a vyšší (pro využitelnost vyšších přenosových rychlostí) a obecně volit moduly s podporou více frekvenčních pásem (univerzálnost z hlediska regionální alokace kmitočtových pásem). U pozemní stanice je nutné zajistit připojení do sítě internet pro příjem dat vysílaných přes celulární sítě. To je možné buď použitím modemů podobných jako na straně bezpilotního letounu nebo jiným způsobem, jako je například ethernetové připojení pomocí kabelu.

2.3.1 Síť třetí generace 3G/3G+

Lze se setkat také s označením UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Oproti sítím starších generací přinášejí několik vylepšení. Hlavní vylepšení představuje možnost uživatele, mít aktivních více služeb, tzn. uživatel může mít aktivní videopřenos a současně lze stahovat data z různých serverů. Tím pádem se třetí generace mobilních sítí stává vhodnou i pro implementaci do bezpilotních prostředků a jejich ovládání prostřednictvím těchto sítí.

Rádiové rozhraní sítí UMTS používá technologii WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) tj. širokopásmová metoda kódově děleného multiplexu. U CDMA uživatelé používají celé pásmo po celou dobu komunikace. K rozeznávání uživatelů v rámci pásma pak slouží unikátní binární kód. Struktura této sítě UMTS je rozdělaná na tři hlavní úrovně. Bráno od nejvyšší

Páteřní síť
Přístupová síť (UTRAN)
Uživatelský terminál

2.3.2 Síť čtvrté generace LTE

LTE (Long Term Evolution) sítě jsou nasazovány celosvětově již několik let jako sítě nabízející přenos dat nebo stahování rychlostí 100 Mb/s na mobilních zařízeních, která se rychle pohybují (případ bezpilotního prostředku) a rychlostí až 1 Gb/s na zařízeních nehybných nebo v pomalém pohybu. Na rozdíl od UMTS, LTE používá ve směru k uživateli přístup OFDMA a ve směru od uživatele přístup SC-FDMA (Single Carrier OFDMA) namísto WCDMA. Architektura sítě LTE je odvozena z architektury sítí starší generace. Na rozdíl od předchozích architektur je LTE navržena způsobem, který umožňuje pouze přepojování paketů. Přepojování okruhů již není podporováno.

2.3.3 Zabezpečení přenosu v mobilních sítích

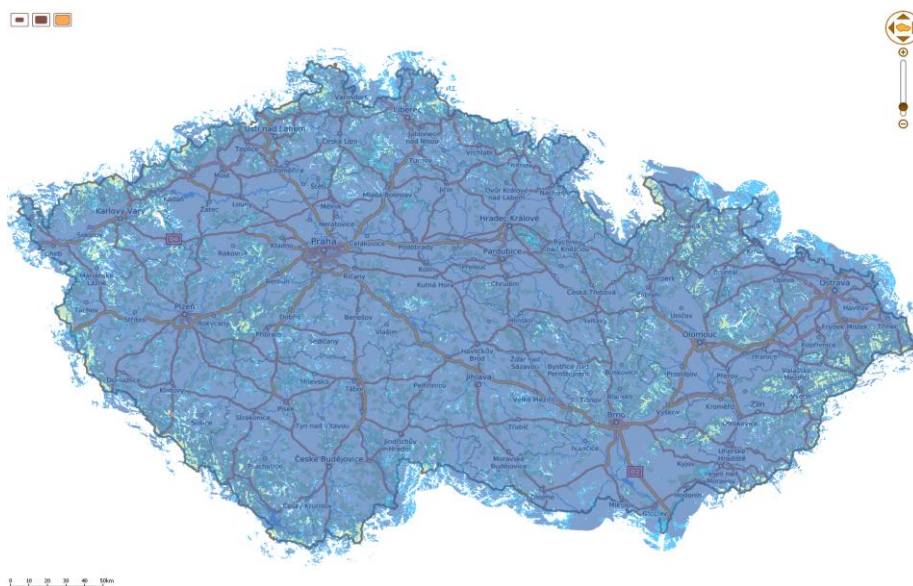
Bezpečnost mobilních sítí hraje velkou roli. První generace GSM disponuje zabezpečením dat proti zneužití pouze v rádiovém prostředí. V ostatních částech komunikačního řetězce je přenos hovoru (dat) nešifrovaný. Ke komunikaci v sítích mobilních operátorů potřebujeme především tzv. SIM (Subscriber Identity Module) kartu, která obsahuje identifikátor účastníka IMSI (International Mobile Subscriber Identity) sloužící k identifikaci uživatele. S nástupem vyšších generací přibývají i vylepšení v zabezpečení.

V rámci systému UMTS oproti systému GSM je změn hned několik, především v rádiové části systému. Systém UMTS využívá techniku rozprostřeného spektra pro kanály o šířce 5 MHz. Tato technika byla vyvíjena pro armádu, jelikož umožňuje skrýt vysílaný rádiový signál v okolním šumu. Vstupní datový tok se sčítá s pseudonáhodnou sekvencí pomocí sčítačky modulo 2. Za podmínky, že pseudonáhodná posloupnost je mnohonásobně rychlejší než vstupní signál, dojde ve spektru k rozložení spektrální energie přes větší šířku pásma. Přijímací strana musí pro detekování použít stejnou pseudonáhodnou sekvenci. Pokud tedy přijímací strana nezná správnou rozprostírací sekvenci, detekuje pouze šum na vstupu přijímače.

System LTE využívá odlišnou infrastrukturu a jiné řídicí bloky než předchozí systém UMTS, ale stále se řadí do systémů 3. generace. Změny ohledně zabezpečení jsou pouze v generování klíčů pro autentizaci.[3]

2.3.4 Pokrytí 3G a LTE signálem na území ČR

Pro provozování komunikace bezpilotních prostředků v mobilních sítích je vhodné znát pokrytí území tímto signálem. Na stránkách Českého telekomunikačního úřadu jsou v pravidelném měsíčním intervalu zveřejňována pokrytí území a obyvatel širokopásmovými mobilními LTE a UMTS sítěmi v pásmech 800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz a 2600 MHz. UMTS v pásmu 2100 MHz.



Obrázek 2 Mapa pokrytí České Republiky 3G/4G mobilním signálem

2.4 Komunikační systém přes satelitní síť

Toto spojení je uvažováno jako nouzový záložní systém přenosu omezené telemetrie při nedostupnosti signálu jak primární WiFi, tak i mobilních sítí. K dispozici pro toto spojení je možno využívat síť Iridium (LEO dráhy), Globalstar (LEO dráhy), Inmarsat (GEO dráhy), Orbcomm (LEO dráhy). Na trhu je ovšem relativně velmi omezená dostupnost malých modemů. Satelitní spojení podporuje jednosměrnou komunikaci pomocí krátkých datových paketů, obousměrnou komunikaci pomocí krátkých datových paketů (v obojím případě může být latence i v řádu sekund v závislosti na délce paketů) nebo obousměrné komunikace s vytáčeným spojením (přenosové rychlosti cca do 2400 bps). Vzhledem k

dostupnosti a velikosti modemů připadají v úvahu patrně služby SBD (obousměrný short burst data) nebo RUDICS (obousměrné vytáčené připojení s TCP/IP konektivitou) v síti Iridium.

3 Problematika data linku pro FPV bezdrátový přenos videa

Zásadní funkce, která umožňuje používat bezpilotní prostředek bez použití přímého vizuálního kontaktu je přenos videa z palubní kamery do pozemní stanice operátora v reálném čase. Důležité požadavky a problematika s tímto související pro komunikační systém v bezpilotních prostředcích jsou uvedeny níže.

3.1 Přenos videa s nízkou latencí

Pro kontrolu a řízení bezpilotního letounu v reálném čase prostřednictvím video signálu z palubní kamery je důležité, aby video nebylo postiženo příliš velkým zpožděním. Video prochází systémem k operátorovi pozemní stanice několika kroky. Proto je dispozici několik způsobů, jakými může vývojář ovlivnit latenci v přenosovém systému a snížit tak riziko případné havárie.

3.2 Komprese / kódování

Kompresse se používají ke snížení datové rychlosti potřebné pro přenos rámců video signálu, které by bez této úpravy bylo velmi náročné přenášet rádiovým spektrem.

Pokud vezme pro příklad výpočtu potřebné přenosové rychlosti nastavení video přenosu v rámci lokální sítě tj. počet obrazových bodů 1080x720 při 30 fps a při definování barevné informace jednoho obrazového bodu 3 bajty, pak součinem těchto čísel dostáváme přenosovou rychlost potřebnou pro video signál

$$v_p = 1080 * 720 * 30 * 3 = 70 \text{ Mb/s.}$$

Běžné počítačové sítě dnešní doby pracují s cca šestkrát menší přenosovou rychlostí tj. cca 12 Mb/s. Proto je nutné provádět redukci přenášených dat před samotným vysíláním. O tom jak moc byla data komprimována oproti originálu pojednává kompresní poměr. Kde platí, že s rostoucím kompresním poměrem klesá kvalita obrazu. V systému stavěném na základě této práce se používá standard komprese H.264. Ten představuje hojně používanou techniku pro nahrávání i

kompresi a přenos digitálního videa v multimediálních systémech s kompresním poměrem cca 1:320. Komprese bývá obecně náročná na výpočet. Čas potřebný pro kódování závisí na volbě kódovacího algoritmu a použitých funkcích.

Rozlišení	MJPEG	MPEG-4	H.264
640x480	7.78Mb/s	1.58Mb/s	0.57Mb/s
1280x1024	32.77Mb/s	6.76Mb/s	2.46Mb/s
1080x720	51.8Mb/s	10.65Mb/s	3.89Mb/s

Tabulka 2 Porovnání přenosových rychlostí různých kompresních metod

3.2.1 H.264

Video se skládá ze snímků, počet odpovídá snímkovací frekvenci (fps). Kodér pak jednotlivé snímky dělí do skupin zvaných GOP (Group of Picture). Základní prvek je Intra Frame, označovaný jako I-snímek. Ten je zakódován do formátu JPEG. Ten je následně rozdělen do tzv. makrobloků o velikosti 16x16 pixelů. Dále se zpracovává v barevném prostoru YcrCb, kde se zmenší informace o barvách na úkor jasu. Toto vychází ze znalostí lidského oka. Člověk je mnohem více citlivější na změny jasu než na změny samotných barev. Zde nastává otázka kompromisu mezi kvalitou obrazu a datovým tokem video přenosu.[2]

3.3 Přenos a příjem

Systém komunikuje s pozemní stanicí pomocí bezdrátových sítí. V našem případě hovoříme o připojení, komunikaci v rámci WiFi a sítích pro mobilní komunikace. Výsledné zpoždění přenosu závisí na dostupném datovém pásmu a typu spojení. Lze očekávat jiné zpoždění při komunikaci na lokální síti WiFi oproti komunikaci skrze veřejnou telefonní síť, která vnáší do systému další dílčí zpoždění. Je třeba brát v úvahu, že pozemní stanice je také ať už drátově či bezdrátově připojena k síti. To do systému vnáší další dílčí zpoždění, podobné přenosu.

3.4 Dekompresi / dekodování

Kódovaný video přenos musí být korektně dekodován na přijímací stanici. Stejně jako kódování je také i tento proces dekodování výpočetně náročný. Tím dochází k zavedení dekodovacího zpoždění do systému.

3.5 Zobrazení

Stejně jako při záznamu videa bude v závislosti na obnovovací frekvenci displeje zobrazeno zpoždění zobrazení. Na každou část systému tedy působí dílčí zpoždění. Celkové zpoždění počínaje zachytáváním snímků na palubní kameru, až po jeho zobrazení pozemní stanicí, je součtem dílčích zpoždění popsaných výše.[4]

3.5.1 Zobrazení první osoby (FPV)

Operátor využívá palubní videokameru, která z bezpilotního systému poskytuje zobrazení v reálném čase. FPV (First Person View) provoz je populární u rekreačních uživatelů. Tento typ zobrazení je také používán ke shromažďování snímaných obrazových dat během letu.

4 Omezení šíření signálu v prostoru

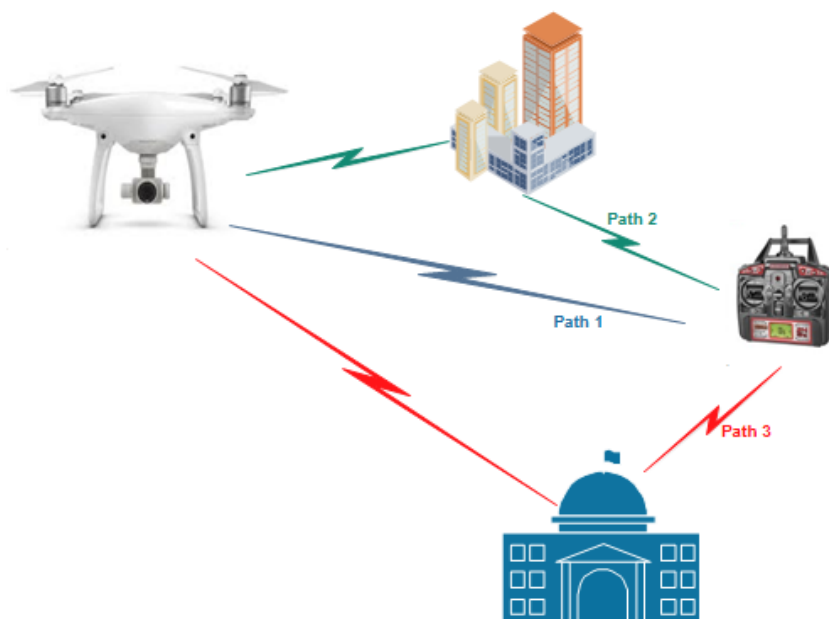
4.1 Interference (Rušení)

Při provozu bezpilotních prostředků např. v obydlené oblasti lze očekávat výskyt sekundárních zdrojů rádiového vysílání. Tyto - z našeho pohledu nežádoucí – vysílače, resp. jejich signál může interferovat se signálem našeho systému. Pokud se interferenční signály vyskytnou ve stejném frekvenčním pásmu jako přenos našeho bezdrátového spojení, budou tyto signály fungovat jako šum v přenosovém pásmu. Tím se snižuje poměr signálu vůči šumu, což může mít za následek pokles přenosové rychlosti a s tím spojené výpadky v přenosu. Další negativní vliv je snižující se dosah spojení. Typickým zdrojem rušení může být například jiný dron v oblasti, WiFi přístupový bod nebo BTS mobilního telefonu. Problém lze minimalizovat vhodnou volbou přenosového kanálu. Kanály lze před startem skenovat a tím zjistit, který je co nejvíce frekvenčně vzdálený od zdroje rušení. Další možností je přemístění pozemní stanice. Pokud je zdroj rušení silný, ale mimo pásmo bezdrátové komunikace, nazývá se tento signál blokátor. Blokující signál může proniknout nekvalitním front-end filtrem kanálů a to má za následek snížení dynamiky nízko šumového zesilovače (Low Noise Amplifier - LNA). Typickými blokátory o vysokém výkonu mohou být radary, základnové stanice (BTS) nebo vojenské radiostanice. Technická opatření proti blokujícímu signálu

mohou být zajištěny dobrou filtrací front-end kanálu přijímače a použitím směrových antén s danou direktivou pro minimalizaci rušení od zdrojů z jiných směrů. Směrové antény s úzkou vyzařovací, resp. přijímací charakteristikou a vysokým směrovým ziskem také zvýší sílu a kvalitu přijímaného signálu z bezpilotního prostředku. V různých případech lze anténu vybavit rotátorem, který v kombinaci s informacemi o poloze, např. z dat systému GPS automaticky upravuje natočení antény vzhledem k poloze pohyblivého bezpilotního prostředku. V některých případech však anténa vybavená rotátorem může působit problémy, a to například v případě, kdy pracujeme s rojem bezpilotních letounů, kdy nelze sledovat více cílů zároveň.

4.2 Vícecestné šíření v důsledku odrazů

Rádiové spojení se silným signálem bez šumu může mít náhle výpadky, zejména v zastavěném čili městském prostředí. To může být způsobeno odraženým signálem od překážky v prostoru šíření. Tyto odražené repliky mohou rušit signál přímého směru. K rušení dochází součtem fázových posunů přímé a odražené cesty. Kromě rušení signálu má vícecestné šíření za následek také šíření tzv. symbolového zpoždění. Symboly z různých cest přicházejí v různé době. Pokud je zpoždění významné, může docházet i k bitovým chybám. Obrázek 3 znázorňuje princip vícecestného šíření a zpoždění. Existují dva hlavní principy, které se zabývají eliminací vícecestného šíření, a kterými jsou zamezení nebo konstruktivní kombinace odražených signálů.



Obrázek 3 Vícecestné šíření signálů [6]

4.3 Zamezení odražených signálů

Nejjednodušším způsobem, jak eliminovat odražené signály, je mít směrové antény směřované dle přímé vizuální viditelnosti (LOS) na bezpilotní prostředek. Jak bylo vysvětleno výše, lze to provést pomocí směrových anténních systémů. Odražené signály se šíří v úhlu mimo maximum hlavního laloku přijímací antény. Tím pádem nebudou signály zesíleny natolik, aby ovlivňovaly příjem z hlavního směru. Dalším méně intuitivním, ale přesto jednoduchým způsobem je použití antény s určitou polarizací. Přijímající anténa s odpovídající polarizací zesílí tento signál, zároveň potlačí nepolarizované signály resp. signály s jiným druhem polarizace. Odražené signály jsou v tomto případě vyloučeny, to je způsobeno narušením polarizace v důsledku odrazu. Důležitým faktorem, který je třeba zvážit, je umístění antén na bezpilotním prostředku. Ty by měli být umístěny tak, aby rozdíl fázových úhlů vysílací a přijímací antény nebyl příliš velký. V praxi tedy kombinací antén s různými úhly polarizace vyzařování lze dosáhnout robustnějšího spojení. Tento způsob eliminace odrazů má ale jednu velkou nevýhodu, a to je závislost pohybu bezpilotního prostředku vůči hlavnímu směru přijímací antény, který se mění v každém okamžiku. Ale i samotné technologie sítí 802.11, tak i mobilní síť umí pracovat s mnohocestným šířením a interferencí. Používáním OFDM principů pro snížení symbolových interferencí, FHSS pro snížení rušení od zdroje se stabilním

kmitočtem nebo DSSS s možností rake přijímače, který je schopen efektivně přijímat a kombinovat jednotlivé komponenty signálu vícecestného šíření.

4.3.1 Přímá viditelnost LOS (Line of Sight)

Operátor pozemní stanice je vždy schopen vidět bezpilotní prostředek bez vizuálních pomůcek (jako dalekohled, atd.). Bepilotní prostředek by měl mít vždy neomezený výhled na operátora, v oblasti kde se vyskytuje. Některé země dodatečně omezují reálné vzdálenosti při provozu bezpilotních prostředků s LOS.

4.4 Konstruktivní kombinace odražených signálů

Konstruktivní kombinací odražených signálů lze eliminovat nejen problém s vícecestným šířením, ale také dosahovat dostatečně silného signálu v případě, že dojde k zániku přímé viditelnosti z důvodu výskytu překážky v prostoru pohybu. Obvykle používaný mechanismus konstruktivní kombinace signálů z více cest se nazývá diverzitní příjem. Diverzitní příjem může být použit jak na vysílací, tak na přijímací straně tak, že jsou připojeny dvě nebo celá skupina diverzizních antén. Když jsou antény rozmístěny o vzdálenost násobků vlnové délky, pravděpodobnost silného rušení signálu se výrazně snižuje. Signály z antén mohou být pasivně sčítány před vstupem do přijímače nebo přijímač může aktivně přepínat na anténu s nejsilnějším signálem. Rádio může také disponovat duplicitními přijímacími řetězci se součte signálů v základním pásmu.

5 Možné směry budoucího vývoje komunikačního systému

Použité technologie umožňují v budoucnu i pokročilá síťová nastavení pro zajištění komunikace s rojem bezpilotních prostředků, kdy jednotlivé letouny mohou zajišťovat specifické funkce v závislosti na osazení komunikačními moduly. Vše ovšem vyžaduje samostatný vývoj.

- WiFi range extender – letoun se zdvojenými WiFi adaptéry může zastávat roli opakovače signálu pozemní stanice (range extender), setrvat na hranici bezpečného dosahu pozemní stanice a zprostředkovat WiFi komunikaci s letouny mimo dosah WiFi pozemní stanice.

- MESH síť ve WiFi pásmu – jednotlivé letouny mohou zastávat roli převaděče signálu, čímž není následně nutné, aby všechny letouny byly v dosahu WiFi pozemní stanice, respektive ve spojení s přímou viditelností LOS. Komunikace je zprostředkována přes ostatní letouny, plní úlohu modu MESH sítě.
- Gateway do mobilní sítě – letoun s konektivitou do mobilní sítě může vytvořit bránu do této sítě, zprostředkovanou přes vlastní WiFi síť ostatním letounům mimo dosah mobilní sítě a mimo dosah WiFi sítě pozemní stanice.

6 Rešerše jednodeskových počítačů pro realizaci komunikačního systému

6.1 Univerzální jednodeskové počítače

Jedná se o kompletní počítače postavené na jedné desce s CPU, pamětí a I/O vstupními a výstupními obvody, obvody pro komunikaci. Byly vyvinuty pro širokou škálu použití od vzdělávacích až po profesionální aplikace. Výhodou je dobrá pružnost rozměrů a přizpůsobení velikosti bezpilotního prostředku. Další výhodou jsou zpravidla průběžné inovace (procesory, paměti) při zachování designové kompatibility.

6.1.1 Raspberry Pi

Rodina jednodeskových počítačů, která si našla velkou oblibu ve výuce, ale tak i v řadách široké veřejnosti při realizacích jednoduchých ale i složitějších aplikací. Raspberry bylo vyvinuto ve Velké Británii pro podporu výuky programování na školách. Systém je založen na Linux OS. Samotná platforma neobsahuje periferie (př. Display, klávesnici, apod.). Existuje však velké množství modulů kterými je možno platformu rozšiřovat. To zní činí velmi efektivní a pružný nástroj pro širokou škálu použití. Rodina Raspberry se dělí na tři hlavní řady jednodeskových počítačů, tj. Model A, Model B a poslední řada Pi Zero.

- Raspberry Pi 3 Model B/B+

Deska je vybavena 64bitovým čtyř jádrovým procesorem o taktu 1,2GHz u verze B. U verze B+ je taktovací kmitočet procesoru 1,4GHz. Dále je deska vybavena gigabitovým ethernetovým rozhraním (s omezenou přenosovou rychlostí na 300 Mbit/s). Další možnost propojení představuje dvoupásmová onboard WiFi 802.11b/g/n/a 2,4/5 GHz (s přenosovou rychlostí 100 Mbit/s). Tato rychlost je plně dostačující pro přenos HD obrazu nebo

komunikaci v roji letounů. Dalším důležitým vybavením jsou konektory, USB a Ethernet. Díky ethernet konektoru RJ45 lze diagnostikovat systém nebo ho celý řídit. USB konektory umožňují připojení WiFi a 3G/LTE klíčenky pro přístup do těchto sítí. Počítač nedisponuje externím anténním konektorem.



Obrázek 4 Jednodeskový počítač Raspberry Pi 3B+

Procesor (CPU)	1.4 GHz 64-bit quad-core ARM Cortex-A53
Paměť (SDRAM)	1 GB (sdílená s GPU)
Video vstup	MIPI konektor kamerového rozhraní (CSI)
Video výstup	HDMI rozlišení od 640×350 do 1920×1200 plus různé PAL a NTSC standardy, kompozitní video (PAL a NTSC) via 3,5 mm TRRS jack sdílený s výstupem zvuku, MIPI konektor rozhraní displeje (DSI)
Spotřeba	300 mA (1,5 W) klidový režim 1,34 A (6,7 W) při maximální zátěži (WiFi, display, ..)
Konektivita	2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac WLAN, Bluetooth 4.2, Gigabit Ethernet RJ45, 4*USB 2.0 porty
Rozměry	85,6 mm x 56,5 mm
Hmotnost	45 g

Tabulka 3 Technické Parametry Raspberry Pi 3B+

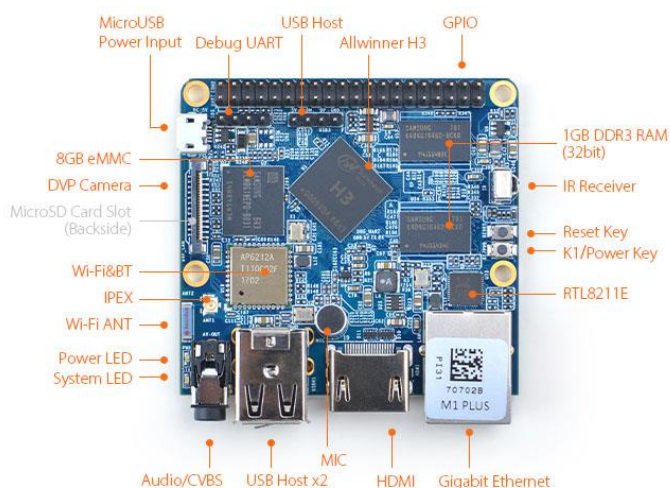
6.1.2 Orange Pi

Další varianta jednodeskových počítačů. Rodina Orange PI za kterou stojí čínská společnost Shenzhen Xunlong Software CO.,Limited. Dnes se lze setkat s několika variantami, které se liší především svým výkonem, možnostmi použití a rozměry. Základ architektury všech typů jsou procesor ARM Cortex-A7 a rychlé paměti RAM typu DDR3. Počítače podporují WiFi standardy 802.11 b/g/n a vyšší verze disponují i gigabitovým ethernetovým konektorem RJ45. Výhodou je přítomnost standardního DC konektoru na

napájení oproti mikroUSB, které k napájení využívají jiní výrobci.

6.1.2.1 Nano Pi M1 Plus

První zástupce rodiny Orange PI je typ M1 Plus. Platforma vhodná jak pro fanoušky, tak i pro profesionály. Nabízí o třetinu menší rozměr oproti RPi 3B. Systém je schopen pracovat s OS u-boot, Debian, Ubuntu-Core, eflasher, Android. Tak jako u RPi lze Nano Pi M1 Plus vybavit širokým spektrem modulů pro rozšíření (tj. kamera, senzory, apod.). Samotná základní deska obsahuje také IPX konektor pro připojení externí antény která zlepší komunikační dosah vestavěné WiFi.



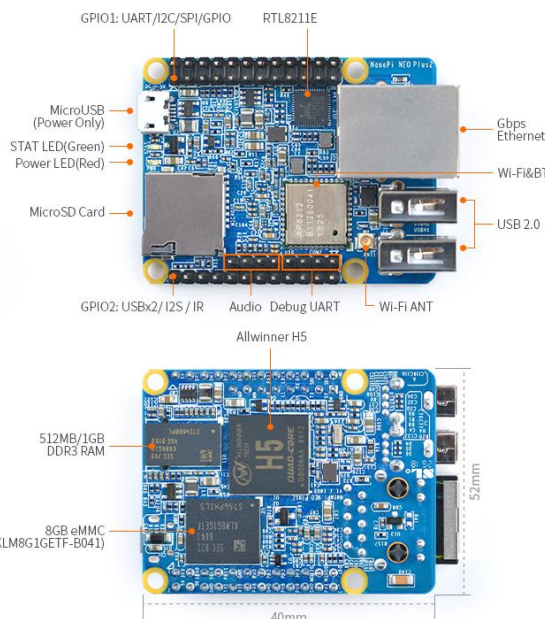
Obrázek 5 Jednodeskový počítač Nano Pi M1 Plus [7]

Procesor (CPU)	Allwinner H3, Quad-core Cortex-A7@1.2GHz
Paměť (SDRAM)	1 GB DDR3
Video vstup	DVP Kamera Interface: 24pin, 0.5mm pitch FPC seat
Video výstup	HDMI Type-A*1: v1.4, 4K@30fps
Spotřeba	2 A (10 W) maximální zátěž
Konektivita	2x USB 2.0, Ethernet RJ45 1000M/100M/10M, vestavěná WiFi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.0, HDMI
Rozměry	64 mm x 60 mm x 15 mm

Tabulka 4 Technické Parametry Nano Pi M1 Plus

6.1.2.2 Nano Pi Neo 2 Plus

Další zástupce rodiny Nano Pi. Deska je opět založená na procesoru Allwinner ARM. Deska i přes velmi malé rozměry disponuje bohatými schopnostmi. Nalezneme zde vestavěnou WiFi, gigabitový ethernet konektor RJ45, USB a Bluetooth modul. Díky novému designu napájecího systému má deska zlepšený odvod tepla oproti nižším řadám Nano PI NEO. Je však doporučeno používat chladič. NOE 2Plus splňuje požadavky jak pro IOT aplikace, ale také pro velkokapacitní přenosy dat. Toho by se díky malým rozměrům dalo využít jako základ na straně bezpilotního prostředku.



Obrázek 6 Jednodeskový počítač Nano Pi Neo 2 Plus [8]

Procesor (CPU)	Allwinner H5, Quad-core 64-bit high-performance Cortex A53
Paměť (SDRAM)	1 GB DDR3
Video vstup	DVP Camera: 0.5mm pitch 24 pin FPC seat
Video výstup	HDMI Type-A*1: v1.4, 4K@30fps
Spotřeba	2 A (10 W) maximální zátěž
Konektivita	2*USB 2.0, Ethernet RJ45 1000M/100M/10M, vestavěná WiFi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.0, HDMI
Rozměry	40 mm x 52 mm

Tabulka 5 Technické Parametry Nano Pi Neo 2 Plus

6.1.3 UP jednodeskové počítače

Jednodeskové počítače řady Up od společnosti AAEON se vyznačují vysokým výkonem procesorů od firmy Intel. Flexibilní vývojové desky jsou schopny uspokojit i profesionální

aplikace, které vyžadují velkou výpočetní sílu. CPU je podporován širokou škálou OS. Počínaje Android 6.Marshmallow, Microsoft Windows 10 a v neposlední řadě umožňujeme programování pomocí OS Linux.

6.1.3.1 UP Core + High Speed Carrier Board

UP Core je nejmenší z produkce společnosti UP. Miniaturní jednodeskový počítač s vysokým výkonem a funkcí nízké spotřeby dosahuje za pomoci využívání technologií společnosti Intel. Samotný počítač neobsahuje na své desce všechny potřebné schopnosti. Pro problematiku této práce ho lze dovybavit rozšiřující deskou (carrier board), která je navržena tak, aby byla kompatibilní s UP core, a doplňuje chybějící schopnosti jako například ethernetový konektor RJ45. Další výhodou je že tato konfigurace obsahuje i sloty pro mikro SIM ale i mPCIe konektor.



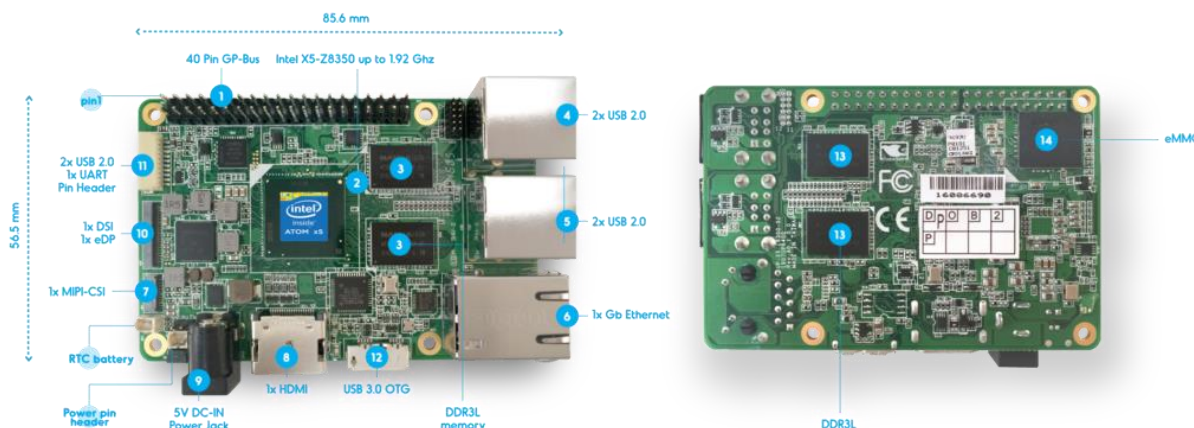
Obrázek 7 Jednodeskový počítač UP Core [9]

Procesor (CPU)	Intel® Atom™ x5-Z8350 (2M Cache, up to 1.84 GHz)
Paměť (SDRAM)	2GB / 4GB DDR3L
Video vstup	1x MIPI-CSI 2 lane 1x MIPI-CSI 4 lane
Spotřeba	4 A (20 W) maximální zátěž
Konektivita	2*USB 2.0, USB 3.0, Ethernet RJ45 1000M/100M/10M, vestavěná WiFi 802.11 b/g/n, HDMI, Bluetooth
Rozměry	56,5 mm x 66 mm
Hmotnost	80 g

Tabulka 6 Technické Parametry Up Core

6.1.3.2 Up Board

Tato řada má oproti předešlé desce Up Core výhodu v tom, že nepotřebuje tzv. Carrier Board. To z ní dělá ideální platformu pro aplikace jako jsou robotika, bezpilotní prostředky, smart domácnost a další. Nevýhoda této desky je, že neobsahuje vestavěnou WiFi, dodatečně jí však lze jako modul dokoupit.



Obrázek 8 Jednodeskový počítač Up Board [10]

Procesor (CPU)	Intel® Atom™ x5-Z8350 (2M Cache, up to 1.92 GHz)
Paměť (SDRAM)	2GB / 4GB DDR3L
Video vstup	CSI (4 Mega pixel)
Video výstup	?
Spotřeba	3 A (15 W) maximální zátěž
Konektivita	2*USB 2.0, USB 3.0, Ethernet RJ45 1000M,HDMI, Bluetooth
Rozměry	85.6 mm x 56.5 mm
Hmotnost	80 g

Tabulka 7 Technické Parametry Up Board

6.1.4 ASUS Tinker Board S

Jednodeskový počítač z dílny firmy ASUS. Výpočetní výkon zajišťuje čtyř jádrový procesor ARM založený na čip setu Rockchip RK3288. Díky přípojkám HD Mini lze připojit jak HD display tak i HD kameru. Konektivitu dále rozšiřuje stíněný regulátor WiFi a Bluetooth, což zajišťuje snížení rušení a lepší rádiový výkon. Deska je osazena konektorem IPEX pro externí antény rozšiřující například dosah vestavěné WiFi .



Obrázek 9 Jednodeskový počítač ASUS Tinker Board S [11]

Procesor (CPU)	Quad core 1.8 GHz ARM Cortex-A17
Paměť (SDRAM)	2GB Dvoukanálová DDR3
Video vstup	MIPI-CSI kamera
Video výstup	HDMI 1.4 , MIPI-DSI
Spotřeba	3 A (15 W) maximální zátěž
Konektivita	4*USB 2.0, Ethernet RJ45 1000M,HDMI, 802.11 b/g/n, Bluetooth V4.0, IPEX
Rozměry	85.5 mm x 54 mm
Hmotnost	55 g

Tabulka 8 Technické Parametry ASUS Tinker Board S

6.2 Specificky zaměřené jednodeskové počítače

V kapitole alternativní řešení bylo popsáno několik možností, které dnešní trh nabízí pro použití při stavbě komunikačních systému pro bezpilotní prostředky. Na rozdíl od jednodeskových počítačů, které nabízejí velmi pružné použití takřka v jakékoliv oblasti, jsou alternativy více zaměřené do určité oblasti použití. To upřednostňuje tento hardware spíše pro použití v profesionálním odvětví.

6.2.1 MikroTik RouterBOARD

Firma MikroTik produkuje univerzální platformy v podobě malých základních desek pro vývoj sofistikovaných síťových řešení (AP, Client, WDS, síťové Bridge). Samotné základní desky neboli Routerboardy obsahují procesor, integrovanou RAM paměť a dle typu integrovanou síťovou kartu, USB porty, miniPCI-E sloty. Dále lze Routerboardy rozšířit celou řadou rozšiřitelných prvků jako např. karty pro přístup do celulárních sítí, WiFi sítí na frekvenci 2,4 a 5 GHz s různými výstupními výkony, citlivostmi. K deskám firmy MikroTik je dodáván i RouterOS, který je založen na Linuxu.

MIKROTIK Sada RB912UAG-2HPnD a LTE modemu Huawei ME909u-521

Tato sada vhodná pro stavbu bezdrátového routeru se sekundární možností spojení přes celulární síť pomocí zásuvné karty od společnosti Huawei, který se připojuje pomocí rozhraní miniPCIe. Deska je vybavena WiFi kartou pracující v pásmu 5GHz 802.11b/g/n s výstupem na konektory MMCX pro externí anténu a výstupním výkonem až 1000 mW. Výhoda této sady je kompletní balení komponent pro stavbu bezdrátového spojení jak přes WiFi tak přes celulární stě.



Obrázek 10 MIKROTIK RB912UAG-2HPnD [12]

Procesor (CPU)	Atheros AR9342 600 MHz
Paměť (RAM)	64 MB DDR2
Spotřeba	14 W maximální zátěž
Konektivita	Ethernet RJ45 10/100/1000 M, WiFi 802.11 b/g/n, IPEX
Rozměry	105 mm x 105 mm
Hmotnost	67 g

Tabulka 9 Technické Parametry MIKROTIK RB912UAG-2HPnD

6.2.1.1 Zásuvné karty

- LTE modem Huawei ME909u-521 do mPCI Express

Tento LTE modem připojující se k základní desce pomocí mPCIe konektoru podporuje přenosovou rychlost down-linku 100Mbps v sítích GSM/GPRS, UMTS, HSPA, HSPA+, LTE a GPS. Modem je vhodný pro aplikace typu M2M tzn. bezdrátové spojení resp. přenos dat mezi sledovaným zařízením (dron) a řídicím systémem (pozemní stanice). Modul je kompatibilní s deskami firmy MikroTik.

Výstupní výkony:	<p>LTE: +23dBm (3GPP TS 36.101 R8 Class 3)</p> <p>WCDMA/HSPA+: +24dBm (Power Class 3)</p> <p>EDGE 1900/1800MHz:+26dBm (Power Class E2)</p> <p>EDGE 900/850MHz:+27dBm (Power Class E2)</p> <p>GSM/GPRS 1900/1800MHz:+30dBm (Power Class 1)</p> <p>GSM/GPRS 900/850MHz: +33dBm (Power Class 4)</p>
-------------------------	--

Tabulka 10 Výstupní výkony LTE modemu Huawei



Obrázek 11 LTE modem Huawei ME909u-521 mPCI Express [13]

- MIKROTIK R11e-2HPnD miniPCI-e karta 802.11b/g/n

Díky použitému chipsetu Atheros AR9580 (2,4 GHz) se tato karta vyznačuje vysokou citlivostí a výstupními výkony do 1000 mW a přenosovými rychlostmi až do 300 Mbps. Karta disponuje dvěma konektory typu MMCX, což umožňuje použití dvou antén a diverzního příjmu signálu. Maximální příkon desky je 7 W při maximální zátěži.



Obrázek 12 MIKROTIK R11e-2HPnD miniPCI-e karta 802.11b/g/n [14]

6.2.2 Microhard Dragon-LTE

Za touto platformou stojí firma Microhards. U tohoto „all in one“ řešení je výhodou hardwarově hotová platforma, tzn. jsou zde k dispozici hotové příklady konfigurace nastavení a sw podpora. Nevýhodou se zde může jevit omezená škála použití modulů (WiFi, LTE), které firma podporuje. Dragon-LTE je vybaven konstrukcí OEM pro těsnou integraci systému a flexibilitu návrhu s dvěma ethernetovými porty a vysokým výkonem WIFI 802.11 b/g/n.



Obrázek 13 Dragon-LTE [15]

Spotřeba	LTE : 93~120 mA (12VDC) WiFi AP mod +LTE : 170 mA (12VDC) Max Příkon : 320 mA (12VDC)
-----------------	---

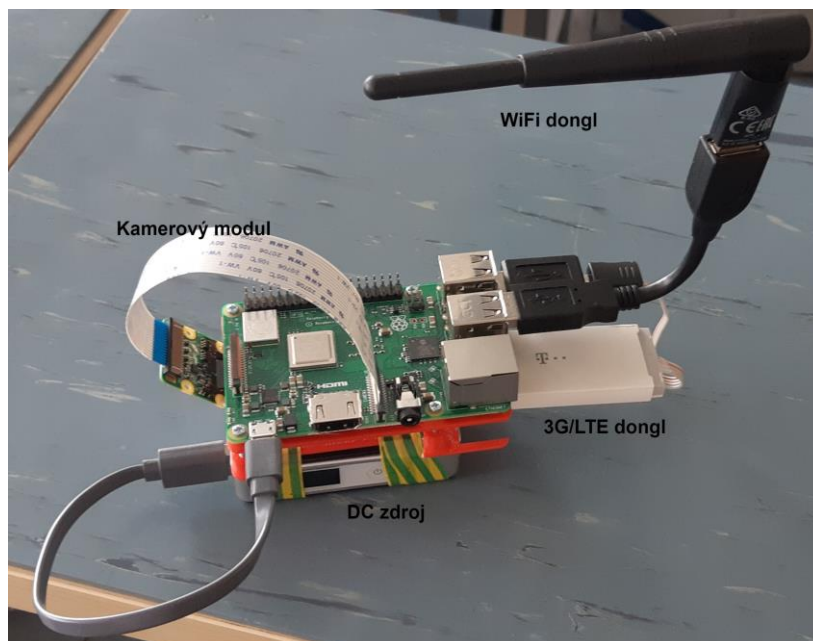
Konektivita	2 x Ethernet RJ45 10/100M, 802.11 b/g/n (2.4GHz)
Rozměry	76mm x 57mm
Hmotnost	67 g

Tabulka 11 Technické parametry Dragon-LTE

7 Hardware pro stavbu komunikačního systému

Jeden z důležitých subsystému bezpilotních prostředků je komunikační systém. Ten má na starost především spojení k a od bezpilotního prostředku (up-link / down-link). Hlavními překážkami komunikačního systému, resp. problémy spojené s jeho provozem je bezpečnost, flexibilita, kognitivní diagnostika rádiového pásma, frekvence a toků dat. Hardware pro vytvoření spojení se většinou skládá z rádiového vysílače a přijímače, příslušných antén a modemy. Hlavní technické problémy se mohou projevat jako úniky signálu, rušení a s těmi se musí komunikační systém vypořádat a v nejlepším případě být vůči těmto negativním vlivům imunní. Co se týče komunikace směrem k prostředku, přenášejí se data, jako jsou příkazy různých nastavení systému, ovládání apod. Co se týče komunikace směrem k pozemní stanici s operátorem přenášíme užitečná data jako video z palubní kamery, telemetrické údaje o stavu letounu resp. letu (např. rychlost, poloha vůči GPS). Pokud nepracujeme se sofistikovanými systémy, pak ztráta komunikace vede většinou ke ztrátě kontroly nad prostředkem a způsobení havárie. Rozsah komunikačního systému je dán funkcí poloh vysílačích, resp. přijímacích antén přičemž se jedná o LOS (line of sight) neboli přímou viditelnost. Ale také funkcí výstupních výkonů antén. Ty jsou ale ve většině civilizovaných zemí legislativně omezeny na určitou úroveň. Proto je při práci vhodnější spoléhat na komunikaci při LOS, než-li práci s různými výkony což může být i trestné.

Komunikaci mezi bezpilotním prostředkem a operátorem lze řešit buď přímou metodou např. RF přenos při LOS, nebo nepřímo prostřednictvím již fungujících RF komunikačních systémů jako jsou GSM resp. 3G/LTE varianty nebo lze využít spojení pomocí družicového spojení. Ovšem každá z možností spojení má své výhody, ale i nevýhody které musí konstruktér zařízení brát v potaz. Výběr provozní frekvence vyžaduje úvahu, kde a jak bude bezpilotní prostředek využíván. Frekvence v nižších pásmech nabízejí lepší provozní spolehlivost, ovšem za cenu menších přenosových rychlostí. Oproti tomu frekvence ve vyšších pásmech dokáží přenášet vysokokapacitní datové spojení . Ovšem i zde je to vykoupeno nutností přímé viditelnosti a i vyšších výkonů.



Obrázek 14 Kompletně osazený systém bezpilotního prostředku

7.1 Zvolený hardware pro bezpilotní prostředek


The Raspberry - Jako základ komunikačnímu systému tvořil jednodeskový počítač Raspberry. Pomocí této platformy a připojených modulů byl komunikační systém připojen k lokální i veřejné síti sloužící pro video přenos a přenos telemetrických dat. V rámci hlavního WiFi spojení se systém připojuje k lokální síti pozemní stanice, která řídí komunikaci. Lokální síť nedisponovala přístupem k síti internet a slouží tedy pouze ke komunikaci bezpilotního prostředku s pozemní stanicí.

- **Wi-Fi modul** – Slouží pro přenos videa a telemetrie z bezpilotního prostředku a zároveň příjem povelů od pozemní stanice v pásmech Wi-Fi sítí. Připojením přes USB konektor nám rozšíří bezdrátové pokrytí a poskytne vyšší rychlost přenosu dat v síti. Důležité je mít při výběru Wi-Fi modulu místní vysílací limity.

	<p>WiFi standardy : 802.11 b/g/n</p> <p>Přenosová rychlost : až 300 Mbps</p> <p>Frekvence : 2.4 GHz</p> <p>Konektor : USB 2.0</p> <p>Anténní zisk : 3dBi</p> <p>Vysílací výkon : n: 14dBm±1dBm g: 14dBm±1dBm b: 17dBm±1dBm</p>
---	--

Tabulka 12 Technické parametry WiFi modulu

- **3G/4G modul** - Slouží pro přenos videa a telemetrie z dronu, a zároveň příjem povelů od pozemní stanice v pásmech mobilních 3G/4G sítí. Připojením přes USB konektor rozšíříme schopnost bezpilotního prostředku komunikace v celulárních sítích.

	<p>Mobilní standardy : GSM, HSDPA, LTE HSDPA rychlost : 42 Mb/s HSUPA rychlost : 5,76 Mb/s</p> <p>Konektor : USB 2.0</p> <p>Vysílací výkon : LTE FDD 23dBm WCDMA/HSPA 24dBm</p> <p>Příkon : < 3,5 W</p>
---	---

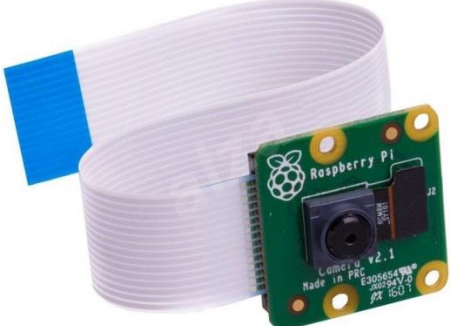
Tabulka 13 Technické parametry 3G/LTE modulu

- **Modul GPS**

	<p>Komunikace : UART</p> <p>Citlivost : -161 dBm</p> <p>Příkon : 150 mW</p> <p>Teplý start: 1 sec</p> <p>Studený start: 27 sec</p> <p>Konektor : IPX pro externí anténu</p>
--	---

Tabulka 14 Technické parametry GPS modulu

- **Pi kamera – Zásuvný modul kamery pro snímání video signálu**

	<p>Video mody : 1080p30, 720p60, 640 × 480p60/90</p> <p>Sensor : Sony IMX219</p> <p>Senzor rozlišení : 3280 × 2464 pixelů</p> <p>Vysílací výkon : <20dBm (EIRP)</p>
---	---

Tabulka 15 Technické parametry kamery

- **Napájecí zdroj**

Raspberry Pi 3 disponuje vstupním napájecím konektorem typu micro USB jako většina dnes prodávaných mobilních zařízení.

V našem projektu jsem používal dva typy napájecích zdrojů. V rámci konfigurace v prostorách laboratoře a při statických indoor testech byli používány síťové adaptéry 230V/50Hz. Druhý typ zdroje byl bateriový zdroj jako například powerbanka.

Jediná nutná podmínka pro oba typy zdrojů byl požadavek na výstupní úroveň napětí a proudu tj.

VÝSTUP: DC 5V 2.5A

7.2 Řešení pro pozemní stanici

Důležitou částí celého systému je pozemní stanice. V literatuře se můžeme setkat s názvem "(GCS) Ground Control Station". Představuje rozhraní člověk-stroj. V závislosti na složitosti systému se můžeme setkat s nejjednoduššími provedením, jako je ovládání vizuálním kontaktem (ruční ovládání v reálném čase), kdežto složitější systémy jsou vybaveny komunikačním systémem, který nevyžaduje vizuální kontakt. Operátor bezpilotního prostředku pak komunikuje s bezpilotním prostředkem pomocí up-linku komunikačního systému a tím řídí i pohyb resp. let prostředku. Prostřednictvím down-linku pak bezpilotní prostředek komunikuje s pozemní stanicí a ta zpracovává telemetrické data jako jsou souřadnice polohy z GPS, nadmořská výška, rychlost, ale zpracovává i signál z palubních přístrojů jako jsou například palubní kamery apod.

Pokud není bezpilotní prostředek schopen pracovat v prostoru plně autonomně, musí operátor řídit prostředek v reálném čase. Pozemní stanice pro aplikaci této práce patří k jednodušším variantám, tzn. řízení v reálném čase. Díky možnosti komunikace v celulárních sítích lze operovat i bez vizuálního kontaktu za předpokladu dostupnosti těchto služeb v dané lokalitě.

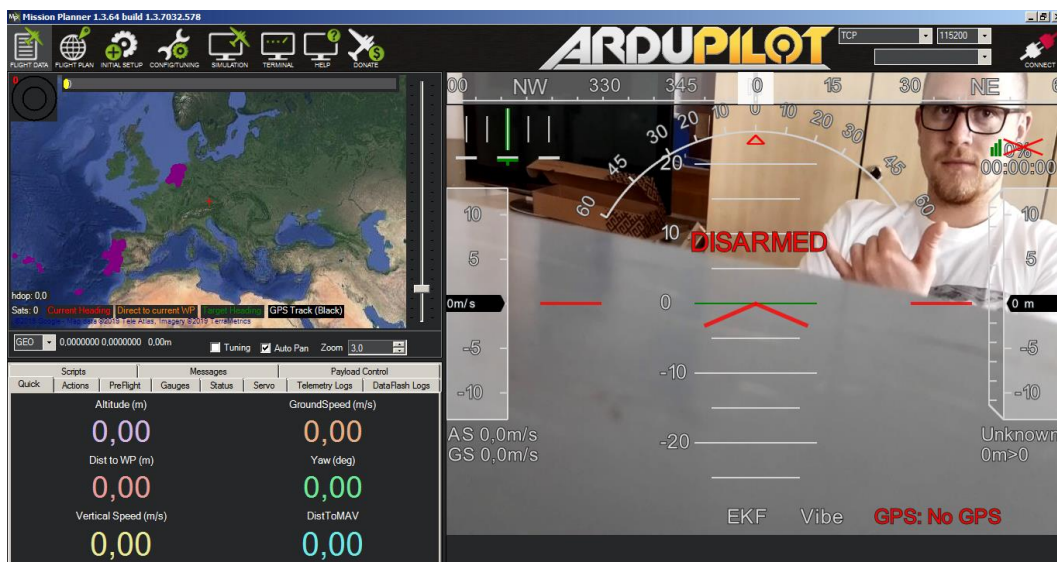
Základem pozemní stanice tvoří přenosný počítač konkrétně ASUS A53SD s OS Windows 7. Ten bylo nutné vybavit vhodným softwarem, který umožňuje zpracovávat data se schopností je i vizualizovat. Neméně podstatnou část následně tvoří anténa či skupina segmentových antén pro příjem signálu.



Obrázek 15 Kompletní konfigurace pozemní stanice

- **Mission Planner**

Program Mission Planner je software určený pro řízení pozemní stanice určený pro OS Windows. Program umožňuje plnou konfiguraci jako je plánování autonomních misí. Také umožňuje použití jako doplněk dynamického řízení autonomního vozidla. Nastavení programu pro použití této práce je popsáno, viz níže. Licence tohoto softwaru je v režimu open source a lze jej šířit nebo upravovat dle podmínek GNLv3 (General Public Licence).



Obrázek 16 Grafické rozhraní softwaru Mission Planner

odkaz ke stažení: <http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-installation.html>

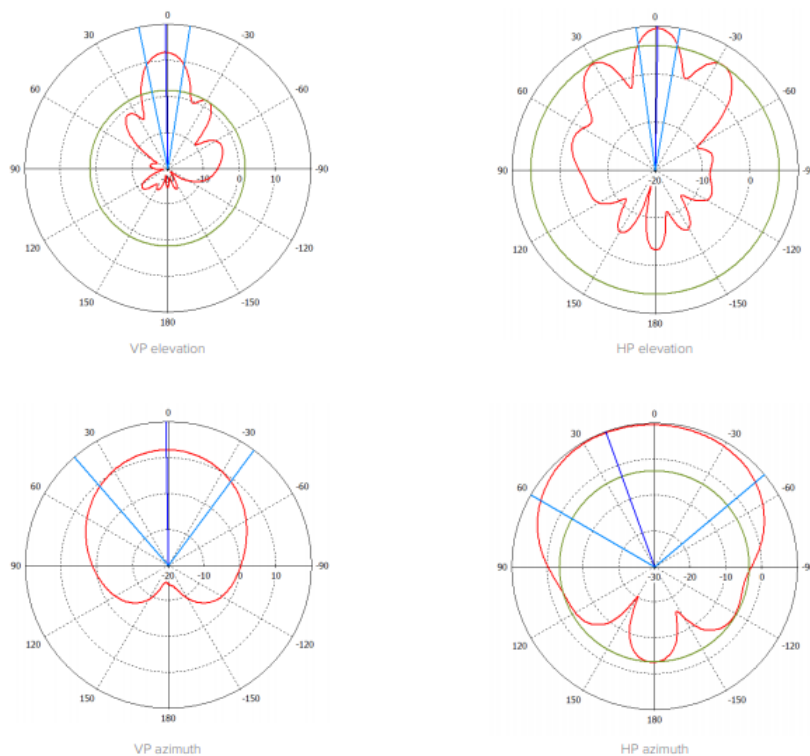
- **Anténní segment**

Již vhodným výběrem anténního segmentu pozemní stanice lze ovlivňovat přenosové

vlastnosti celého systému. Pro příjem signálu v rámci sítě WiFi při pozemní stanici byl využit RouterBOARD mANTBox 2 12s od firmy MikroTik. Anténa disponuje maximálním ziskem 12 dBi a šířkou svazku 120° pro pokles zisku o 3 dB. MANTBox je založen na sektorových anténách mANT, ale zároveň disponuje bezdrátovým směrovačem implementovaným v těle zařízení. Systém je řízen programem MikroTik RouterOS. Směrovač používá CPU s rychlostí 600 MHz a disponuje konektorem Gigabit Ethernet. Systém dokáže pracovat v pásmu 2.4 GHz 802.11 b / g / n s výstupním výkonem až 30 dBm. Vzhledem k tomu že routerboard obsahuje i směrovač, bylo nutné provést základní konfiguraci pro vytvoření AP přístupového bodu pro lokální síť s primárním komunikačním kanálem v rámci WiFi. K tomu slouží softwarový nástroj WinBox dodávaný výrobcem. Popis nastavení je v kapitole 9.1



Obrázek 17 Anténní segmenty MikroTik



Obrázek 18 Vyzařovací charakteristiky Anténního segmentu pozemní stanice

8 Nastavení základního hardwaru / softwaru pro bezpilotní prostředek

Jako první krok při stavbě komunikačního systému je zprovoznění platformy, na které tento systém bude postaven. Na základě výše uvedené rešerše byl pořízen jednodeskový počítač Raspberry Pi 3 Model B+. Tento hardware splňuje všechny požadavky kladené na systém. Pro úspěšné zprovoznění zařízení bylo nezbytné mimo samotný počítač zajistit zprovoznění dalších komponent. Zprovoznění i instalace je popsána níže.

8.1 Zprovoznění platformy jednodeskového počítače

Předtím než bylo přistoupeno k nastavování komunikace a instalace modulů, bylo nutné prvotní nastavení pořízeného jednodeskového počítače.

- Úložiště pro operační systém

Počítač Raspberry Pi disponuje pouze operační pamětí RAM. Pro OS, proto musíme pořídit externí kartu typu micro SD. Bootovací mechanismus systému z karty, který je zabudován v GPU přístroje podporuje pouze čtení souborů systémů FAT (FAT16 a FAT32).

- Nastavení OS na mikro SD kartu

Pro instalaci operačního systému bylo třeba použít jiné zařízení, které disponuje čtečkou SD karet a pomocí něhož nainstalujeme OS na kartu. Ze stránek výrobce byl stažen systém Rasbian. Obraz OS je zabalen do formátu typu .zip, přičemž bylo nutné obraz extrahovat korektně.

<https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>

- Rasbian

Oficiální systém od nadace Raspberry Pi Foundation. Systém Rasbian jako primární systém pro jednodeskové počítače obsahuje již v továrním nastavení různá programovací prostředí vhodná pro další vzdělávací účely, jakými jsou Python, Scratch, Sonic Pi, Java a další. Výhoda OS od společnosti vyvíjející i hardwarovou platformu, je silná podpora řešených problémů vznikajících při konfiguraci do různých aplikacích.

- Kapacita mikro SD karty

V případě instalace Rasbian OS výrobce důrazně doporučuje použití minimální velikosti karty s kapacitou 8 GB, v případě Rasbian_LITE minimální doporučená velikost 4 GB.

- Formátování a instalace obrazu OS

Jak již bylo řečeno, Raspberry Pi podporuje čtení z karet ve formátu FAT (FAT16 a FAT32). Výrobce na svých stránkách doporučuje stáhnout a použít softwarový nástroj pro formátování SD Formatter ze stránek společnosti SD Association.

<https://www.sdcard.org/downloads/formatter/index.html>

Po instalaci a spuštění programu zvolíme kartu kterou má SD Formatter formátovat. Po úspěšném formátování karty byl vytvořen obraz OS. Opět byl použit doporučený software

pro zápis obrazů OS Etcher . Program pracuje na Mac OS, Linuxu a Windows a jeho ovládání je velmi intuitivní. Program sám detekuje zařízení i obraz systému s koncovkou .img.

<https://www.balena.io/etcher/>

- Potřebné periferie pro prvotní zprovoznění

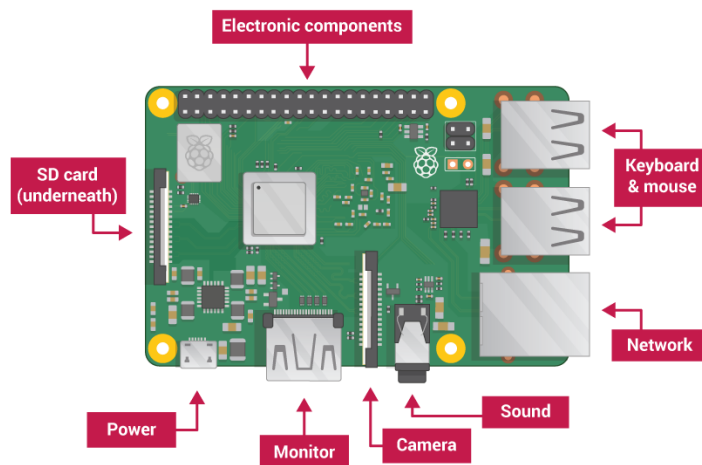
Pro prvotní nastavení systému je nezbytné připojit klávesnici a myš pomocí USB konektoru. Pro zobrazení prostředí operačního systému je zároveň potřeba připojení monitoru. Raspberry disponuje HDMI výstupem kompatibilním s většinou moderních zobrazovacích systémů. Lze také použít redukci HDMI/VGA nebo HDMI/DVI a použít i starší zobrazovací jednotky.

Pro uvedení OS a dalších ovladačů do aktuálního stavu, bylo zapotřebí disponovat ethernetovým připojením k internetu.

- Připojení a start systému Raspberry Pi

Jak bylo již zmíněno výše, nyní je potřeba připojit všechny nezbytné komponenty. Jako první byla vložena mikro SD karta s námi nainstalovaným OS Rasbian, a připojeny všechny periferie, jako klávesnice, myš, monitor a v neposlední řadě ethernetový kabel s připojením do sítě internet.

Počítač nemá hlavní vypínač napájení, tzn. zapnutí systému proběhlo okamžitě po vložení napájecího mikro USB do příslušného portu, viz obr. 19. Jako indikátor napájení slouží červená LED dioda s označení PWR, nacházející se v levém dolním rohu z pohledu na obr. 19. Na stejném místě je umístěna i notifikační dioda ACT, která bliká zeleně a indikuje čtení z mikro SD karty.



Obrázek 19 Raspberry Pi 3B+ s popsanými vstupy pro moduly [16]

Tím byla připravena platforma na jejímž základě byl budován komunikační systém.

8.2 Nastavení komunikace a instalace modulů

8.2.1 SSH

Nebo-li Secure Shell je bezpečnostní protokol pro vzdálenou komunikaci mezi dvěma zařízeními v síti používající TPC/IP protokol. Vzniknul jako náhrada za Telnet, který stejně jako SSH umožňuje komunikaci uživatele s zařízením avšak v nešifrované podobě, a proto je vhodnější z hlediska bezpečnosti používat SSH protokol. Pro náš projekt bylo využito SSH komunikace pro spojení ve směru od pozemní stanice k bezpilotnímu prostředku. Protokol kromě vzdáleného přístupu umožňuje i šifrovaný přenos souborů v tzv. režimu tunelování. Tímto spojením lze tedy v šifrované formě dodatečně nastavovat stranu bezpilotního prostředku a posílat například řídicí povely.

- Nastavení SSH na straně bezpilotního prostředku

OS Rasbian popsáný v předchozím textu obsahoval SSH server, který je ale ve výchozím nastavení zakázán. Právě proto bylo nutné tuto službu nejdříve povolit. Existuje několik cest - nejjednodušším způsobem bylo použít v otevřeném terminálu příkazového řádku příkaz `systemctl`, což je centrální nástroj pro řízení systému v následující podobě :

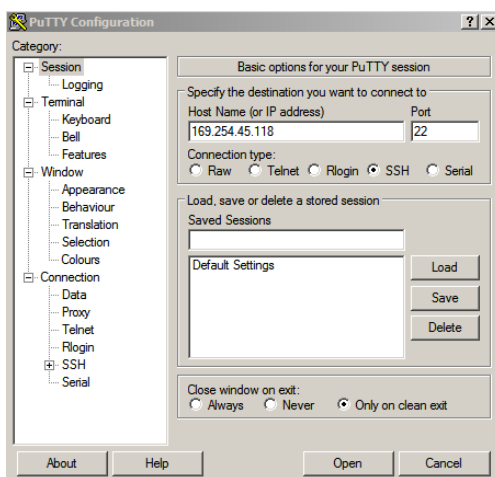
```
sudo systemctl enable ssh
sudo systemctl start ssh
```

Těmito příkazy byl povolen a nastaven do stavu aktivní SSH server. Je vhodné znát IP adresu tohoto zařízení v rámci připojené sítě. Pomocí ní se k zařízení připojuje uživatel ze vzdáleného terminálu. Pro zobrazení IP adresy lze použít příkaz

hostname -I

- Nastavení SSH na straně pozemní stanice

Na straně pozemní stanice, resp. vzdáleného terminálu, který v našem případě představoval notebook s OS Windows, bylo nastavení SSH lehce odlišné. OS Windows sám o sobě SSH klienta neobsahuje, proto bylo nutné klienta dodatečně doinstalovat. Nejpopulárnějším SSH klientem je program PuTTY. Po instalaci se otevře jednoduché dialogové okno, kde v kolonce **Host Name:** byla zadána IP adresa Raspberry Pi a nastaveno **Connection Type:** na SSH viz obr.20. Potvrzením tlačítkem **OPEN** pak spustíme komunikaci.

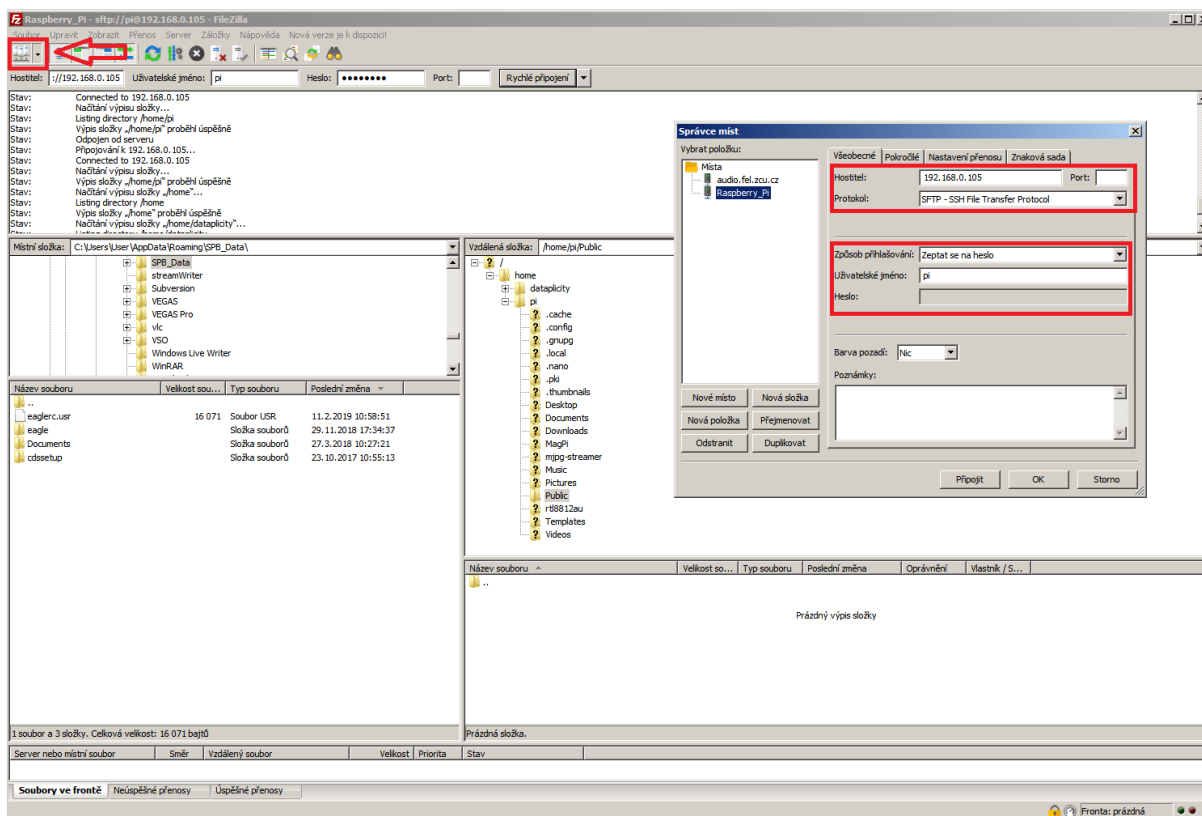


Obrázek 20 Úvodní okno programu PuTTY

8.2.1.1 SFTP (SSH Protokol pro přenos dat)

Pro autonomní provoz je důležitá schopnost komunikačního systému umožnit operátorovi nahrávat například letové plány při startu ale i v průběhu samotného letu. K těmto účelům lze použít komunikační protokol SSH resp. jeho rozšířenou variantu SFTP (SSH File Transfer Protocol) pro přenos dat mezi dvěma body v rámci počítačové sítě. Výhodou je jednoduchá implementace do systému, ve kterém již byla nastavena SSH komunikace. Nutná je pouze instalace klienta, který podporuje komunikaci v rámci FTP resp. SFTP. V našem případě byl využit freewarový klient FileZilla, který zprostředkovává přenos dat mezi pozemní stanicí operátora a bezpilotním letounem. Do počítače představující pozemní stanici byl nainstalován klient dostupný na stránkách výrobce.

<https://filezilla-project.org/>



Obrázek 21 Klient Filezilla pro transfer dat

Po instalaci klienta bylo potřeba nastavit parametry pro spojení. V levém horním rohu klienta obr.21 byl otevřen Správce míst ve kterém byla nastavena IP adresa komunikačního systému letounu v kolonce Hostitel a v kolonce Protokol nastaven SFTP protokol. V případě připojení pozemní stanice i systému letounu na jedné lokální síti je možné se připojit ze stanice do letounu a nahrávat či stahovat data. Tím způsobem pak lze přepisovat a tím měnit letové plány nebo zadávat okamžité příkazy do letounu.

8.2.2 Kamera

Pro pořizování video obrazu bylo potřeba připojit a povolit modul kamery. S kamerou která byla představena v kapitole o používaném hardwaru, jsme schopni pořizovat videa v rozlišení HD 1080p 30fps. Modul kamery se připojuje do speciálních CSI kamerových portů pomocí flex vodiče viz obr 22.



Obrázek 22 Zapojený modul kamery do CSI portu

- Povolení kamery v OS

Před zprovozněním kamerového systému bylo třeba povolit rozhraní v OS Rasbian. V otevřené příkazové řádce pak bylo zadáno následující.

```
sudo raspi-config
```

Otevřelo se nám rozhraní pro konfiguraci systému. V nastavení Interfaces > Camera > YES.

Potvrzením YES bylo zprovozněno rozhraní pro modul schopný pořizovat foto i video.

Pro zachycení video sekvence byl použit příkaz:

```
raspivid -t 0 -w 1280 -h 720 -fps 30 -rot 180 -b 2000000
```

-t, --timeout : Trvání videa zadávané v [ms]

(pro nepřetržité nahrávání zadat hodnotu 0)

-w, --width : Nastavení šířky obrazu <size>. Rozsah 64 až 1920

-h, --height : Nastavení výšky obrazu <size>. Rozsah 64 až 1080

-fps, --framerate : Nastavení frekvence pořizování snímků za sekundu

-b, --bitrate : Nastavení bitrate [bps]

(Pro vysoké rozlišení 1080p 30fps s kodováním h.264 doporučené 15Mbits/s a víc.

Maximální hodnota je 25Mbits/s)

-o, --output : Název výstupního souboru <filename>

-rot, --rotation : Nastavení rotace obrazu (0, 90, 180, 270)

8.2.3 WiFi adaptér

Pro bezdrátovou komunikace standardu 802.11 byl nainstalován externí WiFi adaptér EW-7612UAn V2. Technické parametry byly popsány v kapitole 7.1. Externí adaptér umožňuje větší rozsah pokrytí a vyšší přenosovou rychlost, než například WiFi na jednodeskovém počítači. Adaptér disponuje i sklopnou anténou se ziskem 3dBi a vertikální polarizací.

- Instalace ovladačů pro adaptér

Pro korektní komunikaci a činnost adaptéru bylo třeba nainstalovat ovladače pro řízení. OS Rasbian ,resp. OS na bázi Linuxu zpravidla neobsahují ovladače, přičemž ani nemají schopnost jako například OS Windows jejich automatické stažení a konfiguraci. Proto bylo nutné toto provést ručně. Důležité je, aby byl systém připojen do sítě internet. Instalace byla opět provedena v terminálovém okně příkazového řádku, s pomocí návodu přímo od výrobce.

V první řadě se bylo třeba ujistit zda je systém v aktuální verzi.

```
sudo apt update
sudo apt upgrade
sudo apt --purge autoremove
sudo reboot
```

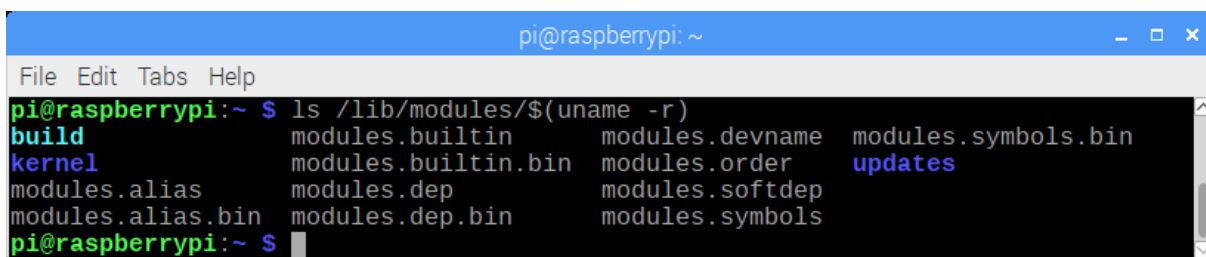
V dalším kroce bylo třeba nainstalovat ovladače jader systému (kernel-headers). Ty jsou nezbytné pro korektní kompilaci ovladačů

```
sudo apt install raspberrypi-kernel-headers
```

Pokud bylo vše potřebné, pro správný chod ovladačů jader, nainstalováno v pořádku, měl by příkaz

```
ls /lib/modules/$(uname -r)
```

zobrazit soubory build a kernel viz obr.23



```
pi@raspberrypi: ~  
File Edit Tabs Help  
pi@raspberrypi:~ $ ls /lib/modules/$(uname -r)  
build          modules.builtin          modules.devname          modules.symbols.bin  
kernel         modules.builtin.bin      modules.order            updates  
modules.alias  modules.dep              modules.softdep  
modules.alias.bin  modules.dep.bin          modules.symbols  
pi@raspberrypi:~ $
```

Obrázek 23 Moduly potřebné k instalaci WiFi adaptéru

Dalším krokem bylo stáhnutí klonu ovladačů pro konkrétní typ adaptéru ze stránek GitHub.com (<https://github.com/jackfan108/rtl8822bu/>).

```
git clone https://github.com/jackfan108/rtl8822bu.git/  
cd rtl8822bu
```

Stažením klonu ovladačů příkazem `git clone` a příkazem `cd` kterým vstupujeme do adresáře `rtl8822bu` bylo přistoupeno k samotné instalaci.

Bylo potřeba upravit (`make file`). Do tohoto souboru se zapisují instrukce, jak se má náš program přeložit, a případně nainstalovat pro architekturu našeho počítače. Pro architekturu založenou na ARM procesorech bylo třeba tento soubor editovat příkazem

```
nano Makefile
```

otevřeme tento soubor a na řádce #969 změníme text na

```
ARCH := arm
```

Po provedené úpravě se následujícími příkazy instalace dokončila.

```
make  
sudo make install  
sudo reboot
```

Po restartu systému je již možné používat WiFi adaptér a lze se prostřednictvím něho připojit v našem případě k síti pozemní stanice.

- Připojení k WiFi síti

Pro nastavení připojení použijeme SSH přístup popsany výše. Pro automatické připojování k síti pozemní stanice bylo nutné přidat detaily sítě do konfiguračního souboru systému s

názvem wpa-suplicant. Pokud známe SSID a heslo do naší sítě, tak pomocí příkazu pod textem otevřeme konfigurační soubor

```
sudo nano /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf
```

do tohoto souboru jsme vložili detaily naší sítě následujícím způsobem.

```
network={
    ssid="ground_station"
    psk="heslo_WIFI"
}
```

Po uložení a restartu systému se již systém automaticky připojí v dosahu tohoto SSID k síti.

8.2.4 Modem pro mobilní síť

Pro přístup do telefonních sítí bylo třeba vybavit systém GSM modemem. Pro tento systém bylo použito zařízení od společnosti Huawei E3372h. Technické parametry byly popsány viz kap. 7.1. Problém u modemů tohoto výrobce a typu je přihlašování do systému jako celá řada různých zařízení, např: (CD ROM, SDcard reader, ...). Systémy založené na OS Linux si s tímto problémem nedokáží poradit. Proto bylo nutné zařízení zkontrolovat a popřípadě nastavit do správného režimu, který umožňuje přístup do sítě internet. Přepnutí bylo provedeno pomocí softwaru USB_ModeSwitch

- USB_ModeSwitch

Je nástroj pro přepínání režimů u různých multi-modových USB zařízení (především vysokorychlostní WAN modemy). Takto korektně nastavené zařízení (WAN modem) se hlásí jako síťová karta. To znamená, že modem se připojí automaticky, což snižuje režijní náklady.

- Instalace a přepnutí pomocí USB_ModeSwitch

Zobrazení zařízení připojených do USB portů se provádí v okně terminálu za pomoci příkazu:

```
lsusb
```

Pokud se ve výpisu zařízení připojených k USB portům modem nehlásil na vstupu jako

```
Bus 001 Device 013: ID 12d1:1506 Huawei Technologies Co., Ltd.  
Modem/Networkcard
```

bylo potřeba použít USB_ModeSwitch. Příkazem níže byl nainstalován USB_ModeSwitch

```
sudo apt-get install usb-modeswitch
```

Přepnutím modu se změní ID produktu. První čtyři znaky popisují výrobce a druhá čtveřice znaků popisuje mód zařízení. Následujícím příkazem otevřeme konfigurační soubor který se bude inicializovat při startu systému jako celku.

```
sudo nano /etc/usb_modeswitch.conf
```

Do souboru byly zapsány tyto řádky

```
DefaultVendor = 0x12d1  
DefaultProduct = 0x1506  
MessageEndPoint = "0x01"  
MessageContent="555342430000000000000000000000011060000000000000000  
000000000000"
```

Po uložení a restartování systému se zařízení již na vstupu hlásí jako Modem/Networkcard s ID 12d1:1506. Příkazem

```
ifconfig
```

zobrazíme informace ke konfiguraci síťového rozhraní, kde bylo vytvořeno a nakonfigurováno rozhraní wwan0 viz obr.24.

```
wwan0: flags=4163<AKTIVOVÁNO,VŠESMĚR,BĚŽÍ,MULTICAST> mtu 1500  
inet 100.124.243.73 síťová_maska 255.255.255.252 všesměr 100.124.243.75  
inet6 fe80::faae:a943:44e1:e15c délka_prefixu 64 scopeid 0x20<linka>  
ether 00:1e:10:1f:00:00 délka_odchozí_fronty 1000 (Ethernet)  
RX packetů 152 bajtů 41261 (40,2 KiB)  
RX chyb 0 zahozeno 0 přetečení 0 rámců 0  
TX packetů 218 bajtů 29350 (28,6 KiB)  
TX chyb 0 zahozeno 0 přetečení 0 přenos 0 kolizí 0  
pi@raspberrypi:/$
```

Obrázek 24 Nakonfigurovaný interfaces do mobilní sítě wwan0

- Nastavení APN

Dalším krokem bylo navázání komunikace do sítě internet prostřednictvím operátora (poskytovatele) telefonních sítí. K tomu byla nutná předplacená SIM karta. Karta byla vložena pod horní sundavací kryt modemu. Pro tyto účely byla zakoupena nová karta. Proto bylo nejdříve nutné SIM zprovoznit vložení do mobilního telefonu a vytočením čísla operátora.

Modem přistupuje do internetu přes APN (Access Point Name) operátora používané SIM karty. Správně nastavené APN je nezbytné k tomu, abychom se mohli pomocí modemu připojit k internetu. AT příkaz pro nastavení APN se zadává přímo modemu prostřednictvím sériového rozhraní, které zprostředkovává komunikaci.

Systém Debian po připojení modemu do USB vytvoří dvě sériová rozhraní /dev/ttyUSB0 a /dev/ttyUSB1 a jedno ethernetové wwan0, jak již bylo zmíněno v předešlém textu. Prvním sériovým rozhraním se modemu posílají ovládací povely pomocí AT příkazů, pomocí ethernetového wwan0 probíhá samotný datový přenos.

Pro zadání AT příkazů a jejich okamžitou kontrolu bylo třeba otevřít dvě terminálová okna.

V prvním z nich byl zadán příkaz

```
sudo cat < /dev/ttyUSB0
```

Tím byla nastavena výstupní sériová komunikace modemu do okna terminálu. Modem by měl samovolně začít vypisovat úroveň signálu popřípadě hodiny v 4G síti.

```
^RSSI:15
```

```
^HCSQ:"LTE",38,25,66,8
```

```
^MODE: 3,3
```

```
^RSSI: 9
```

```
^HCSQ:"GSM",27
```

```
^RSSI: 8
```

```
^HCSQ:"GSM",25
```

```
^NWTIME:18/01/14,09:22:06+04,00
```

Do druhého terminálového okna byly následně zadávány samotné AT příkazy pro nastavení APN pro modem. V našem případě byla použita SIM karta operátora T-Mobile. Jiní poskytovatelé mají různé APN, a proto se bude zápis lišit dle používaného operátora.

```
echo -e AT^NDISDUP=1,1,"internet.t-mobile.cz"
```

V okně s nastaveným výpisem modem odpověděl

OK

```
^NDISSTAT:1,,,"IPV4"
```

Tím jsem se inicializovali do sítě internet prostřednictvím mobilní sítě. Operátor následně přidělí za pomoci DHCP klienta IP adresu, výchozí bránu a adresy DNS serverů.

Důležité je stejně jako korektní připojení se i správné odpojení. To bylo provedeno příkazem

```
AT^NDISDUP=1,0
```

Modem disponuje i notifikační LED diodou. Proto je dobré znát význam barvy a počtu blikání.

Zelená bliká 2x/3 sekundy = modem je napájen

Zelená bliká 1x/3 sekundy = modem je registrován v síti 2G

Zelená svítí = modem je připojen do sítě 2G

Modrá bliká 1x/3 sekundy = modem je registrován v síti 3G/3G+

Modrá svítí = modem je připojen do sítě 3G

Azurová svítí = modem je připojen do sítě 3G+

Nesvítí = modem nemá napájení, nebo je poškozen

8.2.5 Net-ISP-Balance

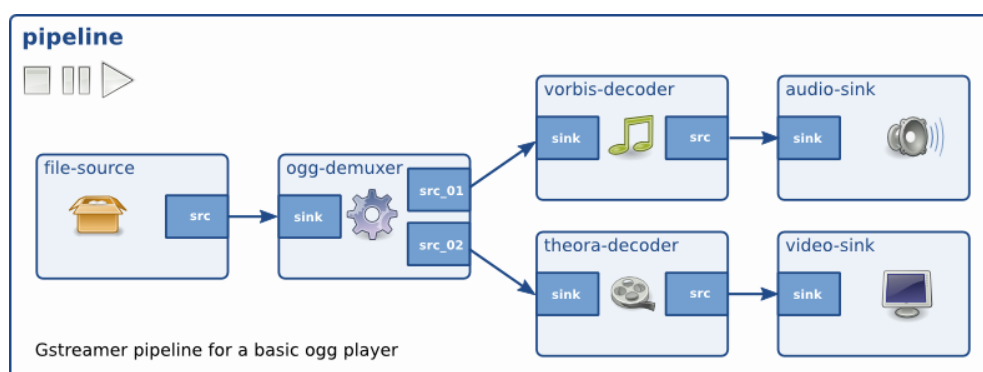
Je softwarový nástroj, který umožňuje pracovat se dvěma a více aktivními síťovými připojeními. Síťový provoz s nastavenými prioritami sítí je v rámci například dvou připojení neustále monitorován a ve chvíli špatné datové propustnosti sítě automaticky přechází na síť s nižší prioritou ale lepší datovou propustností. Toto je výhodné řešení pro autonomní komunikační systém bezpilotního letounu. Systém vybavený tímto softwarem může při překročení hranice dosahu lokální sítě přejít na záložní síť v celulárních sítích, a poskytovat tak data z letounu dál operátorovy.

Algoritmus softwaru ISP Balance kontroluje propustnost sítí takovým způsobem, že odesílá a přijímá datové pakety na výchozí brány sítí příkazem ping, přičemž sleduje jejich procentuální ztrátu a dobu odezvy. Z konfiguračního souboru, ve kterém jsou nastaveny meze minimální a maximální ztráty paketů, pak vyhodnocuje propustnost, na základě které

přepíná mezi komunikačními sítěmi.

8.2.6 Gstreamer

Pro vytvoření video streamu mezi dronem a pozemní stanicí operátora byl použit software s názvem GStreamer [4]. Jedná se o framework platformu pro multimediální využití. Umožňuje nejrůznější druhy záznamu, úprav nebo streamování multimediálního obsahu. Software je konstruován jako pipeline architektura, což znamená že data zdroje (*source*) putují potrubím do cílového (*sink*) padu. Mezi zdrojem a cílem se umísťují filtry, které vhodným způsobem upravují tok dat, tak aby odpovídal požadavkům.



Obrázek 25 Vizualizace pipeline Gstreamer [17]

- Elementy

Elementy tvoří základ celého softwaru. Element má vždy jednu specifickou funkci ve struktuře a jsou oddělovány vykřičníkem. Tou může být například čtení dat od zdroje, kódování či dekodování těchto dat nebo výstup těchto dat.

- Multimediální formáty

K GStreameru lze doinstalovat velké množství plug-inů (přídavná rozšíření). Lze je řetězit či používat separátně, přičemž poskytují vedle zpracovatelských prvků / filtrů všeho druhu podporu pro širokou škálu formátů souborů, protokolů a multimediálních kodeků.

Díky plug-inům může Gstreamer obsahovat velké množství kompresních formátů používaných v multimediálních systémech jako (MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, H.261, H.263, H.264, RealVideo, MP3, WMV).

GStreamer je volně šiřitelný open-source software podléhající podmínkám GNU Lesser General Public License (LGPL)

- Instalace softwaru

Pro instalaci frameworku GStreamer bylo postupováno obdobně jako v předchozích případech pomocí terminálové konzole a zadání následujících příkazů. Prvním krokem byl aktualizovat tzv. sources.list, což je seznam s odkazy pro systém na jakých místech v síti může stahovat programy nebo aktualizace pro ně. Editace byla provedena v souboru s tímto kořenem.

```
sudo nano /etc/apt/sources.list
```

Do souboru přidáme následující odkaz a uložíme

```
deb http://vontaene.de/raspbian-updates/ . main
```

Poté byl proveden update systému a samotná instalace

```
sudo apt-get update  
sudo apt-get install gstreamer1.0  
sudo apt-get install gstreamer1.0-tools
```

- Vytvoření video streamu

Po instalaci je možné spustit stream videa s použitím RTP a síťových elementů. Zdroj videa představuje palubní kamera volaná příkazem pod tímto textem na straně bezpilotního prostředku. Význam první poloviny byl vysvětlen v části o nastavení kamery. Druhá část počínaje slovem `gst-launch-1.0`, což je nástroj, který sestavuje pipeline, představuje samotné elementy frameworku GStreamer.

```
raspivid -t 0 -w 1280 -h 720 -fps 30 -rot 180 -b 2000000 -o - | gst-launch-1.0 -e -  
vfv fsrc ! h264parse ! rtp264pay pt=96 config-interval=5 ! udpsink  
host=IP_ADRESA_PRIJEMCE port=5000
```

8.2.7 Dataplicity

V rámci sekundárního systému komunikace skrze celulární síť je přenos dat lehce odlišný. Operátor se nemůže připojit k bezpilotnímu prostředku podobně jako v rámci lokální sítě WIFI kde mají zařízení přidělenou IP adresu v rámci jednoho rozsahu. Proto bylo nutné

data odesílat na server, který zprostředkovává vzdálenou komunikaci v rámci globální sítě internet. K tomuto byla využita služba Dataplicity.com



Obrázek 26 Úvodní strana serveru Dataplicity.com

- Nastavení služby a instalace klienta

V prvním kroku bylo nutné vytvořit účet na serveru Dataplicity.com. Po zadání emailové adresy uživatele byl vytvořen účet a byl vygenerován kód. Příklad vygenerovaného kódu:

```
curl https://www.dataplicity.com/e5plmkfn.py | sudo python
```

Pomocí SSH spojení vložením kódu byl nainstalován klient do systému Raspberry Pi spojeného s příslušným účtem odpovídající emailové adrese. Klient v případě aktivního připojení do internetu se automaticky připojí k serveru, a ten pak zprostředkovává jednak komunikaci směrem od, ale zároveň i směrem k operátorovi včetně přenosu videa. Službu video streamu lze zobrazit v internetovém prohlížeči, ale zároveň také v multimediálním přehrávači podporující HTTP streamování, jako je např. VLC media player. Následujícím příkazem lze zobrazit video stream kde <YOUR_ID> je unikátní kód každého uživatele přidělený službou Dataplicity.com. Video je vytvářeno pomocí softwaru MJPG-Streamer. Před začátkem přenosu byla nutná jeho instalace

```
http:// <YOUR_ID>.dataplicity.io:80/?action=stream
```

- MJPG-Streamer

Pro video streamování na vzdálené servery služby Dataplicity.com bylo potřeba doinstalovat software MJPG-Streamer, který zprostředkoval na portu 80 pomocí protokolu HTTP komunikaci mezi naším systémem a Dataplicity.com.

- Instalace MJPG-Streamer

Instalace byla provedena prostřednictvím SSH spojení s naším systémem, který byl připojen ethernetovým kabelem do sítě internet následujícími příkazy.

```
sudo apt-get install libjpeg8-dev imagemagick libv4l-dev
wget http://terzo.acmesystems.it/webcam/mjpg-streamer.tar.gz
tar -xvzf mjpg-streamer.tar.gz
sudo ln -s /usr/include/libv4l1-videodev.h /usr/include/linux/videodev.h
cd mjpg-streamer/
nano Makefile
```

v souboru, který byl otevřen posledním příkazem `nano Makefile`, bylo potřeba za komentovat plugin `input_gspcav1`, což bylo provedeno vložением hashtagu před řádek

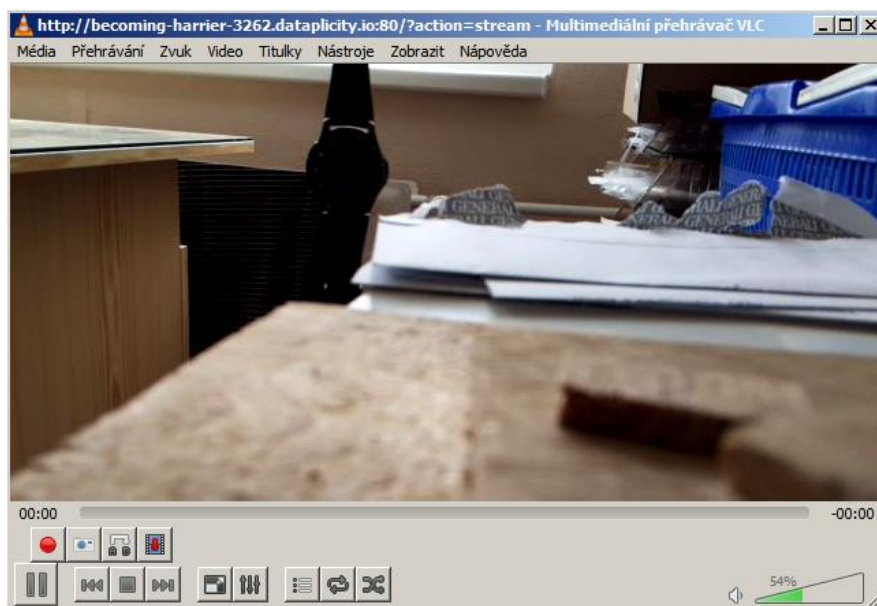
```
# PLUGINS += input_gspcav1.so
```

po úpravě a uložení pak instalace byla dokončena příkazem.

```
make
```

Tím byla dokončena instalace a v případě připojení přes službu `Dataplicity.com` bylo možno spustit stream postupným zadáním příkazů níže.

```
sudo modprobe bcm2835-v4l2
sudo ./mjpg_streamer -i "./input_uvc.so -f 10 -r 640x320 -n -y" -o "./output_http.so -
w ./www -p 80"
```

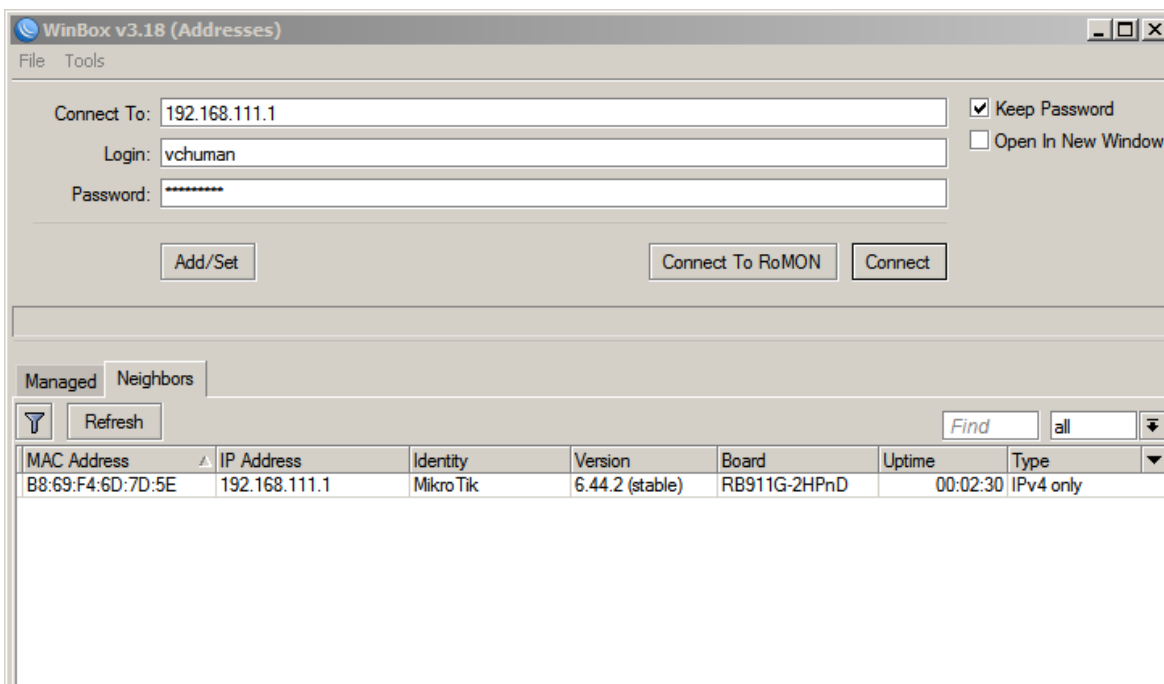
Obrázek 27 Zachytávání videa streamu prostřednictvím celulární sítě

9 Nastavení základního hardwaru a softwaru pro pozemní stanici

Po úspěšném nastavení hardwaru bezpilotního prostředku bylo přistoupeno k nastavení pozemní stanice. Hardware, resp. software popsany v kapitole 7.2, byl nastaven následujícím způsobem.

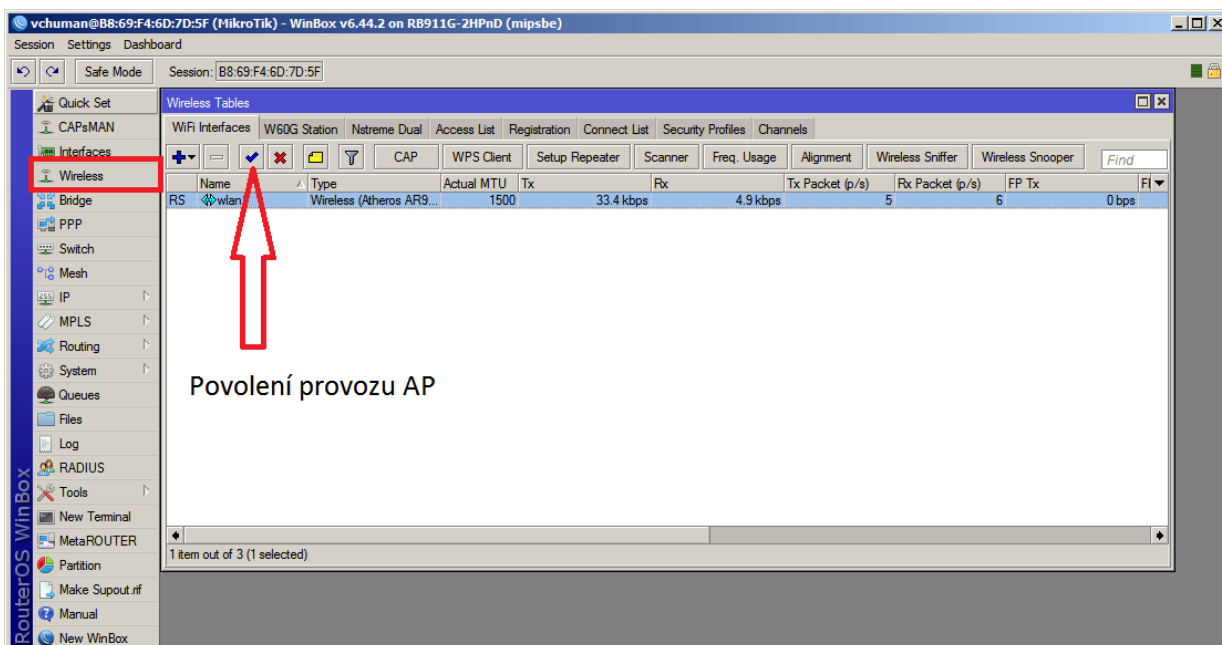
9.1 Winbox

Malý nástroj pro konfiguraci zařízení pracujícím s MikroTik RouterOS. Nástroj dostupný na stránkách výrobce nemá instalaci a spuštění proběhne vždy ze souboru WinBox.exe. Pro první spuštění bylo nutné propojit RouterBoard s počítačem pozemní stanice prostřednictvím ethernetového kabelu. Po propojení a spuštění nástroje se zobrazilo zaváděcí okno.



Obrázek 28 Úvodní okno aplikace WinBox

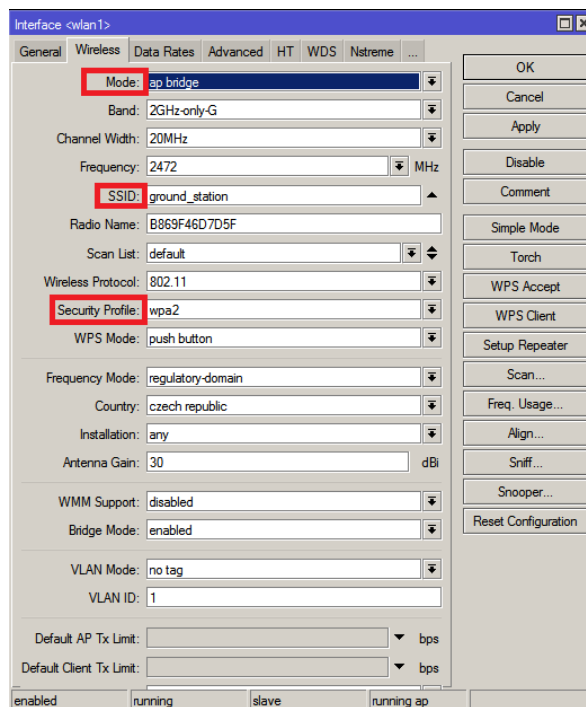
V záložce Neighbors bylo zobrazeno zařízení, respektive připojený RouterBoard. Kliknutím na zařízení a potvrzením tlačítkem Connect se připojíme do konfiguračního modu.



Obrázek 29 Konfigurační okno aplikace WinBox pro bezdrátová zařízení

Zde je třeba otevřít okno pro bezdrátové rozhraní Wireless . V okně Wireless Tables je vidět interfaces s názvem wlan1. Před spuštěním interfacu wlan1 bylo nutné nakonfigurovat rozhraní pro anténní segmen. Dvojklikem na interfaces wlan1 se otevře

konfigurační okno. Konfigurace byla provedena následovně v záložce Wireless



Obrázek 30 Okno pro nastavení sítě pozemní stanice

Nutným nastavením je režim směrovače. V kolonce Mode: bylo nastaveno ap bridge a dále bylo nutné nastavení SSID sítě, pod kterým se přístupový bod zobrazuje v našem případě groun_station. Zároveň bylo důrazně doporučováno nastavit bezpečnostní profil Security Profile, kde bylo vytvořeno heslo s použitým šifrování WPA2. Další nastavení jako je přenosové pásmo, šířka kanálu nebo frekvence, již není nutná, nicméně je vhodné tyto parametry uvažovat. Potvrzením OK byla konfigurace dokončena. Nyní bylo AP možno povolit provoz, viz obr. 30. Tím byla vytvořena lokální síť, ke které se bylo možné připojit jak pozemní stanicí, tak bezpilotním prostředkem

9.2 Nastavení Mission planer

Jak již bylo popsáno v kapitole 7.2, program Mission Planner slouží jako software pro vizualizaci dat z bezpilotního prostředku - v našem případě v podobě videostreamu. Video zprostředkovává nástroj Gstreamer popsáný v kapitole 8.2.6. Program Mission Planner tento nástroj již obsahuje a není tak nutné instalovat dodatečné rozšíření. V otevřeném okně programu pravým tlačítkem myši klikneme na obrázek horizontu. V záložce Video > Set Gstreamer Source. Tím se otevřelo dialogové okno, do kterého byl vložen řetězec pod obr. 31. V případě že komunikační systém měl aktivovaný a vytvořený pipeline přenos videa program na portu nastaveného v řetězci, začne odebírat data a zobrazovat video.



Obrázek 31 Nastavení Mission Planner pro příjem videa

```
gst-launch-1.0 udpsrc port=5000 ! application/x-rtp, payload=96 ! rtpjitterbuffer !
rtpH264depay ! avdec_h264 ! fpsdisplaysink sync=false text-overlay=false
```

10 Testování kompletního systému

Zkompletovaný a nastavený systém komunikace pro bezpilotní prostředek byl podroben několika testováním pro ověření reálných schopností. V první řadě bylo zjišťováno zpoždění záznamu, přenosu a zobrazení v rámci různých komunikačních možností.

Druhé testování ověřovalo dosah přenosu videa z palubní kamery bezpilotního prostředku. Testování proběhlo v první variantě na lokální síti s přímou viditelností komunikačního systému. Druhý test v rámci přenosu videa prostřednictvím celulární sítě a sítě internet za nepřímé viditelnosti operátora a komunikačního systému.

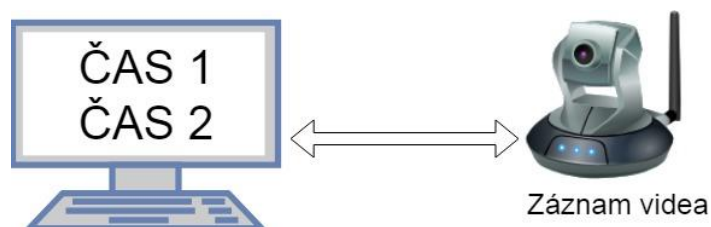
10.1 Test zpoždění v rámci použitých bezdrátových technologií

Pro zjištění zpoždění v rámci použitých způsobů pro bezdrátový přenos bylo provedeno jednoduché měření ve třech konfiguracích, při kterých byly zaznamenávány digitální hodiny. Díky tomu bylo možné si udělat lepší představu o dílčích zpožděních v rámci celého komunikačního systému. Měření proběhlo v rámci konfigurace videa, záznamu a přenosu videa přes lokální WiFi síť se zobrazením na pozemní stanici. Poslední pak záznamu videa přenosu pomocí celulární sítě do vzdáleného serveru, a z něho následně do pozemní stanice.

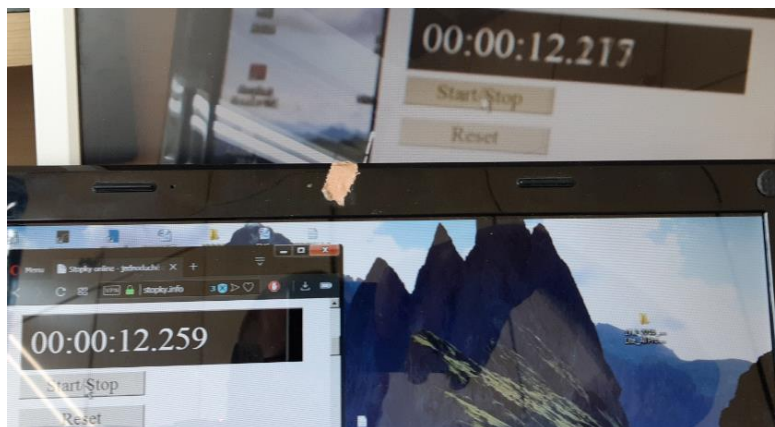
Princip měření byl velice jednoduchý. ČAS 1 představoval spuštěný čas s rozlišením v řádech setin sekundy. ČAS 2 představoval video obraz ČAS 1 postiženým průchodem systémem. Rozdílem ČAS1 A ČAS2 jsme dostali zpoždění video přenosu v rámci různých sítí a systému jako takového.

10.1.1 Záznam videa

V prvním měření byla měřena pouze doba záznamu systémem samotným. To bylo provedeno pomocí příkazu „raspivid“ na testovaném zařízení Raspberry Pi 3 B+, přičemž kamera snímala digitální hodiny. Video bylo zobrazeno přímo na připojené obrazovce, díky tomu bylo možné izolovat zpoždění snímáním. Na obr. 33, je zobrazená konfigurace tohoto měření. V této konfiguraci bylo provedeno několik měření, které ukázaly, že zpoždění zachycení systémem Raspberry Pi 3 B+ bylo v průměru 42 ms.



Obrázek 32 Měřící schéma zpoždění pouze záznamu videa

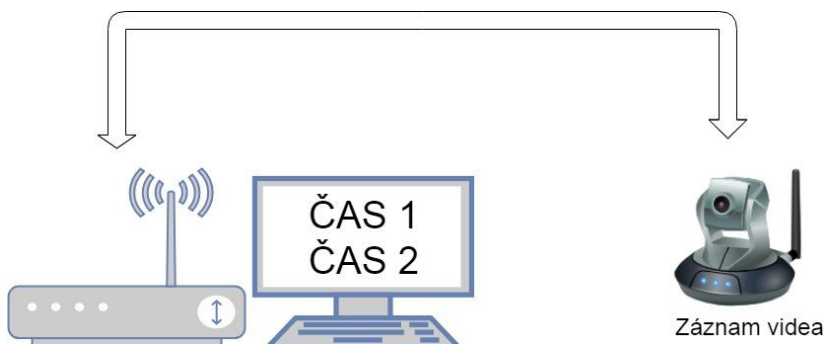


Obrázek 33 Měření zpoždění záznamu videa

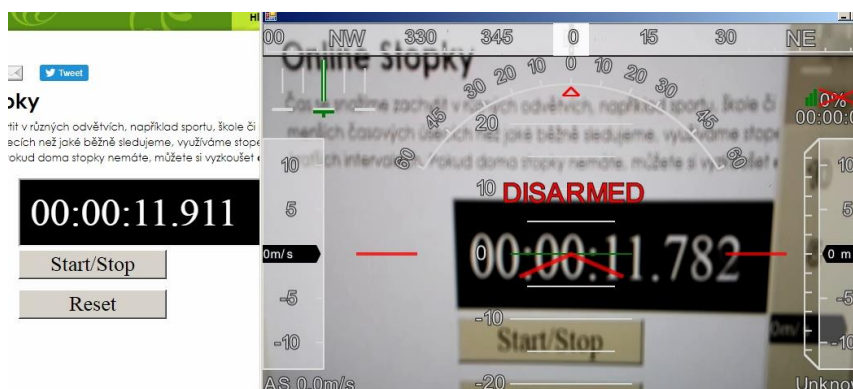
10.1.2 Záznam a přenos prostřednictvím lokální sítě WiFi

V druhém měření bylo oproti prvnímu obraz zachycený kamerou přenášen lokální sítí WiFi do pozemní stanice, kde byl obraz ČAS 1 zpracován a zobrazen jako ČAS 2. Opět bylo použito Raspberry Pi 3 B+ a lokální síť vytvořená routerem MikroTik s SSID groun_station nastavení v kapitole 9.1. Kódované video bylo vytvořeno pomocí příkazu raspivid a streamované s použitím nástroje Gstreamer kap. 8.2.6. Pro přenos v síti byl

použit protokol (UDP) User Datagram Protocol. Ten byl přijímán, dekódován a zobrazen v pozemní stanici prostřednictvím aplikace Mission Planner. Na obr. 35, je zobrazená konfigurace tohoto měření. Měření provedená v tomto nastavení ukázalo, že celkové zpoždění kódování a dekódování mezi dvěma zařízeními v lokální síti bylo v průměru 129 ms. V porovnání s pouhým záznamem a zobrazením videa je doba zpoždění v rámci lokální sítě WiFi trojnásobná. To znamená, že síťová komunikace lokální sítě přidává zpoždění 87 ms.



Obrázek 34 Měřicí schéma zpoždění záznamu videa a přenosu přes WiFi síť



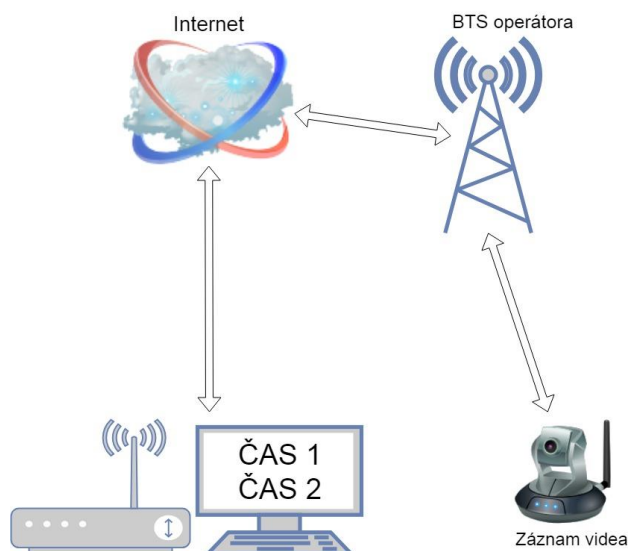
Obrázek 35 Měření zpoždění záznamu videa v rámci WiFi

10.1.3 Záznam a přenos prostřednictvím celulárních sítí

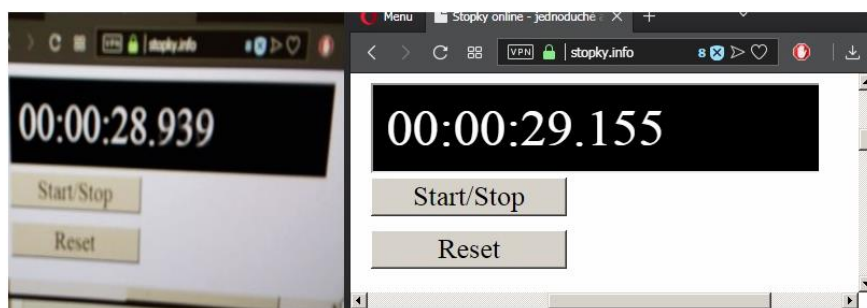
Ve třetím měření bylo testováno zpoždění záznamu videa a přenos prostřednictvím sítě internet, do kterého se zařízení připojilo prostřednictvím GSM adaptéru. Videozáznam byl zpracován nástrojem MJPG-Streamer, který využívá HTTP (Hypertext Transfer Protocol) s využitím portu TCP/80. Video záznam byl tímto způsobem streamován na servery služby Dataplicity.com. V tomto měření měl komunikační systém přidělenou unikátní IP adresu z veřejného rozsahu poskytnutou operátorem mobilní sítě. Pozemní stanice byla připojena do sítě internet a video bylo možno zobrazit zadáním odkazu z kapitoly 8.2.7. Na obr. 36, je zobrazená konfigurace tohoto měření.

Měření zpoždění podrobené této konfiguraci ukázalo, že zpoždění způsobené průchodem veřejnou sítí internet s použitím služby Dataplicity.com a nástroje pro streamování MJPG-

Streamer bylo v průměru 216 ms. V porovnání s pouhým záznamem a zobrazením videa je doba zpoždění v rámci veřejné sítě internet s přístupem skrze celulární sítě pěti násobné. To znamená, že síťová komunikace v rámci celulárních sítí a sítě internet přidává zpoždění 174 ms.



Obrázek 36 Měřicí schéma zpoždění záznamu videa a přenosu přes celulární síť



Obrázek 37 Měření zpoždění záznamu videa v rámci celulární sítě

10.1.4 Výsledky zpoždění přenosu videa

Výsledky měření zpoždění přenosu videa jsou shrnuty v tabulce 14 a ukazují zpoždění jak jednotlivých technologií, tak i celkové zpoždění od záznamu bezpilotního prostředku po zobrazení pozemní stanicí. Výsledky dokazují, že čím větší je režie přenosových sítí, tím roste i zpoždění přenosu. Pokud bereme v úvahu nejhorší možné zpoždění přenosu, tj. 216 ms v rámci celulárních sítí, což může být v případech, kdy dynamika letu například u závodních dronů na hraně přijatelnosti. Pokud ale budeme hovořit o autonomním řízení letounu, kde video přenos slouží jen ke kontrole a ne k přímému ovládní, je toto zpoždění akceptovatelné pro kontrolu vzdáleného bezpilotního prostředku.

Konfigurace	Zpoždění technologie	Celkové zpoždění systému
Pouze záznam	42 [ms]	42 [ms]
Záznam a lokální spojení WiFi	87 [ms]	129 [ms]
Záznam a veřejné spojení v rámci celulární sítě a sítě internet	174 [ms]	216 [ms]

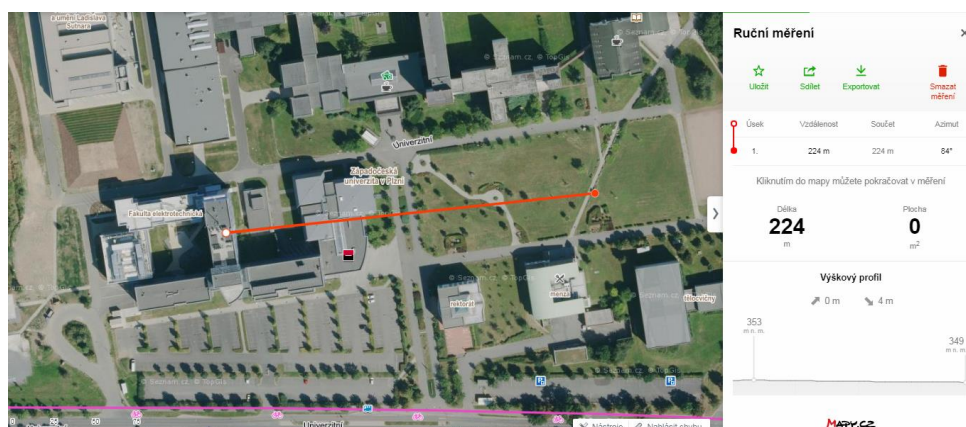
Tabulka 16 Naměřené zpoždění komunikačního systému

10.2 Test dosahu video streamu

Pro zjištění dosahu spojení komunikačního systému byly provedeny testovací přenosy videa. V prvním případě se zjišťoval dosah komunikačního systému v rámci lokální sítě WiFi. Druhé testování pak mělo ověřit dostupnost přenosu v rámci celulární sítě.

10.2.1 Dosah video streamu v rámci WiFi

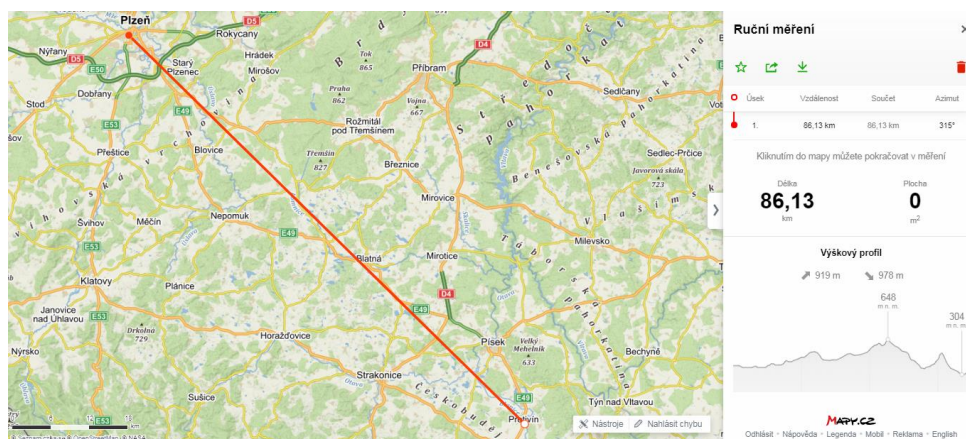
Dosah v rámci lokální sítě byl testován v areálu Západočeské univerzity. Anténní segment pozemní stanice byl umístěn na balkoně v 7. patře katedry elektrotechnické. Vyzařovací úhel antény pokrýval zelenou zatravněnou oblast před katedrou FEL, viz obr. 38. Samotný komunikační systém se pak pohyboval v rámci toho prostoru a u pozemní stanice se vyhodnocovala vizuální metodou kvalita video přenosu. Na obr. 38 je změřená reálná vzdálenost, při které byl přenos ještě dostatečně kvalitní bez viditelného zamrzávání či fragmentů v obraze. V rámci tohoto pokusu byl naměřen dosah v rámci WiFi sítě 224 m. Tato vzdálenost však mohla být ovlivněna řadou faktorů. Například se komunikační systém pohyboval na úrovni zemského povrchu a do přenosu tak negativním vlivem zasahovala vegetace. Pro korektní testy by bylo potřeba umístit systém např. na letu schopný prostředek, který by se pohyboval nad vegetací či zástavbou aby byla zajištěna vždy L.O.S. Při testu byl výkon anténního segmentu pozemní stanice nastaven na 27 dBm a byl použit 13 kanál standardu 802.11g.



Obrázek 38 Vzdálenost mezi pozemní stanicí a bezpilotním prostředkem během video streamu v rámci lokální WiFi sítě

10.2.2 Dosah video streamu v rámci celulárních sítí

Testování dosahu komunikačního systému v rámci celulárních sítí proběhlo následovně. Komunikační systém umístěný ve městě Protivín a připojený přes mobilního operátora do sítě internet posílal video záznam na vzdálený server. Z toho serveru si operátor stahoval záznam do virtuální pozemní stanice, která byla umístěna v Plzni. Na obr. 39 je znázorněna vzdálenost 86 km vysílací a přijímací strany. Při testování bylo pro přenos využita a tak ověřena schopnost jak síť 3. generace tak i síť 4. generace LTE. Video přenos v každém ze dvou testovacím přenosu měl stejné parametry tj. 640x320 při 10 fps. Tímto pokusem byla ověřena schopnost vizuální kontroly obrazu z palubní kamery bezpilotního prostředku bez vizuálního kontaktu s prostředkem samotným. Je třeba podotknout, že toto spojení je realizovatelné jen v civilizovaných krajinách, které disponují infrastrukturou pokrytí mobilního signálu sítí 3 a vyšší generace. Proto se provoz bezpilotních prostředků v oblastech bez takového pokrytí stává nepoužitelným.



Obrázek 39 Vzdálenost mezi pozemní stanicí a bezpilotním prostředkem během video streamu v rámci celulárních sítí

11 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala problematikou bezpilotních prostředků, resp. subsystému zprostředkovávající komunikaci mezi operátorem, který řídí práci prostředku prostřednictvím pozemní stanice. Cílem proto byla realizace tohoto subsystému, jak ze strany bezpilotního prostředku, tak ze strany pozemní stanice. Pro tento subsystém měl být použit vhodný modul jednodeskového počítače, na kterém byl založen komunikační systém bezpilotního prostředku a jednoduchý systém pozemní stanice, který dokázal data z

prostředku zpracovávat a poskytovat je operátorovi a prostřednictvím pozemní stanice i zadávat povely směrem k prostředku. Systém jako takový měl disponovat několika schopnostmi. V blízkém okolí pozemní řídicí stanice měl data linku komunikovat v rámci WiFi sítě. Mimo dosah hlavního komunikačního kanálu WiFi sítě měl pak disponovat schopností plynulého přechodu na komunikační kanály v rámci celulárních sítí.

Při nedostupnosti ani jedné z hlavních komunikačních sítí měl systém disponovat možností nouzové komunikace přes satelitní spojení. Systém měl zároveň oplývat ethernetovým rozhraním na obou stranách systému, tzn. jak u bezpilotního prostředku, tak i u pozemní stanice a měl umožňovat streamování full HD videa z palubní kamery. Velký důraz byl kladen na modularitu celého systému v tom smyslu, že dle potřeby měl být systém schopen rozšíření o moduly jako například barometry, akcelerometry a další. V neposlední řadě úvaha nad možnostmi budoucího vývoje pro provoz a komunikaci celého roje bezpilotních prostředků.

Práce byla rozdělena do čtyř hlavních okruhů. V prvním okruhu jsou stručně popsány technologie které, byly využívány v rámci komunikačního systému. Byla nastíněna technologie a techniky používané při komunikaci v sítích WiFi. Dále byly popsány celulární sítě respektive generace těchto sítí, které jsou prakticky použitelné pro přenos obrazu. Také je zde popsána problematika související s přenosem videa v systémech pro bezpilotní prostředky.

V poslední části prvního okruhu se zabývám problematikou související s šířením signálů v rámci členitého prostoru, jako je například zastavěná oblast a také možnosti budoucího vývoje při provozu většího počtu bezpilotních prostředků. Druhý okruh se dělí na dvě podčásti. První část řeší výběr vhodného modulu jednodeskového počítače pro samotnou stavbu systému. Právě proto je právě zde provedena rešerše na trhu dostupných jednodeskových počítačů, ale zároveň i alternativních možností schopných realizace tohoto systému. Druhá podčást pak hovoří a popisuje jednak vybraný jednodeskový počítač, ale také moduly vybrané pro implementaci do systému jednodeskového počítače, tak aby byly splněny požadavky cíle této práce. V této části byla zároveň věnována kapitola také hardwaru a softwaru pro realizaci pozemní stanice pro příjem a zpracování dat.

Třetí část této práce je věnována čistě nastavením a instalací systémů pozemní stanice a bezpilotního prostředku. Jsou zde popsány všechny nutné postupy a úskalí, pomocí kterých byl zprovozněn hardware, ale i software realizující záznam, zpracování dat, přenos a příjem se zpětným zpracováním a zobrazením operátorovi pozemní řídicí stanice. Jsou zde popsány i úskalí, se kterými se při zprovozňování konkrétního hardwaru lze setkat a jejich řešení.

V poslední čtvrté části popisují testy podrobené kompletnímu systému bezpilotního prostředku a pozemní řídicí stanice. Z testů vyplývají některé reálné parametry. Na systému bylo v praxi testováno a zjišťováno zpoždění videa z palubní kamery, přičemž

byly zároveň zjišťovány dílčí zpoždění způsobené režii použitých komunikačních technologií. Tím byla ověřena schopnost systémů, se kterými lze pracovat v reálném čase bez významnějšího zpoždění při přenosu video obrazu. Bližší informace o testech zpoždění byly uvedeny v kapitole 10.2. Dalším testem, který byl proveden, představoval reálný dosah video přenosu komunikačního systému. V rámci testů lokální sítě, které byly provedeny na půdě univerzity, byl zjištěn komunikační dosah necelých 250 metrů při vizuální viditelnosti s konfigurací systému popsané v této práci. Testy dosahu video přenosu prostřednictvím celulárních sítí a sítě internet byla ověřena schopnost komunikace na velkou vzdálenost, při které operátor nemusí mít přímou vizuální kontrolu nad prostředkem. Možnost tohoto spojení však byla závislá na dostupnosti těchto sítí v oblasti, ve které se systém pohyboval, tím pádem je toto řešení omezeno jen na oblasti s potřebnou infrastrukturou.

Výsledkem této práce byl systém schopný v reálných podmínkách předávat směrem k operátorovi pozemní řídicí stanice informace v různé podobě a druhým směrem od operátora posílat nastavení do bezpilotního prostředku prostřednictvím komunikačních technologií použitých v této práci.

Nicméně potenciál, kterým disponuje tento systém, nebyl plně využit, což dává možnost o další rozšíření toho systému. V systému nebyla implementována možnost komunikace satelitní určení polohy, se kterou lze v reálném čase a implementací do softwaru pozemní stanice vidět aktuální polohu letounu, který nemusí být v daném okamžiku s operátorem v přímém vizuálním kontaktu. Řešení však umožňuje připojení modemu satelitní sítě Iridium pro nouzový obousměrný přenos krátkých paketů, byť to nebylo z časových a finančních důvodů testováno. Dále je potřeba zaměřit se na celkovou funkčnost systému v tom smyslu aby uživatel měl co nejmenší námahu s nastavením systému a systém byl tak uživatelsky jednoduchý a nevyžadoval žádnou složitou konfiguraci před začátkem provozu systému bezpilotního prostředku.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 PŘEDSTAVA ARCHITEKTURY KOMUNIKAČNÍHO SYSTÉMU	3
OBRÁZEK 2 MAPA POKRYTÍ ČESKÉ REPUBLIKY 3G/4G MOBILNÍM SIGNÁLEM.....	8
OBRÁZEK 3 VÍCECESTNÉ ŠÍŘENÍ SIGNÁLŮ [6]	13
OBRÁZEK 4 JEDNODOSKOVÝ POČÍTAČ RASPBERRY PI 3B+.....	16
OBRÁZEK 5 JEDNODESKOVÝ POČÍTAČ NANO PI M1 PLUS [7]	17
OBRÁZEK 6 JEDNODESKOVÝ POČÍTAČ NANO PI NEO 2 PLUS [8]	18
OBRÁZEK 7 JEDNODESKOVÝ POČÍTAČ UP CORE [9].....	19
OBRÁZEK 8 JEDNODESKOVÝ POČÍTAČ UP BOARD [10]	20
OBRÁZEK 9 JEDNODESKOVÝ POČÍTAČ ASUS TINKER BOARD S [11]	21
OBRÁZEK 10 MIKROTIK RB912UAG-2HPND [12]	22
OBRÁZEK 11 LTE MODEM HUAWEI ME909U-521 MPCI EXPRESS [13].....	23
OBRÁZEK 12 MIKROTIK R11E-2HPND MINIPCI-E KARTA 802.11B/G/N [14].....	24
OBRÁZEK 13 DRAGON-LTE [15]	24
OBRÁZEK 14 KOMPLETNĚ OSAZENÝ SYSTÉM BEZPILOTNÍHO PROSTŘEDKU.....	26
OBRÁZEK 15 KOMPLETNÍ KONFIGURACE POZEMNÍ STANICE	29
OBRÁZEK 16 GRAFICKÉ ROZHŘANÍ SOFTWARE MISSION PLANNER	29
OBRÁZEK 17 ANTÉNNÍ SEGMENTY MIKROTIK	30
OBRÁZEK 18 VYZAŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY ANTÉNNÍHO SEGMENTU POZEMNÍ STANICE	31
OBRÁZEK 19 RASPBERRY PI 3B+ S POPSANÝMI VSTUPY PRO MODULY [16].....	34
OBRÁZEK 20 ÚVODNÍ OKNO PROGRAMU PUTTY	35
OBRÁZEK 21 KLIENT FILEZILLA PRO TRANSFER DAT	36
OBRÁZEK 22 ZAPOJENÝ MODUL KAMERY DO CSI PORTU.....	37
OBRÁZEK 23 MODULY POTŘEBNÉ K INSTALACI WiFi ADAPTÉRU.....	39
OBRÁZEK 24 NAKONFIGUROVANÝ INTERFACES DO MOBILNÍ SÍŤE WWAN0	41
OBRÁZEK 25 VIZUALIZACE PIPELINU GSTREAMER [17]	44
OBRÁZEK 26 ÚVODNÍ STRANA SERVERU DATAPLICITY.COM	46
OBRÁZEK 27 ZACHYTÁVÁNÍ VIDEO STREAMU PROSTŘEDNICTVÍM CELULÁRNÍ SÍŤE.....	48
OBRÁZEK 28 ÚVODNÍ OKNO APLIKACE WINBOX	49
OBRÁZEK 29 KONFIGURAČNÍ OKNO APLIKACE WINBOX PRO BEZDRÁTOVÁ ZAŘÍZENÍ.....	49
OBRÁZEK 30 OKNO PRO NASTAVENÍ SÍŤE POZEMNÍ STANICE	50
OBRÁZEK 31 NASTAVENÍ MISSION PLANNER PRO PŘÍJEM VIDEO	51
OBRÁZEK 32 MĚŘÍCÍ SCHÉMA ZPOŽDĚNÍ POUZE ZÁZNAMU VIDEO	52
OBRÁZEK 33 MĚŘENÍ ZPOŽDĚNÍ ZÁZNAMU VIDEO	52
OBRÁZEK 34 MĚŘÍCÍ SCHÉMA ZPOŽDĚNÍ ZÁZNAMU VIDEO A PŘENOSU PŘES WiFi SÍŤ	53
OBRÁZEK 35 MĚŘENÍ ZPOŽDĚNÍ ZÁZNAMU VIDEO V RÁMCI WiFi.....	53
OBRÁZEK 36 MĚŘÍCÍ SCHÉMA ZPOŽDĚNÍ ZÁZNAMU VIDEO A PŘENOSU PŘES CELULÁRNÍ SÍŤ	54

OBRÁZEK 37 MĚŘENÍ ZPOŽDĚNÍ ZÁZNAMU VIDEO V RÁMCI CELULÁRNÍ SÍTĚ.....	54
OBRÁZEK 38 VZDÁLENOST MEZI POZEMNÍ STANICÍ A BEZPILOTNÍM PROSTŘEDKEM BĚHEM VIDEO STREAMU V RÁMCI LOKÁLNÍ WiFi SÍTĚ	55
OBRÁZEK 39 VZDÁLENOST MEZI POZEMNÍ STANICÍ A BEZPILOTNÍM PROSTŘEDKEM BĚHEM VIDEO STREAMU V RÁMCI CELULÁRNÍCH SÍTÍ.....	56

Seznam tabulek

TABULKA 1 PŘEHLED STANDARDŮ IEEE 802.11	4
TABULKA 2 TECHNICKÉ PARAMETRY RASPBERRY PI 3B+.....	16
TABULKA 3 TECHNICKÉ PARAMETRY NANO PI M1 PLUS	17
TABULKA 4 TECHNICKÉ PARAMETRY NANO PI NEO 2 PLUS	18
TABULKA 5 TECHNICKÉ PARAMETRY UP CORE	19
TABULKA 6 TECHNICKÉ PARAMETRY UP BOARD	20
TABULKA 7 TECHNICKÉ PARAMETRY ASUS TINKER BOARD S	21
TABULKA 8 TECHNICKÉ PARAMETRY MIKROTIK RB912UAG-2HPND	22
TABULKA 9 TECHNICKÉ PARAMETRY DRAGON-LTE	25
TABULKA 10 TECHNICKÉ PARAMETRY WiFi MODULU	26
TABULKA 11 TECHNICKÉ PARAMETRY 3G/LTE MODULU	27
TABULKA 12 TECHNICKÉ PARAMETRY GPS MODULU	27
TABULKA 13 TECHNICKÉ PARAMETRY KAMERY	27
TABULKA 14 NAMĚŘENÉ ZPOŽDĚNÍ KOMUNIKAČNÍHO SYSTÉMU	55

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *BEZDRÁTOVÉ SÍTĚ / MICHAL PETROVIČ, MARTIN ŠIMEK. -- V PLZNI : ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA, 2013. -- VI, II, 276 S. : IL. ; 21 CM. -- NA OBÁLCE POD NÁZVEM: CISCO ACADEMY - ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. -- ISBN 978-80-261-0225-0*
- [2] H.264: Jeden standard pro všechna videa | Chip.cz - recenze a testy. *Informace, testy a novinky o hardware, software a internetu – CHIP.cz* [online]. Copyright © 2003 [cit. 07.05.2019]. Dostupné z: <https://www.chip.cz/casopis-chip/earchiv/vydani/r-2009/chip-04-2009/h-264/>
- [3] NAVRÁTIL, Petr. *Zabezpečení dat v systémech mobilních komunikací.* in *Elektrorevue*. Vol. 16. No. 2. 2014. [online]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/zabezpeceni-dat-v-systemech-mobilnich-komunikaci--data-protection-in-mobile-communication-systems/>
- [4] *GStreamer: open source multimedia framework* [online]. Copyright © [cit. 07.05.2019]. Dostupné z: <https://gstreamer.freedesktop.org/data/doc/gstreamer/head/manual/manual.pdf>
- [5] Routing and video streaming in drone networks. 302 Found [online]. Copyright © Queen Mary University of London. [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/handle/123456789/24713>
- [6] (Online převzatý obrázek): *MULTICESTA.* *techplayon.com* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: <http://www.techplayon.com/wp-content/uploads/2017/12/drone2.png>
- [7] (Online převzatý obrázek): *NANOPI MI PLUS.* *wiki.friendlyarm.com* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: http://wiki.friendlyarm.com/wiki/images/3/34/NanoPi_MI_Plus-2.jpg
- [8] (Online převzatý obrázek): *NANOPI-NEO-PLUS2.* *wiki.friendlyarm.com* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: <http://wiki.friendlyarm.com/wiki/images/a/a5/NanoPi-NEO-Plus2-layout.jpg>
- [9] (Online převzatý obrázek): *UP CORE.* *up-board.org* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: http://up-board.org/wp-content/uploads/upcore/upcore_board-layout-white.png
- [10] (Online převzatý obrázek): *UP BOARD.* *up-board.org* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: <https://up-board.org/wp-content/uploads/2018/10/layout-1024x361.png>
- [11] (Online převzatý obrázek): *ASUS TINKER BOARD S.* *asus.com* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: https://www.asus.com/media/global/gallery/Xy1ZCmZK9ckAGGBY_setting_fff_1_90_end_500.png
- [12] (Online převzatý obrázek): *MIKROTIK RB912UAG-2HPND.* *mikrotik.com* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: https://i.mt.lv/cdn/rb_images/885_1.jpg
- [13] (Online převzatý obrázek): *LTE MODEMEM HUAWEI ME909U-521.* *i4wifi.cz* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: <https://www.img4.cz/www/img/imggallery?code=NABMKR1091&sort=1&tag=enl>
- [14] (Online převzatý obrázek): *MIKROTIK R11E-2HPND MINIPCI-E KARTA 802.11B/G/N.* *mikrotik.com* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: https://i.mt.lv/cdn/rb_images/666_1.jpg
- [15] (Online převzatý obrázek): *DRAGON-LTE.* *microhardcorp.com* [online]. [cit. 22.5.2019]. Dostupný na WWW: http://www.microhardcorp.com/images/products/detail_dragon_top.png

- [16] (Online převzatý obrázek): RASPBERRY-PI3B+. [raspberrypi.org \[online\]. \[cit. 22.5.2019\].](https://projects-static.raspberrypi.org/projects/raspberry-pi-setting-up/ee7462b4ff7a246f7cddadcc3916036f5b27f004/en/images/pi-labelled.png)
Dostupný na WWW: <https://projects-static.raspberrypi.org/projects/raspberry-pi-setting-up/ee7462b4ff7a246f7cddadcc3916036f5b27f004/en/images/pi-labelled.png>

- [17] (Online převzatý obrázek): GSTREAMER. [gstreamer.freedesktop.org \[online\]. \[cit. 22.5.2019\].](https://gstreamer.freedesktop.org/documentation/tutorials/basic/images/simple-player.png)
Dostupný na WWW:
<https://gstreamer.freedesktop.org/documentation/tutorials/basic/images/simple-player.png>

- [18] (Online převzatý obrázek): NANOPI M1 PLUS. [wiki.friendlyarm.com \[online\]. \[cit. 22.5.2019\].](http://wiki.friendlyarm.com/wiki/images/3/34/NanoPi_M1_Plus-2.jpg)
Dostupný na WWW: http://wiki.friendlyarm.com/wiki/images/3/34/NanoPi_M1_Plus-2.jpg