



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní  
Ústav letecké dopravy

**Využití mobilních sítí pro přenos videa, monitoring a ovládání  
bezpilotních letadel**

**Use of mobile networks for transferring video, state monitoring and  
controlling unmanned aircraft**

**Bakalářská práce**

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Profesionální pilot

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Kušmírek

**Radim Dušek**

---

Praha 2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K621.....Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE** (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Radim Dušek**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**bakalářský – PIL – Profesionální pilot**

Název tématu (česky): **Využití mobilních sítí pro přenos videa, monitoring a ovládání UA**

Název tématu (anglicky): Use of Mobile Networks for Transferring Video, Monitoring and Controlling of UA

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je vytvořit a verifikovat funkčnost datového spojení mezi pozemní stanicí a UA za pomoci mobilních sítí, schopného oboustranného přenosu dat v reálném čase s bezpilotním letadlem v případě ztráty konvenčního RC spojení.
- Vypracujte analýzu současného stavu využití mobilních sítí pro bezpilotní systémy, stanovte hardwarová a softwarová minima.
- Sestavte a naprogramujte prototypové zařízení umožňující datové spojení letového ovladače Pixhawk s mobilní sítí.
- Ověřte ochranný mechanismus ztráty mobilního signálu praktickým testem.
- Implementujte vytvořený koncept přenosu dat na UAV typu kvadrokoptéry a vykonajte testovací let.
- Stanovte limitace vytvořeného mobilního spojení a formulujte závěry práce.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího závěrečné práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: HARA, Shinsuke a Ramjee PRASAD. Multicarrier techniques for 4G mobile communications. Boston: Artech House, 2003. ISBN 1-58053-482-1.  
KARAS, Jakub a Tomáš TICHÝ. Drony. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4680-4.  
BEAZLEY, David M. Python: referenční programátorská příručka. ISBN 80-86330

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Kušmírek**

Datum zadání bakalářské práce: **7. října 2022**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **7. srpna 2023**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
- b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Radek Dušek  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 7. října 2022

## **Poděkování**

Rád bych využil této příležitosti k vyjádření upřímného poděkování všem, kteří mě podpořili během tvorby této bakalářské práce. Nejprve bych rád poděkoval své rodině za neustálou podporu. Dále bych chtěl vyjádřit své upřímné díky mé přítelkyni, především za povzbuzení a motivaci. V neposlední řadě bych chtěl vyjádřit své hluboké díky mému vedoucímu Ing. Stanislavu Kušmírkovi za konzultace a odborné vedení k dokončení mé bakalářské práce.

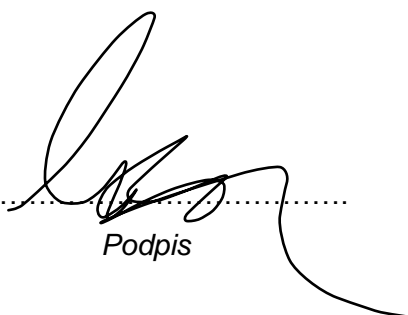


### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7. srpna 2023

  
.....  
Podpis



## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na téma využití mobilních sítí pro přenos videa, monitoring a ovládání bezpilotních letadel. Cílem práce bylo vytvoření konceptu obousměrného datového spojení v reálném čase a zkoumání, jakým způsobem lze k tomuto účelu využít mobilní sítě. Nejprve byla provedena rešerše současně využívaných komunikačních architektur a protokolů pro ovládání bezpilotních prostředků. Dalším krokem byla analýza využití mobilních sítí pro bezpilotní prostředky. Výzkum poukázal na možné využití mobilních sítí pro obousměrnou datovou komunikaci mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí. Poznatky získané z rešerše byly využity při tvorbě konceptu pro obousměrnou datovou komunikaci. K vytvoření konceptu byl využitý počítač Raspberry Pi, LTE modem, Raspberry Pi kamera a letový kontrolér Pixhawk 4. Koncept byl nakonfigurován tak, aby byl schopen obousměrné datové komunikace přes mobilní síť. Vytvořený koncept byl následně aplikován na bezpilotní prostředek typu kvadrokoptéry, na kterém bylo provedeno ověření funkčnosti a ochranných mechanismů. Dle stanovené metodiky bylo provedeno ověření rychlosti spojení a robustnosti celého konceptu. Z výsledků byly stanoveny limitace experimentálního zařízení.

**Klíčová slova:** mobilní sítě, LTE modem, monitoring, bezpilotní letadla, ovládání UAV, přenos videa v reálném čase, Raspberry Pi, Pixhawk, DJI F450



## **Abstract**

This bachelor's thesis focuses on the topic of using mobile networks for the transmission of video, monitoring, and controlling unmanned aircraft. The aim of the work was to create a concept of two-way data connection in real time, and to explore how mobile networks can be used for this purpose. First, a review of currently used communication architectures and protocols for controlling unmanned vehicles was conducted. The next step was an analysis of the use of mobile networks for unmanned vehicles. The research pointed to the possible use of mobile networks for bidirectional data communication between the unmanned vehicle and the ground station. The insights gained from the review were used in the creation of the concept for bidirectional data communication. To create the concept, a Raspberry Pi computer, LTE modem, Raspberry Pi camera, and Pixhawk 4 flight controller were utilized. The concept was configured to be capable of two-way data communication over the mobile network. The created concept was subsequently applied to an unmanned quadcopter-type vehicle, on which the functionality and protective mechanisms were verified. According to the established methodology, the connection speed and robustness of the entire concept were verified. Limitations of the experimental device were determined from the results.

**Keywords:** mobile networks, LTE modem, monitoring, unmanned aerial vehicles (UAVs), UAV control, real-time video transmission, Raspberry Pi, Pixhawk, DJI F450



## Obsah

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>12</b>
<b>Seznam použitých zkratk .....</b>	<b>13</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>14</b>
<b>1. Teoretické základy práce .....</b>	<b>15</b>
1.1 Typy komunikace pro ovládání bezpilotních prostředků .....	15
1.2 Současný stav využití mobilních sítí pro bezpilotní prostředky .....	22
1.3 Pokrytí mobilních sítí .....	24
1.3.1 Pokrytí mobilních sítí v České republice .....	25
1.3.2 Pokrytí mobilních sítí v Evropě .....	25
<b>2. Prostředky a metody .....</b>	<b>26</b>
2.1 Hardwarové komponenty experimentálního zařízení .....	26
2.1.1 Raspberry Pi .....	27
2.1.2 Raspberry Pi kamera v1.3 .....	28
2.1.3 Pixhawk 4 .....	29
2.1.4 Waveshare SIM7600E-H 4G HAT .....	30
2.2 Softwarová konfigurace experimentálního zařízení .....	31
2.2.1 Konfigurace Raspberry Pi OS a dodatečných aplikací .....	32
2.2.2 QGroundControl .....	34
2.2.3 MAVLink .....	35
2.3 Síťová konfigurace experimentálního zařízení .....	35
2.4 Hardwarové komponenty prototypového zařízení .....	39
2.4.1 Přijímač RM601 .....	41
2.4.2 3DR GPS uBlox LEA-6 V1.1 .....	42
2.4.3 Stavba prototypového zařízení .....	42
2.5 Softwarová konfigurace prototypového zařízení .....	43
2.6 Metodika ověření funkčnosti obousměrného spojení .....	44
2.6.1 Ověření funkčnosti obousměrného datového spojení .....	44
2.7 Metodika ověření ochranných mechanismů .....	45





2.7.1	Ověření ochranných mechanismů .....	46
2.8	Metodika ověření ztráty paketů a odezvy .....	46
2.8.1	Ověření ztráty paketů a odezvy .....	47
<b>3.</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>48</b>
3.1	Výsledky ověření funkčnosti obousměrného spojení .....	48
3.2	Výsledky ověření ochranných mechanismů.....	48
3.3	Výsledky ověření ztráty paketů a odezvy.....	48
<b>4.</b>	<b>Diskuse .....</b>	<b>50</b>
4.1	Možná vylepšení komunikace a konektivity .....	50
4.1.1	Vylepšení na úrovni 1. vrstvy ISO/OSI .....	50
4.1.2	Bezpečnostní vylepšení .....	50
4.2	Zhodnocení výsledků .....	51
<b>5.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>52</b>
<b>6.</b>	<b>Reference .....</b>	<b>53</b>



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Typy komunikační architektury .....	16
Obrázek 2: Centralizovaná architektura.....	17
Obrázek 3: Decentralizovaná architektura .....	18
Obrázek 4: Víceskupinová decentralizovaná architektura.....	19
Obrázek 5: Vícevrstvá skupinová decentralizovaná architektura .....	20
Obrázek 6: Typy komunikačních protokolů .....	20
Obrázek 7: Graf závislosti ztráty paketů na výšce .....	22
Obrázek 8: Stanovená a reálná letová trasa.....	23
Obrázek 9: DJI Cellular Dongle .....	24
Obrázek 10: T-Mobile pokrytí 4G.....	25
Obrázek 11: Schéma experimentálního a prototypového zařízení .....	26
Obrázek 12: Základní schéma experimentálního zařízení .....	27
Obrázek 13: Raspberry Pi 4 Model B .....	28
Obrázek 14: Raspberry Pi kamera verze 1.3 .....	29
Obrázek 15: Pixhawk 4.....	30
Obrázek 16: SIM7600E-H 4G HAT .....	31
Obrázek 17: Základní schéma obousměrné komunikace .....	32
Obrázek 18: Schéma softwarové konfigurace experimentálního zařízení .....	32
Obrázek 19: Ověření spojení Raspberry Pi a Pixhawk 4 .....	33
Obrázek 20: Konfigurace T-Mobile sítě .....	34



Obrázek 21: MAVLink protokol .....	35
Obrázek 22: Schéma konektivity .....	36
Obrázek 23 : Model ISO / OSI a TCP/IP .....	37
Obrázek 24: Schéma TCP/IP komunikace.....	38
Obrázek 25: Ověření UDP konektivity nástrojem TCPView .....	39
Obrázek 26: Trasování IP hostitelů mezi klientem a serverem .....	39
Obrázek 27: Schéma HW zapojení .....	40
Obrázek 28: Přijímač RM601.....	41
Obrázek 29: GPS LEA-6 .....	42
Obrázek 30: Hotový prototyp typu kvadrokoptéry .....	43
Obrázek 31: Konfigurace QGroundControl.....	44
Obrázek 32: Ověření funkčnosti obousměrného spojení .....	45
Obrázek 33: Schéma ověřených ochranných mechanismů .....	46
Obrázek 34: Status MAVLink komunikace v aplikaci QGroundControl .....	46
Obrázek 35: Ověření ztráty paketů LTE a WI-FI.....	47
Obrázek 36: Ověření odezvy mezi pozemní stanicí a experimentálním zařízením .....	47
Obrázek 37: 5G měření odezvy .....	49
Obrázek 38: Princip připojení s využitím VPN a bez.....	51



---

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Radiové frekvence CDL .....	21
--	----



---

## Seznam použitých zkratk

BLOS – mimo dosah zorného pole

UAV – bezpilotní letecký prostředek

HW – hardwarová součástka

SW – softwarová součástka

RC – dálkové ovládání

WIFI – bezdrátová síť

NATO – Severoatlantická organizace

IMU – inerciální měřicí jednotka

PWM – modulace šířky pulsu

PPM – modulace polohy pulsu

GS – pozemní stanice



## Úvod

Motivací výběru tématu této bakalářské práce bylo vytvoření konceptu obousměrného datového spojení pozemní stanice a bezpilotního prostředku, který by nejen zajišťoval spojení v případě výpadku konvenčního radiového spojení, ale také přinášel další výhody. Jedná se o koncept, který implementuje další bezpečnostní prvek na bezpilotní letouny a přináší i výhody v podobě přenosu videa v reálném čase, podrobný monitoring telemetrický dat a v neposlední řadě ovládání bezpilotního prostředku. Cílem bakalářské práce je vytvoření experimentálního zařízení schopného obousměrného datového spojení a jeho implementace na prototypové zařízení.

V současné době je toto téma velmi aktuální, především kvůli rostoucím požadavkům na spolehlivost, efektivitu a bezpečnost komunikace mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí. Práce se zabývá otázkami, zdali jsou mobilní sítě vhodným řešením pro obousměrnou datovou komunikaci mezi pozemní stanicí a bezpilotním prostředkem. Práce zahrnuje analýzu současného stavu, stanovení hardwarového a softwarového minima pro experimentální i prototypové zařízení. Dále metody ověření funkčnosti obousměrného spojení přes mobilní sítě, stanovení limitací a zhodnocení výsledků. Na závěr byla stanovena možná vylepšení experimentálního zařízení a porovnání výsledků komunikace přes LTE a WI-FI.



## 1. Teoretické základy práce

### 1.1 Typy komunikace pro ovládání bezpilotních prostředků

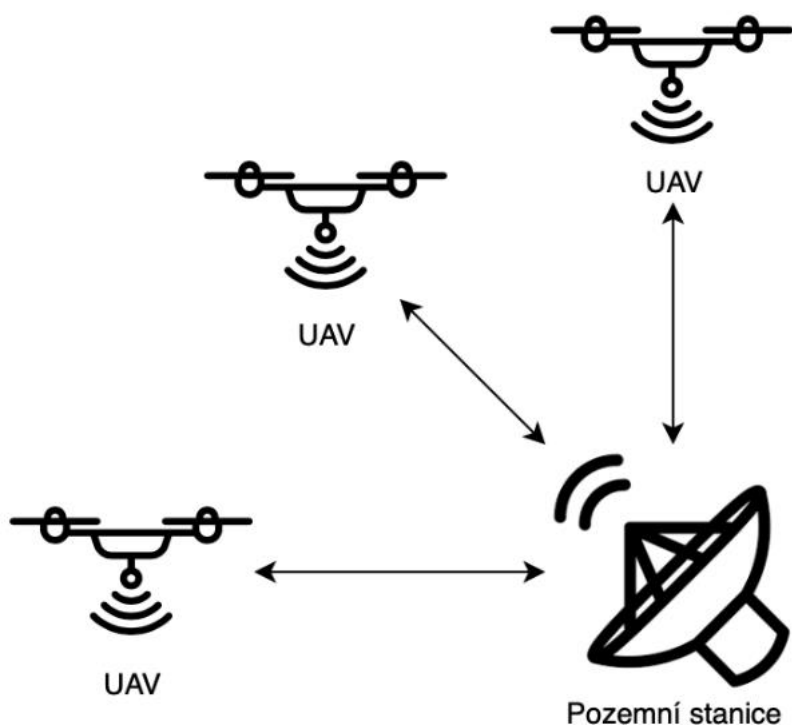
Moderní bezpilotní prostředky využívají širokou škálu bezdrátových forem komunikace pro ovládání, přenos telemetrických dat, případně videa. Komerční bezpilotní prostředky, které jsou běžně dostupné, využívají pro bezdrátové spojení nejčastěji 2,4 GHz, případně 5 GHz kanály. Jejich hlavní nevýhodou je omezený dosah. Fungují na principu bod-bod vzduch-země (point-to-point air-ground). V tomto ohledu je samotný dosah bezpilotního prostředku omezen především polohou bezdrátové vysílačky. Velmi často dochází k zarušení 2,4 GHz, nebo 5 GHz pásma, a to především ve městech z důvodu zahlcení tohoto pásma. Toto bezdrátové spojení je také náchylné na externí zarušení, například za pomoci softwarově definovaného rádia. Další forma komunikace používána pro ovládání bezpilotních prostředků je WI-FI. Jedná se o levné řešení využívané především u bezpilotních prostředků, kde není příliš velký požadavek na dosah spojení a rychlou odezvu. V nekomerčním sektoru se využívají datové linky, satelitní komunikace, případně velmi pokročilé inerční systémy. Datové linky jsou primárním způsobem komunikace. Umožňují ovládání, přenos telemetrických a navigačních dat. Výhodou je rychlá a spolehlivá komunikace s nízkou odezvou. Nevýhody tvoří především omezený dosah a náchylnost na zarušení. Satelitní systémy se používají v případech nedostupnosti radiového spojení, případně pro komunikaci na velké vzdálenosti. Výhodou je globální pokrytí a příjem přesných navigačních informací. Nevýhodou je pomalejší a méně spolehlivé spojení než při využití datové linky, náchylnost na rušení a velká energetická náročnost. Inerční systémy využívají k určení polohy měření akcelerace a otáčení. Ve většině případů se využívají jako doplněk k jiným navigačním systémům například GPS. Výhodou je nemožnost zarušení a vysoká přesnost na krátké časové intervaly. Nevýhodou je kumulace chyb, které vedou ke snížení přesnosti v čase. Inerční zařízení bývají velmi těžká a energeticky náročná, takže nejsou vhodná pro menší bezpilotní prostředky. S komunikací pro ovládání bezpilotních prostředků souvisí také různé druhy komunikačních architektur (Obrázek 1). Komunikační architektura specifikuje průběh komunikace mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí, případně dalším bezpilotním prostředkem. Existuje velké množství různých komunikačních architektur, každá má své výhody a nevýhody. Výběr vhodné komunikační architektury zaleží na potřebách pro dané využití.



Obrázek 1: Typy komunikační architektury

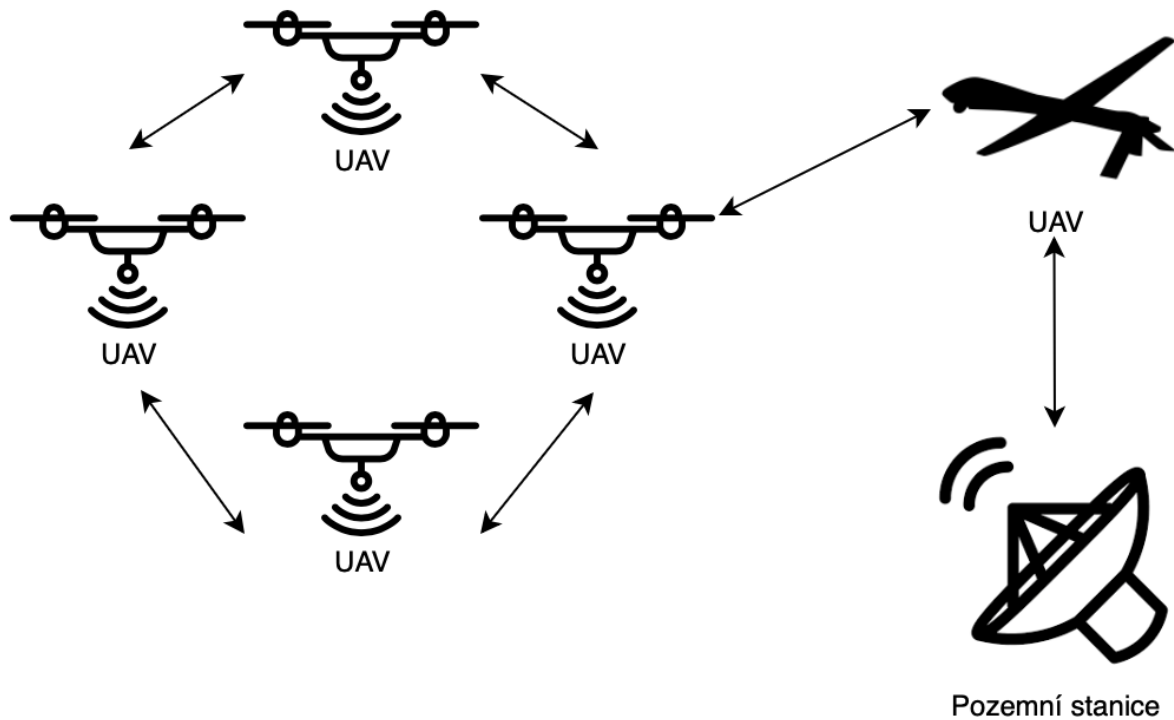
Centralizovaná architektura zajišťuje spojení každého bezpilotního prostředku nezávisle na sobě s pozemní stanicí, viz Obrázek 2. Jedná se o jednu z nejčastěji využívaných topologií. Bepilotní prostředky nemohou komunikovat mezi sebou napřímo, ale pouze přes pozemní stanici. Výhodou je poměrně nízká odezva při komunikaci UAV a pozemní stanice. Naopak komunikace mezi dvěma UAVs bude mít odezvu již horší, a to z důvodu nutnosti využití pozemní stanice. Další nevýhodou je nutnost využití pokročilých radiových zařízení, aby byl zajištěn dostatečný dosah. Taková zařízení bývají poměrně velká a těžká, zároveň mají také velkou spotřebu energie. Z tohoto důvodu není toto řešení vhodné pro malé bezpilotní prostředky. V případě výpadku pozemní stanice dojde k selhání celého systému. (Li, Zhou, Lamont, 2013) Centralizovaná architektura je také využita ve studii zabývající se centralizovanou datově orientovanou komunikační architekturou mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí pro sledování davu. Vytvořený koncept využívá centralizovanou architekturu pro komunikaci s bezpilotním prostředkem, ale navíc implementuje prvek rozhodování pozemní stanice, zdali má bezpilotní prostředek danou zprávu odeslat prioritně. Rozhodovací proces je založen na aktuálnosti odesílaných dat a jejich prioritě. Pozemní stanice není omezena výpočetním výkonem ani energií, proto provádí rozhodovací proces. Tato implementace umožňuje efektivní využití pásma, například pro přenos videa, pro sledování davu. Zároveň se jedná o způsob, jak využít i menší bezpilotní prostředky při využití centralizované architektury. (Chen et al., 2020, Chriki et al., 2019)





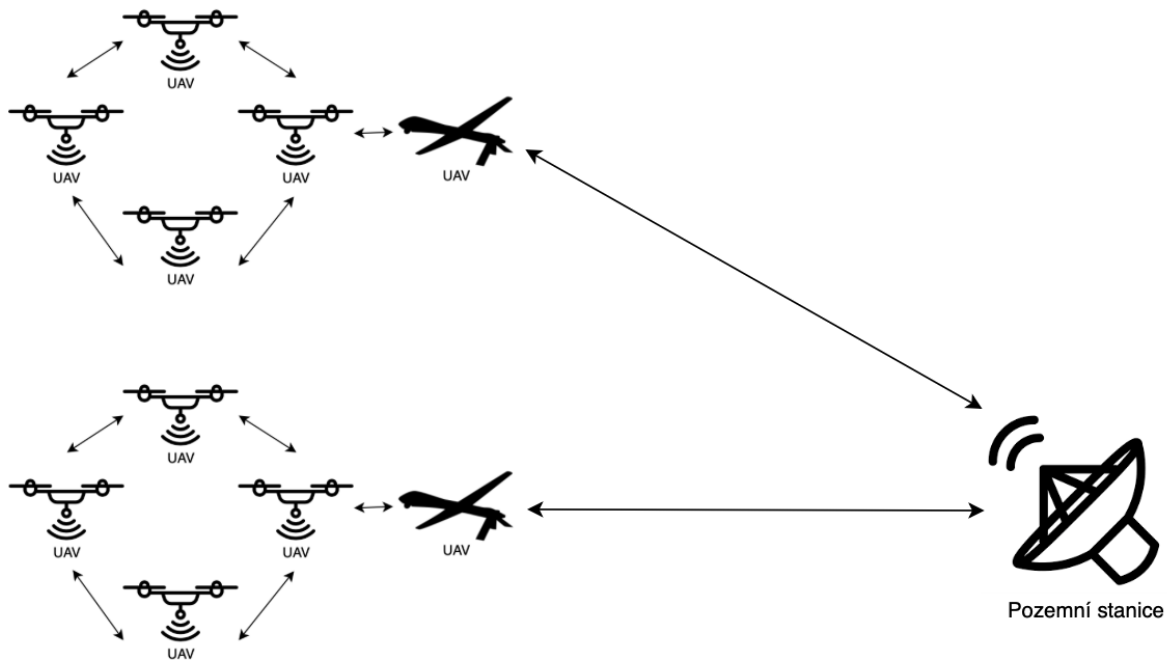
Obrázek 2: Centralizovaná architektura

Decentralizovaná architektura (Obrázek 3) je založena na principu komunikace jednotlivých bezpilotních prostředků mezi sebou. Komunikace může probíhat napřímo nebo přes další bezpilotní prostředek. Spojení s pozemní stanicí je zajištěno pomocí jednoho bezpilotního prostředku, který musí být vybaven dvěma rádii. Jedno rádio slouží pro komunikaci s pozemní stanicí a druhé zajišťuje spojení s bezpilotními prostředky. Výhodou této architektury je velký dosah, při zachování malé hmotnosti jednotlivých bezpilotních prostředků. Vhodná je však pouze pro operace, kdy mají bezpilotní prostředky podobný cíl, aby byla zajištěna konektivita celého systému. (Li, Zhou, Lamont, 2013) Decentralizovaná síť je vhodná pro mise, kdy je třeba zajistit spojení na velké vzdálenosti bez pozemní infrastruktury. Příklad využití je monitoring lesních požárů, kdy se využije balonů pro zajištění spojení mezi pozemní stanicí a samotným bezpilotním prostředkem, který monitoruje lesní požáry. V případě lesních požárů dochází k poškození pozemní infrastruktury, proto je toto řešení vhodné a efektivní. (Barrado et al., 2010)



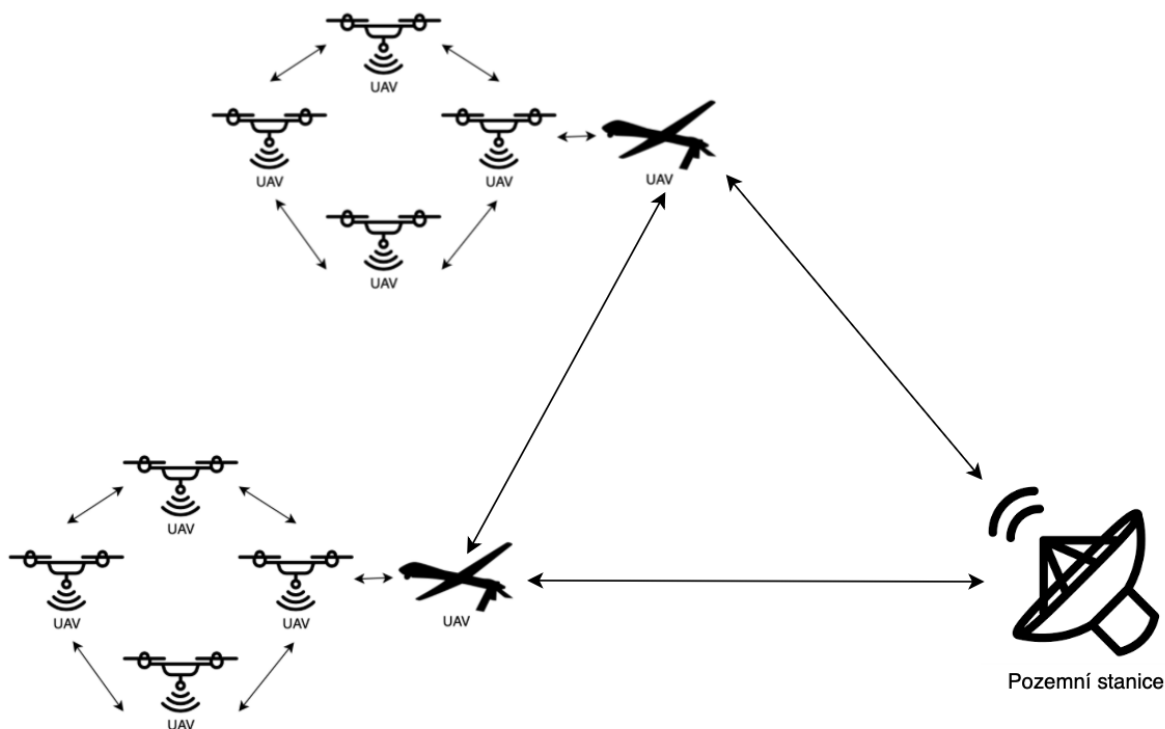
Obrázek 3: Decentralizovaná architektura

Víceskupinová decentralizovaná architektura (Obrázek 4) je založena na stejném principu, ale je tvořena více skupinami bezpilotních prostředků. Každá skupina má jeden dedikovaný bezpilotní prostředek, který zajišťuje komunikaci s pozemní stanicí. Ve skupině mohou UAVs komunikovat navzájem. S jinou skupinou je poté možné komunikovat přes pozemní stanici. Tato infrastruktura je vhodná pro mise s velkým množstvím bezpilotních prostředků, avšak není příliš robustní z důvodu nemožnosti komunikace mezi jednotlivými skupinami napřímo bez využití pozemní stanice. Jedná se v podstatě o kombinaci centralizované a decentralizované architektury. (Li, Zhou, Lamont, 2013)



Obrázek 4: Víceskupinová decentralizovaná architektura

Vícevrstvá skupinová decentralizovaná architektura je nejpokročilejší infrastruktura. Jedná se o robustní systém, který úplně neselže při výpadku jakékoliv části. Od víceskupinové decentralizované architektury se liší v možnosti komunikace jednotlivých skupin napřímo bez využití pozemní stanice, viz Obrázek 5. Tato infrastruktura je vhodná pro velké množství bezpilotních prostředků. (Li, Zhou, Lamont, 2013)



Obrázek 5: Vícevrstvá skupinová decentralizovaná architektura

Pro zajištění komunikace mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí byly vyvinuty komunikační protokoly. Existuje mnoho typů komunikačních protokolů (Obrázek 6). Komunikační protokoly standardizují formu komunikace, udávají formát dat, využití kanály, způsob přenosu dat a jeho zabezpečení.



Obrázek 6: Typy komunikačních protokolů



CDL (Common Data Link) je zabezpečený komunikační protokol, který byl vyvinut v roce 1991. Umožňuje obousměrnou komunikaci mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí. Radiové frekvence tohoto protokolu jsou uvedeny v Tabulce 1. (Li, Zhou, Lamont, 2013)

	Pásmo X	Pásmo Ku
Frekvence směrového signálu země-vzduch	9.750 - 9.950 GHz	15.15 - 15.35 GHz
Frekvence směrového signálu vzduch-země	10.150 - 10.425 GHz	14.40 - 14.83 GHz
Anténa na palubě bezpilotního prostředku	7 nebo 9 palcová směrová anténa	
Pozemní anténa	1 m nebo 6 ft směrová anténa	

Tabulka 1: Radiové frekvence CDL

TCDL (Tactical Common Data Link) je zabezpečený komunikační protokol pro odesílání multimediálních dat z bezpilotních prostředků na pozemní stanici. Dosah point-to-point komunikace při využití TCDL je až 300 mil. (Li, Zhou, Lamont, 2013)

Link-11 byl vytvořen NATO jako taktické digitální informační spojení. Link-11 pracuje v pásmu HF 3-30 MHz a UHF 225-400 MHz. Jedná se o komunikační spojení s malou šířkou pásma, které poskytuje shrnutí polohových a situačních informací od bezpilotních prostředků. (Li, Zhou, Lamont, 2013)

Link-16 je taktické datové spojení odolné proti rušení. Pracuje v pásmu L 969-1206 MHz. Byl vyvinut NATO na základě technologií z roku 1970. Link-16 je primárně využíván pro komunikaci země – vzduch, vzduch – vzduch, ale může být využitý i pro pozemní komunikaci. Link-16 poskytuje datovou komunikaci téměř v reálném čase, ochranu proti zarušení a zabezpečení. Datový přenos je relativně omezený, proto není možný přenos obrázků nebo multimediálních dat. Další nevýhodou je velká hmotnost vybavení nutného pro Link-16 komunikaci, proto toto spojení není vhodné pro malé bezpilotní prostředky. Cena instalace takového zařízení na bezpilotní prostředek je kolem půl milionu dolarů. (Li, Zhou, Lamont, 2013)

Link-22 je zabezpečený radiový systém NATO, který poskytuje komunikaci na velké vzdálenosti (BLOS). Jedná se o náhradu systému Link-11, zároveň zachovává spolupráci s Link-16. Zachovává tedy technické specifikace Link-16. Link-22 může rozšířit automaticky svůj dosah použitím jiných komunikačních uzlů, a to zcela bez zásahu operátora. Link-22 pracuje v pásmu HF a UHF. (Li, Zhou, Lamont, 2013)

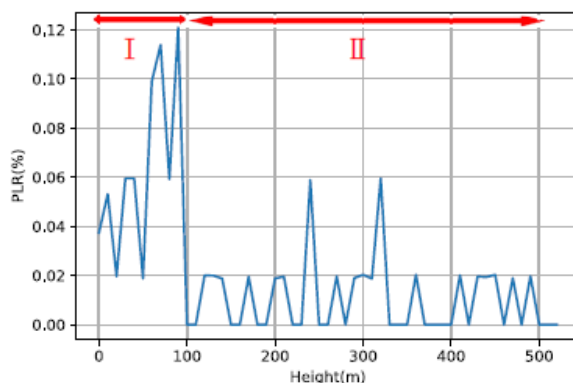
## 1.2 Současný stav využití mobilních sítí pro bezpilotní prostředky

Mobilní sítě jsou jedním z řešení problému air-ground komunikace na velké vzdálenosti. Operátorovi bezpilotního prostředku, který je připojený v mobilní síti toto řešení umožní ovládat daný prostředek odkudkoliv skrze internetové připojení. LTE mobilní síť je v dnešní době velmi rozšířená, a především její pokrytí umožňuje její využití pro air-ground komunikaci. Využití mobilních sítí pro air-ground komunikaci představuje efektivní způsob ovládání bezpilotního prostředku v případě zarušení či výpadku konvenčního ovládání. Ve velkých aglomeracích může docházet velmi často k rušení bezdrátového spojení na 2,4 GHz, případně 5 GHz z důvodu velkého zahlcení tohoto frekvenčního rozsahu.

V roce 2018 byla provedena studie zabývající se měřením a analýzou ztráty paketů při využití 4G sítě pro air-ground komunikaci. Měření bylo provedeno na Univerzitě Xi'an Jiaotong celkem 3x, vždy po dobu 15 minut. Výsledky byly zaznamenány jak do lokálního úložiště zařízení umístěného na bezpilotním prostředku, tak na serveru, kam byla s frekvencí 200 Hz odesílána měřená data. Celkem bylo ztraceno 7 paketů z 557 693. (Chen et al., 2018)

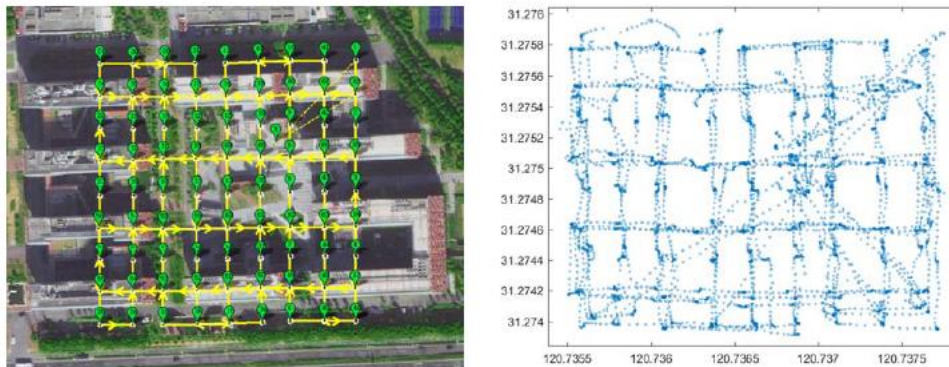
Samotný experiment byl rozdělen do dvou částí. První část experimentu byla věnována ztrátě paketů v závislosti na změně výšky. Druhá část se věnovala efektu změny horizontální polohy na ztrátu paketů. (Chen et al., 2018)

Pro zjištění vlivu výšky na ztrátu paketů byla provedena celkem tři měření, při kterých byl dron fixovaný v horizontální rovině a pomalu stoupal do výšky 500 m. V první fázi do výšky 100 m byla pozorována větší ztráta paketů z důvodů interference u země. I tak byla ztráta paketů ve vertikální rovině téměř zanedbatelná, viz Obrázek 7. (Chen et al., 2018)



Obrázek 7: Graf závislosti ztráty paketů na výšce

Pro stanovení ztráty paketů v horizontální rovině byla stanovena letová trasa uvnitř čtverce o straně 200 m, viz Obrázek 8. Měření bylo provedeno v různých výškách pod 120 m. Vertikální poloha měla v případě tohoto experimentu značný vliv na ztrátu paketů, toto však bylo očekáváno z předchozího experimentu. Na rozdíl od vertikálního experimentu byly v tomto případě zaznamenány signifikantní změny ve ztrátě paketů v závislosti na horizontální poloze. Z výsledků vyplývá, že ztráta paketů je závislá na signálu. Při poklesu signálu bylo naměřeno více ztracených paketů. (Chen et al., 2018)



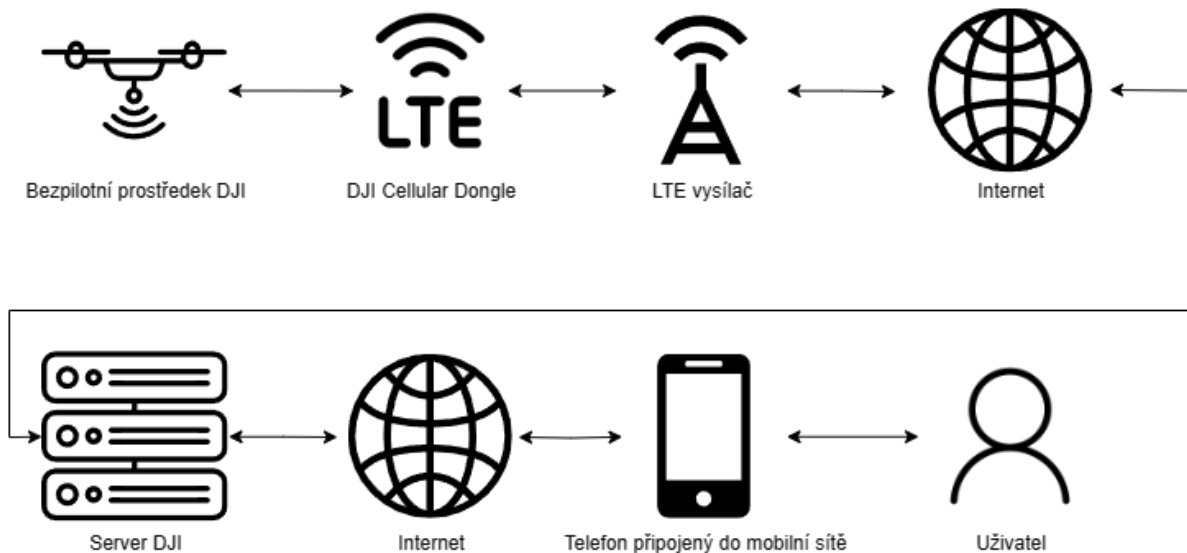
Obrázek 8: Stanovená a reálná letová trasa

Z výsledků dané studie vychází, že využití 4G mobilní sítě je vhodné pro air-ground komunikaci v malých výškách. Experiment také ukazuje, že ve vertikální rovině téměř nedochází ke ztrátě paketů. V horizontální rovině je ztráta paketů závislá především na síle signálu. (Chen et al., 2018)

DJI Cellular Dongle je jednou ze současných realizací air-ground komunikace za pomoci 4G sítě. Jedná se o komerční řešení, které je ovšem dostupné pouze v Číně, a to především z legislativních důvodů. Hlavním účelem tohoto modulu, který umožňuje připojení dronu do mobilní sítě, je redundance ovládání a přenosu videa. Umožňuje uživateli plynulý přechod z konvenčního RC ovládání na ovládání přes 4G při ztrátě spojení. DJI využívá k tomuto spojení své vlastní servery. Za tuto službu uživatelé platí měsíční předplatné. V případě horšího signálu mobilní sítě, do které je modul připojený, je automaticky potlačen přenos videa, aby bylo zajištěné ovládání. (Cepeda, 2023)

Na Obrázku 9 je zjednodušené schéma principu operace DJI Cellular Dongle. K bezpilotnímu prostředku od firmy DJI je připojený DJI Cellular Dongle, který zajišťuje přístup do internetu přes LTE spojení. Pro zajištění obousměrné komunikace využívá DJI vlastní servery, ke kterým se připojuje uživatel i bezpilotní prostředek. Uživatel potřebuje ke spojení chytrý

telefon připojený k internetu, aby mohl navázat spojení se serverem DJI. Toto řešení je funkční, ale z hlediska síťové infrastruktury ne příliš ideální, jelikož může docházet k velkému zpoždění přenosu dat.



Obrázek 9: DJI Cellular Dongle

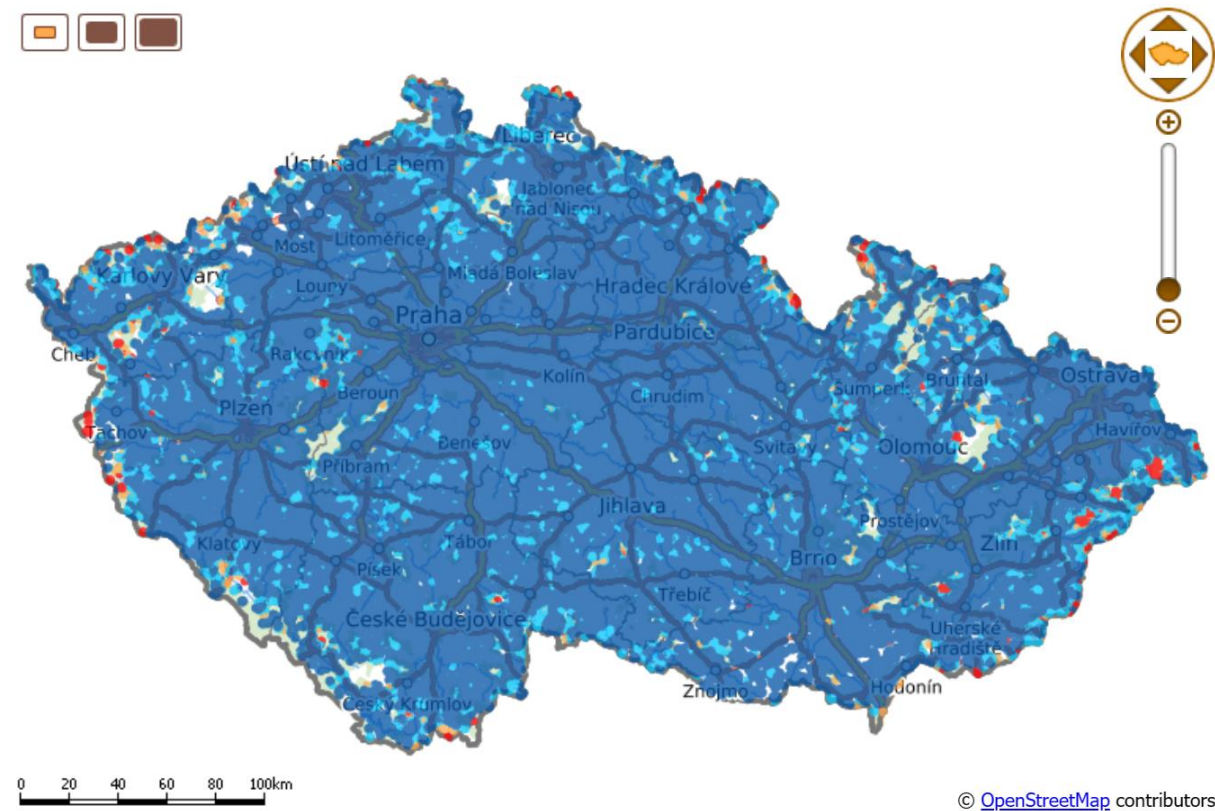
### 1.3 Pokrytí mobilních sítí

Jedním ze zásadních faktorů využití mobilních sítí pro air-ground komunikaci je pokrytí daného území. Obecně pokrytí mobilními sítěmi je velmi odlišné v každé zemi. Také velmi záleží na daném poskytovateli. Poskytovatelé cílí především na pokrytí populace, aby zajistili dostupnost mobilních služeb. Pokrytí území je měřeno v procentech pokrytí geografického území a populace. Geografické pokrytí udává procento celkového území, které je pokryté mobilní sítí. Pokrytí populace naopak udává procento populace, která má přístup k mobilní síti. Ve vyspělých zemích je pokrytí území mobilními sítěmi obecně na velmi dobré úrovni. Většina poskytovatelů udává pokrytí populace nad 90 %. Bohužel především v zemích třetích stran může být pokrytí velmi špatné, případně nemusí vůbec existovat. Jedná se především o odlehlá místa a místa s nízkou zalidněností. Dalším faktorem, který zásadně ovlivňuje pokrytí, je infrastruktura a umístění vysílačů. S tím souvisí i národní regulace. Topografie území se také velmi podílí na pokrytí daného území. Poskytovatelé se stále snaží rozšiřovat pokrytí za účelem vylepšení služeb a získání nových zákazníků.



### 1.3.1 Pokrytí mobilních sítí v České republice

Pokrytí České republiky je jedno z nejlepších na světě. Dle Českého telekomunikačního úřadu (ČTU) pokrytí populace 4G/LTE mobilní sítí činí 99,5 %. Geografické pokrytí je 98,8 %. V České republice jsou tři hlavní poskytovatelé mobilních sítí, jedná se o T-Mobile, Vodafone a O2. Každý z těchto poskytovatelů má vlastní infrastrukturu. Mapa pokrytí (Obrázek 10) je k dispozici na webových stránkách ČTU. (ČTU, 2023)



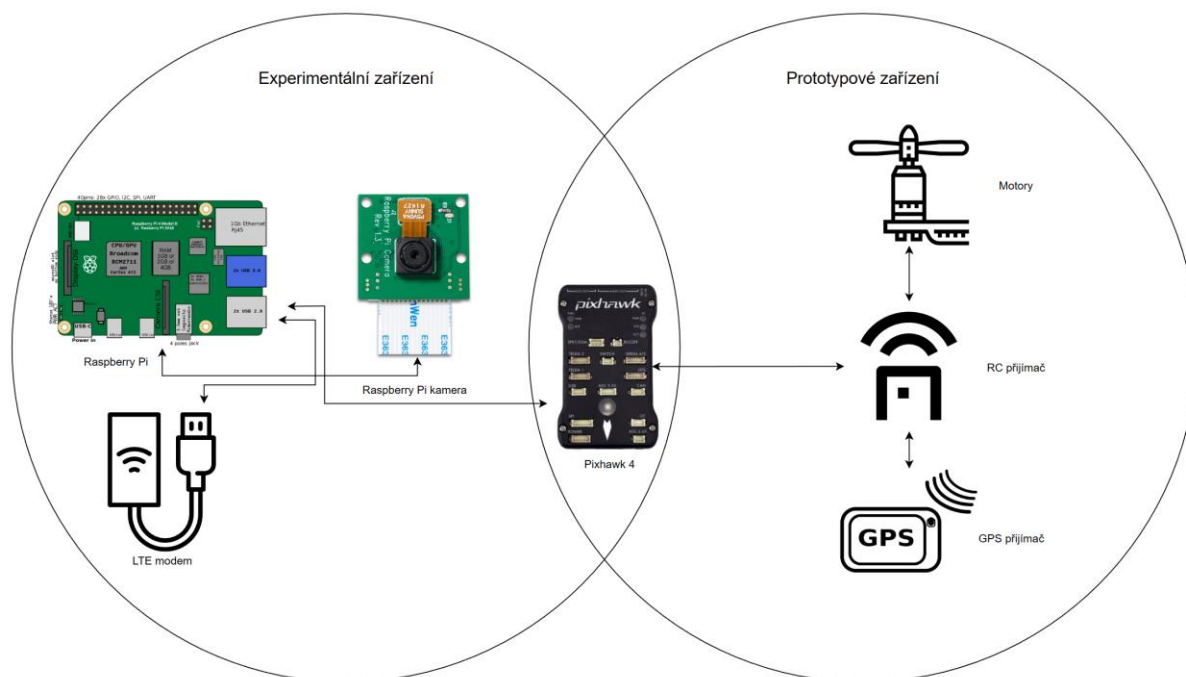
Obrázek 10: T-Mobile pokrytí 4G

### 1.3.2 Pokrytí mobilních sítí v Evropě

Pokrytí mobilních sítí v Evropě je obecně na velmi dobré úrovni. Infrastruktura je celkově velmi rozvinutá a pokrývá velkou část kontinentu. Většina Evropských zemí je pokryta 4G sítěmi. V odlehlých oblastech mimo populaci může být pokrytí omezené. Dalším faktorem jsou terénní a geografické faktory.

## 2. Prostředky a metody

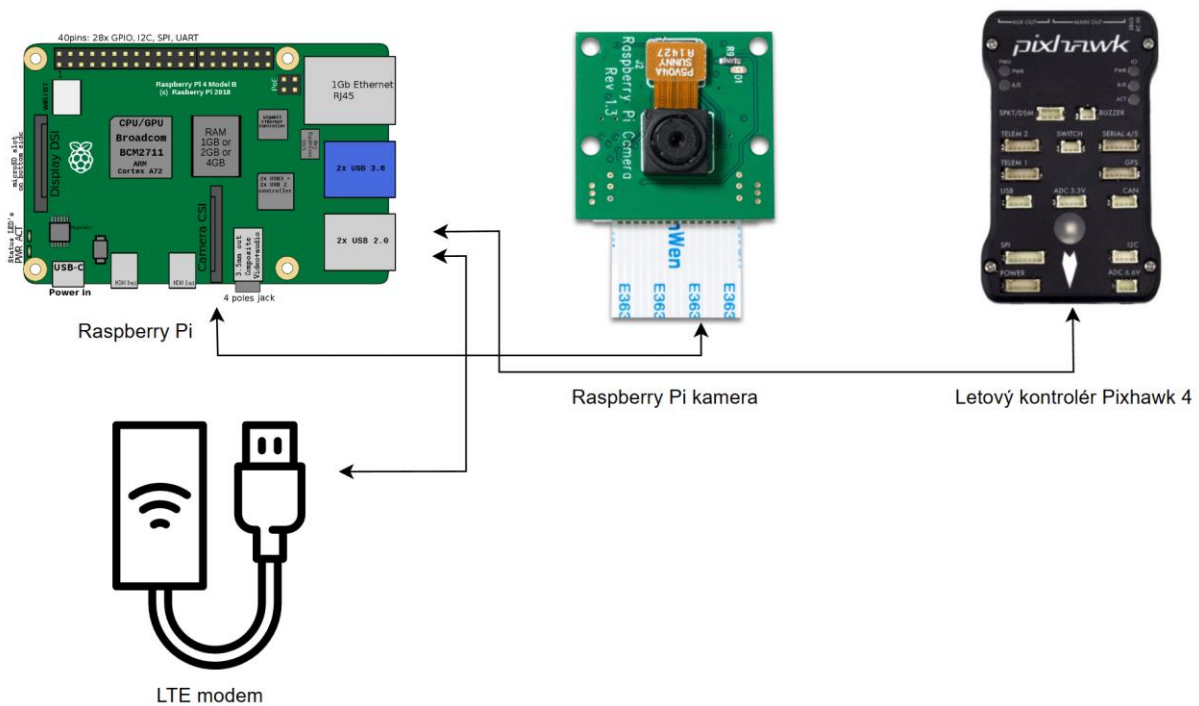
Tato kapitola se zabývá použitými prostředky a metodami ke splnění cílů bakalářské práce. Hardwarová a softwarová kapitola je rozdělena na prostředky a metody využitě pro stavbu experimentálního zařízení a prototypového zařízení. Na obrázku 11 je schéma prototypového a experimentálního zařízení. Jedná se o dvě nezávislá zařízení, která společně využívají pouze letový kontrolér Pixhawk 4.



Obrázek 11: Schéma experimentálního a prototypového zařízení

### 2.1 Hardwarové komponenty experimentálního zařízení

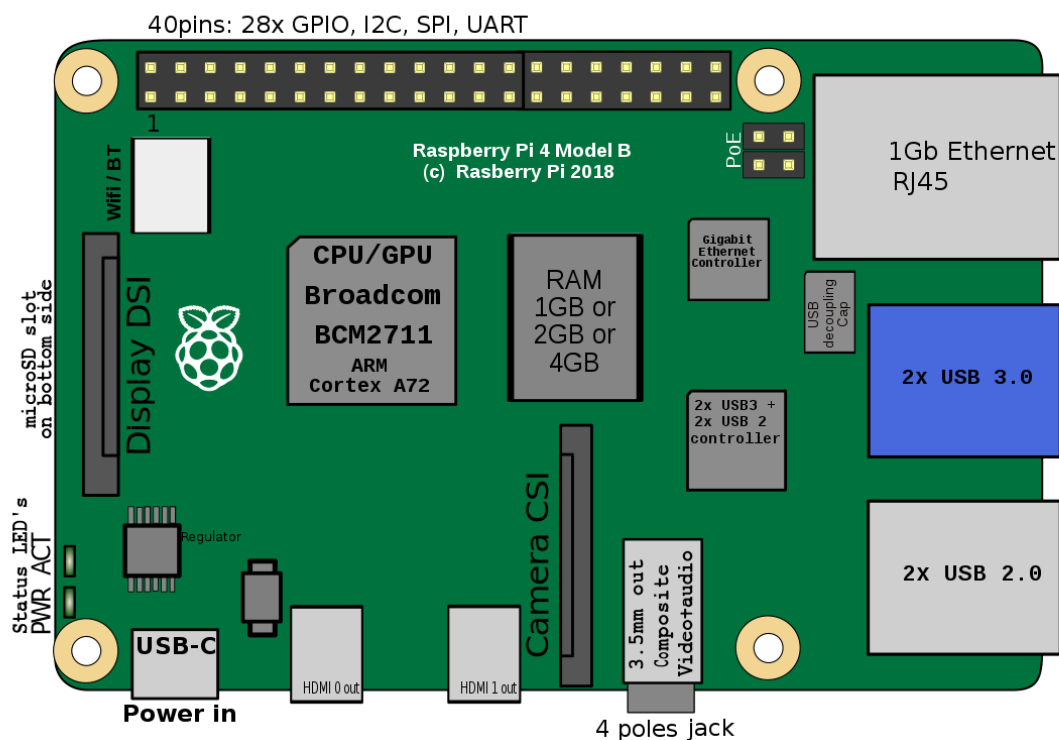
Pro stavbu experimentálního zařízení byl zvolen mikropočítač Raspberry Pi, LTE modem Waveshare pro zajištění konektivity do internetu, letový kontrolér Pixhawk 4 a Raspberry Pi kamera verze 1.3. Základní schéma propojení jednotlivých prvků experimentálního zařízení je znázorněné na obrázku 12. Tyto komponenty byly zvoleny na základě jejich běžné dostupnosti a vzájemné kompatibility.



Obrázek 12: Základní schéma experimentálního zařízení

### 2.1.1 Raspberry Pi

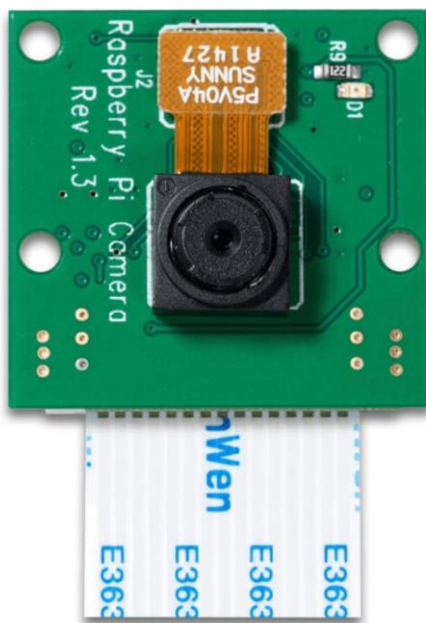
Raspberry Pi 4 Model B (Obrázek 13) je jednodeskový počítač postavený na architektuře ARM. Pro experimentální zařízení byl vybrán hned z několika důvodů. Jedná se o velmi populární vývojový nástroj, a to především kvůli velkému množství vstupů a výstupů pro připojení periferních zařízení, zároveň nabízí velkou podporu operačních systémů a knihoven. Raspberry Pi 4 Model B disponuje procesorem Broadcom BCM2711. Jedná se o čtyřjádrový ARM procesor s pracovní frekvencí 1.8 GHz, který zajišťuje dostatečný výkon pro přenos videa, MAVLink komunikaci a připojení do sítě. Pro stavbu experimentálního zařízení jsem využil verzi s 8 GB RAM. Konektivitu mezi dalšími prvky experimentálního zařízení zajišťuje GPIO konektor, USB a konektor pro připojení kamery. (Raspberry Pi Hardware, 2023)



Obrázek 13: Raspberry Pi 4 Model B

### 2.1.2 Raspberry Pi kamera v1.3

Video snímačem pro experimentální zařízení byla zvolena Raspberry Pi kamera verze 1.3 (Obrázek 14). Jedná se již o starší model, ale pro účely testování naprosto dostačující. Raspberry Pi kamera je kamerový modul navržený přímo pro nativní použití s počítačem Raspberry Pi. Zároveň disponuje malými rozměry, takže je vhodný právě i pro použití na bezpilotní prostředky. Propojení kamery s Raspberry Pi je zajištěno pomocí 15 pinového plochého vodiče. Raspberry disponuje tímto portem přímo na samotné základní desce. Kamera disponuje 5 megapixelovým obrazovým snímačem, který umožňuje snímání videa o rozlišení 1920x1080p při 30 snímcích za sekundu.



Obrázek 14: Raspberry Pi kamera verze 1.3

### 2.1.3 Pixhawk 4

Pixhawk 4 (Obrázek 15) byl zvolen jako letový kontrolér pro experimentální zařízení. Jedná se o letový kontrolér pro bezpilotní prostředky, který nabízí kompatibilitu se softwarem QGroundControl. Pixhawk 4 je založen na mikrokontroleru STM32F735, který je založený na jádru ARM Cortex-M7 s frekvencí 216 MHz. Tento poměrně výkonný procesor umožňuje rychlé a efektivní zpracování dat. Letový kontrolér Pixhawk má integrované inerciální senzory, akcelerometr, gyroskop a barometrický tlakový senzor. IMU (Inertial Measurement Unit) InvenSense ICM-20689 zajišťuje za pomoci měření zrychlení, úhlové rychlosti a magnetického pole, přesné informace o poloze bezpilotního prostředku. Akcelerometr a gyroskop Bosh BMI055 doplňuje IMU těmito dvěma senzory. Slouží k zajištění orientace bezpilotního prostředku v prostoru. Akcelerometr měří zrychlení ve všech třech osách, poskytuje tedy informace o změnách rychlosti a směru bezpilotního prostředku. Gyroskop slouží k měření úhlové rychlosti rotace bezpilotního prostředku ve všech osách (X, Y, Z), zajišťuje především stabilizaci. Barometrický tlakový senzor MEAS MS5611 slouží především k měření výšky. Měří tlak vzduchu, který se mění s nadmořskou výškou. Na základě této informace je možné vypočítat výšku bezpilotního prostředku. Pixhawk 4 nabízí různá komunikační rozhraní, která lze využít pro propojení s dalšími zařízeními. Mezi tato komunikační rozhraní patří UART, I2C a SPI. Letový kontrolér také obsahuje PWM výstupy, GPIO piny a USB port. USB slouží pro konfiguraci a komunikaci Pixhawk 4 s počítačem. Pixhawk 4 podporuje GNSS přijímače,

kteřé komunikují přes uBlox, MTK, Emlid nebo UAVCAN. Pixhawk 4 je vybaven také konektory pro připojení telemetrických rádií. Telemetrické rádio slouží k připojení letového kontroléru k pozemní stanici. (Dronecode PX4, 2023)



Obrázek 15: Pixhawk 4

Pixhawk 4 podporuje různé RC vysílače, které umožňují ovládání bezpilotního prostředku pomocí dálkového ovladače, jako PPM, SBUS, a DSM Spektrum přijímače pomocí sériového rozhraní. (Dronecode PX4, 2023)

#### 2.1.4 Waveshare SIM7600E-H 4G HAT

SIM7600E-H 4G HAT (Obrázek 16) je modul pro Raspberry Pi, který poskytuje 4G připojení a GPS. HAT (Hardware attached on top) umožňuje přímou instalaci na zařízení s HAT rozhraním. Podporuje široké spektrum mobilních sítí, včetně 4G, 3G a 2G. Podporuje AT příkazy pro řízení a konfiguraci. (Waveshare, 2023)

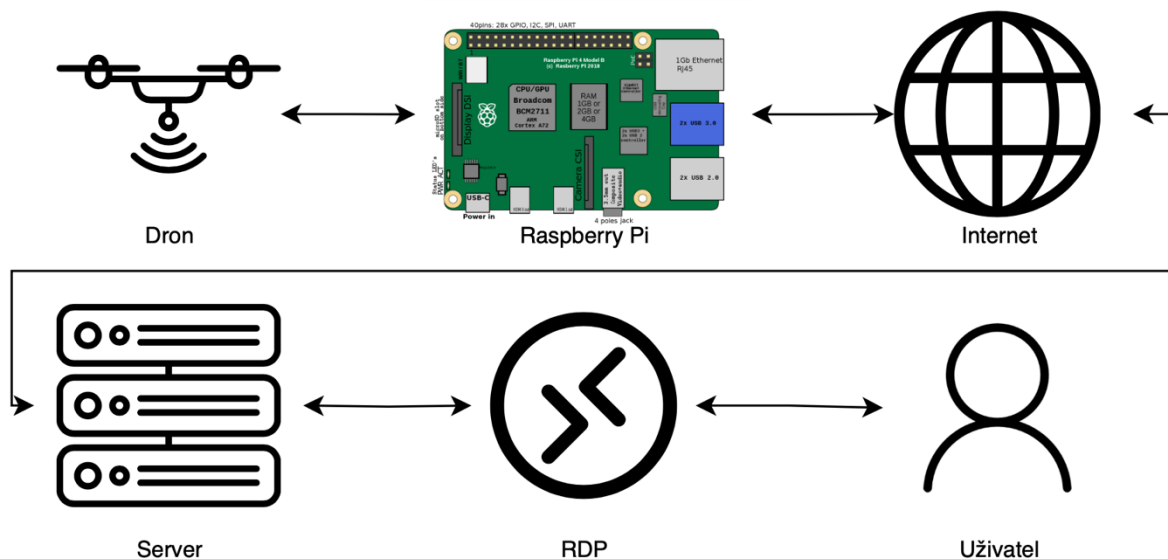




Obrázek 16: SIM7600E-H 4G HAT

## 2.2 Softwarová konfigurace experimentálního zařízení

Pro dosažení obousměrné komunikace, viz Obrázek 17, kdy bezpilotní prostředek je připojen k internetu skrze LTE modul. Server (pozemní stanice) je také připojen k internetu, zároveň má pevnou IP adresu, která zajišťuje obousměrné spojení. Uživatel může využít přímo prostředí pozemní stanice, případně se lze připojit vzdálenou plochou na pozemní stanici odkudkoliv. Přenos videa v reálném čase zajišťuje UDP stream na pozemní stanici.



Obrázek 17: Základní schéma obousměrné komunikace

### 2.2.1 Konfigurace Raspberry Pi OS a dodatečných aplikací

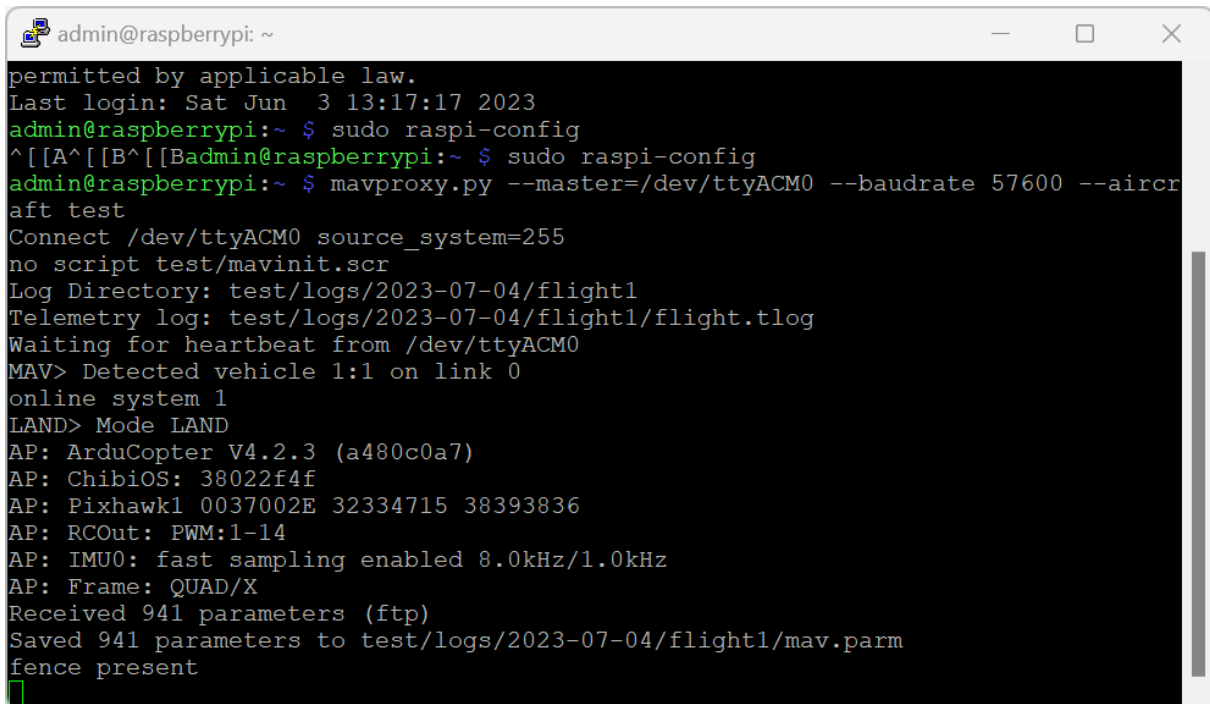
Softwarová konfigurace experimentálního zařízení se skládala z několika kroků. Zjednodušené schéma je znázorněné na obrázku 18. Prvním krokem byla instalace Raspberry Pi OS, která byla provedena pomocí Raspberry Pi Imager verze 1.7.3. Po dokončení instalace na SD kartu byla provedena prvotní inicializace, nastavení uživatelského profilu a hesla. Pro další konfiguraci bylo Raspberry Pi připojeno k lokální síti a bylo povoleno SSH připojení. Další softwarová konfigurace byla provedena vzdáleně za pomoci programu Putty. Byl proveden update OS a následně byl nainstalován program pro navázání obousměrné komunikace. MAVProxy je program, který umožňuje MAVLink komunikaci mezi Pixhawk, Raspberry Pi a pozemní stanicí. Instalace byla provedena dle manuálu z oficiálních webových stránek.



Obrázek 18: Schéma softwarové konfigurace experimentálního zařízení



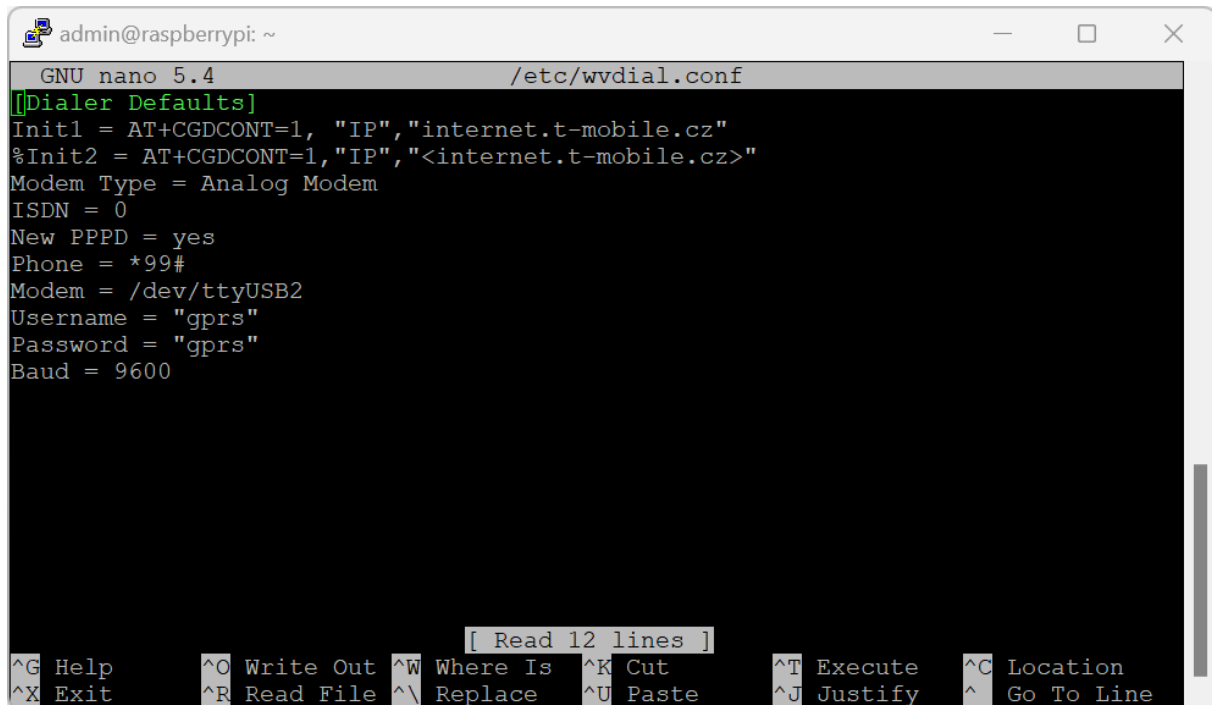
Po dokončení instalace byl připojen Pixhawk 4 k Raspberry Pi pomocí USB kabelu a byla ověřena funkčnost spojení, viz Obrázek 19. V konzoli můžeme vidět, že test spojení Raspberry Pi a Pixhawk 4 proběhl v pořádku. Po úspěšném testu připojení bylo nastaveno automatické navázání MAVLink komunikace po spuštění Raspberry Pi.



```
admin@raspberrypi: ~
permitted by applicable law.
Last login: Sat Jun  3 13:17:17 2023
admin@raspberrypi:~ $ sudo raspi-config
^[[A^[[B^[[Badmin@raspberrypi:~ $ sudo raspi-config
admin@raspberrypi:~ $ mavproxy.py --master=/dev/ttyACM0 --baudrate 57600 --aircraft test
Connect /dev/ttyACM0 source_system=255
no script test/mavinit.scr
Log Directory: test/logs/2023-07-04/flight1
Telemetry log: test/logs/2023-07-04/flight1/flight.tlog
Waiting for heartbeat from /dev/ttyACM0
MAV> Detected vehicle 1:1 on link 0
online system 1
LAND> Mode LAND
AP: ArduCopter V4.2.3 (a480c0a7)
AP: ChibiOS: 38022f4f
AP: Pixhawk1 0037002E 32334715 38393836
AP: RCOut: PWM:1-14
AP: IMU0: fast sampling enabled 8.0kHz/1.0kHz
AP: Frame: QUAD/X
Received 941 parameters (ftp)
Saved 941 parameters to test/logs/2023-07-04/flight1/mav.parm
fence present
```

Obrázek 19: Ověření spojení Raspberry Pi a Pixhawk 4

Konfigurace LTE modemu byla poměrně komplikovaná, jelikož bylo potřeba naleznout funkční konfiguraci pro evropské mobilní sítě. Nakonec za pomoci logu byla zjištěna chyba v konfiguraci a modem se podařilo zprovoznit se SIM kartou od T-Mobile. Pro připojení modemu do sítě byl využit PPP protokol. Bylo potřeba také povolit sériový port, aby fungovala komunikace přes HAT rozhraní. Na obrázku 20 je konfigurace modemu pro síť T-Mobile. Informace o konfiguraci byly čerpány přímo ze stránek T-Mobile. LTE modem byl dále nakonfigurován jako základní síťový adaptér, který naváže spojení po zapnutí Raspberry Pi.



```
admin@raspberrypi: ~
GNU nano 5.4 /etc/wvdial.conf
[[Dialer Defaults]]
Init1 = AT+CGDCONT=1, "IP", "internet.t-mobile.cz"
%Init2 = AT+CGDCONT=1, "IP", "<internet.t-mobile.cz>"
Modem Type = Analog Modem
ISDN = 0
New PPPD = yes
Phone = *99#
Modem = /dev/ttyUSB2
Username = "gprs"
Password = "gprs"
Baud = 9600

[ Read 12 lines ]
^G Help      ^O Write Out ^W Where Is  ^K Cut       ^T Execute   ^C Location
^X Exit      ^R Read File ^\ Replace   ^U Paste     ^J Justify   ^_ Go To Line
```

Obrázek 20: Konfigurace T-Mobile sítě

Pro přenos videa v reálném čase byl využit program GStreamer. Instalace a konfigurace byla provedena pomocí návodu. Hlavní výhodou GStreamer je podpora UDP streamu a velmi nízká latence přenosu videa. (Qengineering, 2023)

### 2.2.2 QGroundControl

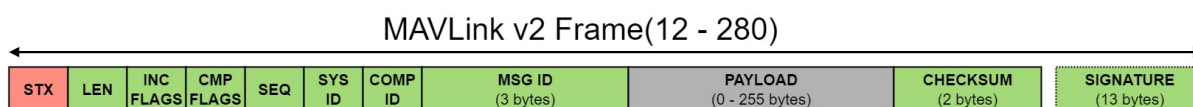
QGroundControl je open-source aplikace, kterou lze použít jako GS (ground station), neboli pozemní stanici pro bezpilotní prostředky a systémy. Jednoduchý a přehledný interface umožňuje uživateli ovládat a monitorovat bezpilotní prostředky. Aplikace nabízí velké množství vestavěných funkcí. Umožňuje plánování mise pro bezpilotní prostředky, včetně ovládání a monitoringu. Plánování mise nabízí možnosti automatického vzletu a přistání, navigace pomocí definovaných bodů a mnoho dalšího. QGroundControl podporuje systémy Pixhawk, což byl jeden ze zásadních parametrů při výběru vhodného softwaru pro splnění požadavků. Aplikace má velmi přehledný uživatelský interface, který je možné upravit dle potřeb uživatele. Poskytuje přehled v reálném čase o telemetrii letu, stavu bezpilotního prostředku a mapový přehled. (Dronecode QGC, 2023)

### 2.2.3 MAVLink

MAVLink je protokol pro komunikaci mezi pozemní stanicí a bezpilotním prostředkem. Samotný protokol je velmi nenáročný na datový tok, proto je vhodný pro zajištění spolehlivého spojení v případech omezeného komunikačního pásma. První verze byla vydaná v roce 2009 Lorenzem Meierem. MAVLink 1 má 8 bytů na packet. Druhá verze MAVLink 2 má 14 bytů na packet, je lépe zabezpečená a nabízí funkce jako detekce ztráty packetů, korupci a autentizaci packetů. Výhodou MAVLink protokolu je také velká podpora programovacích jazyků, operačních systémů a mikrokontrolerů. Struktura zprávy MAVLink je poměrně jednoduchá a je navržena tak, aby byla co nejefektivnější. (MAVLink, 2023)

Každá zpráva má pevně danou strukturu (Obrázek 21):

- Header (hlavička)
  - Obsahuje důležité informace, které identifikují danou zprávu
  - STX, Payload length, packet sequence, system ID, component ID, message ID
- Payload (tělo zprávy)
  - Tělo zprávy nese užitečná data. V případě MAVLink 2.0 255 bajtů, MAVLink 1.0 8 bajtů.
- Cyclic Redundancy Check (kontrolní součet)
  - Kontrolní součet slouží k detekci chyb ve zprávě MAVLink.



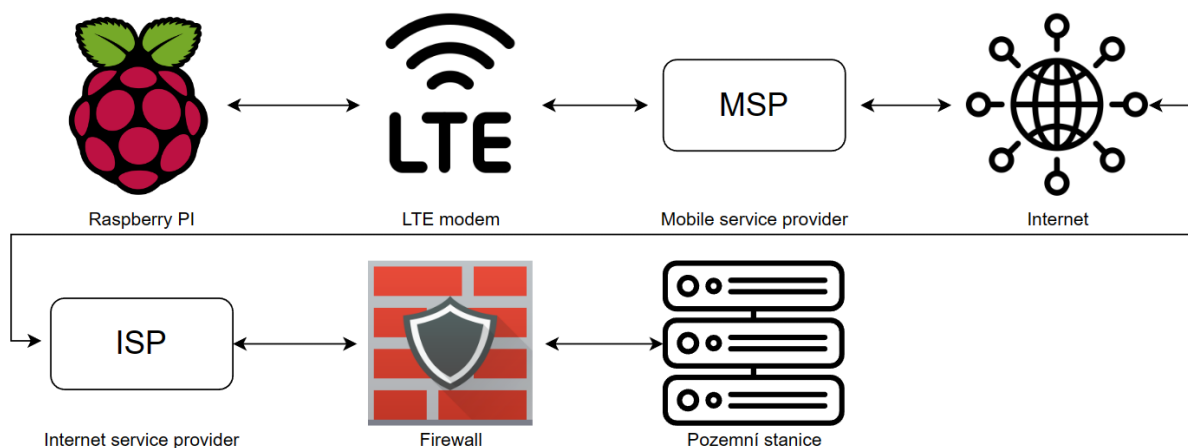
Obrázek 21: MAVLink protokol

## 2.3 Síťová konfigurace experimentálního zařízení

Obousměrné datové spojení je zajištěno pomocí stálého připojení na pozemní stanici. Jako pozemní stanice slouží virtuální stroj s nainstalovaným operačním systémem Windows 11. Virtuální stroj se nachází v síti, kde je zajištěna pevná IP adresa a zálohovaný zdroj napájení pro zvýšení spolehlivosti. Prototypové zařízení tedy navazuje MAVlink komunikaci na veřejné IP adrese, kde ji následně na firewallu předávám do virtuálního stroje. Na virtuálním stroji běží aplikace QGroundControl, která automaticky naváže spojení v moment detekce na portu 14550. Toto řešení umožňuje stabilní a spolehlivé připojení bezpilotního prostředku

k pozemní stanici. K virtuálnímu stroji je možné se připojit vzdáleně odkudkoliv z libovolného zařízení pomocí vzdálené správy.

Pro zajištění propojení mezi komponentou MAVPROXY na Raspberry Pi a aplikací QGroundControl na pozemní stanici je nutné navrhnout a realizovat síťovou konfiguraci, která bude splňovat požadavky na funkčnost, rychlost, stabilitu, bezpečnost, ale i cenu za konektivitu. Raspberry Pi je připojeno do sítě internet prostřednictvím LTE (případně 5G) modemu s datovou SIM kartou nebo eSIM, tedy skrze síť poskytovatele mobilního připojení. Řídící stanice je připojena do sítě internet prostřednictvím Wifi nebo Ethernetu, dále prostřednictvím firewallu a poskytovatele internetového připojení. Mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí se tedy nachází celá řada technologií a sítí různých poskytovatelů, a to s sebou může přinášet celou řadu problémů.



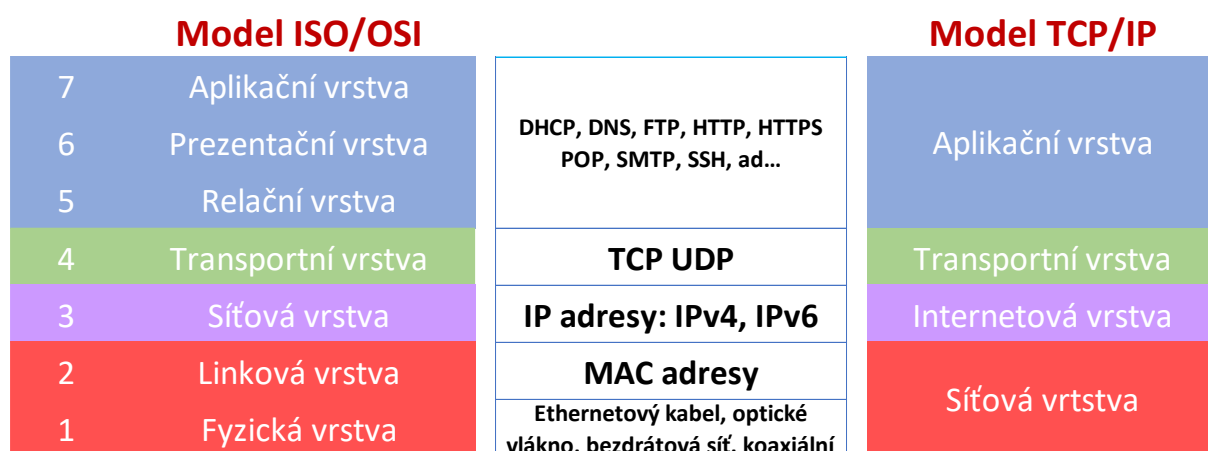
Obrázek 22: Schéma konektivity

Podrobněji jsou jednotlivé komponenty konektivity znázorněny na Obrázku 22, je vhodné uvést jejich vzájemný způsob komunikace.

- 1) MAVLink komunikuje s TCP/IP stackem na Raspberry Pi. Aplikace jako taková neřeší, zda je komunikace navázána prostřednictvím ethernetového adaptéru, Wifi adaptéru, LTE modemu nebo jiného komunikačního rozhraní.
- 2) LTE modem tedy musí být správně nakonfigurován a musí se automaticky spojit s mobilní sítí.
- 3) MSP – Mobile service provider – poskytovatel mobilního připojení představuje pro celé řešení infrastrukturu, kde musí být dané smluvně/technické parametry, které významně

ovlivní parametry připojení. Síť poskytovatele mobilního připojení je propojena do sítě Internet, v ČR pravděpodobně přes Český peeringový uzel NIX. (NIX.CZ, b.d.)

- 4) Do této sítě je připojen i ISP – Internet service provider, kde nastává shodná situace jako u MSP, a tedy smluvně/technické podmínky významně ovlivní parametry připojení. Na rozdíl od jiných součástí připojení nemá řešitel nad MSP a ISP přímou kontrolu.
- 5) Koncový bod sítě ISP bude předávací rozhraní – nejčastěji ethernet, ale může to být i VDSL nebo Wifi. Na toto rozhraní je připojen Firewall, na kterém jsou konfigurována potřebná pravidla pro konektivitu.
- 6) Pozemní stanice je připojena v rámci samostatného segmentu LAN k Firewallu a je jí prostřednictvím pravidel umožněna odpovídající komunikace.



Obrázek 23 : Model ISO / OSI a TCP/IP

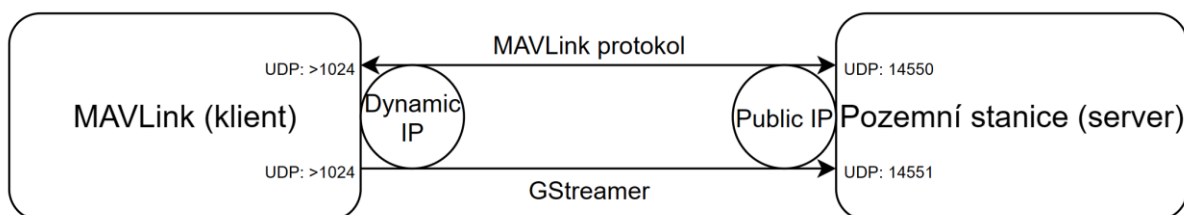
Pro komunikaci bezpilotního prostředku a GS bude využit TCP/IP protokol, který využívá 4 vrstvy mapované do 7 vrstev modelu ISO/OSI, viz Obrázek 23.

Na fyzické úrovni – v 1. vrstvě modelu ISO/OSI jsou zejména následující komponenty:

1. LTE rozhraní Raspberry PI a síťové rozhraní pozemní stanice (Ethernet nebo Wifi). Každé toto rozhraní má svoji MAC adresu, která může napomoci při základním zabezpečení a při dynamickém přidělování IP adresy z rezervací.
2. Na úrovni síťové vrstvy je zásadní zajištění alespoň jedné IPv4 veřejné adresy, tedy adresy mimo privátní rozsahy definované v RFC 6890 (Internet Engineering Task Force (IETF), 2013)

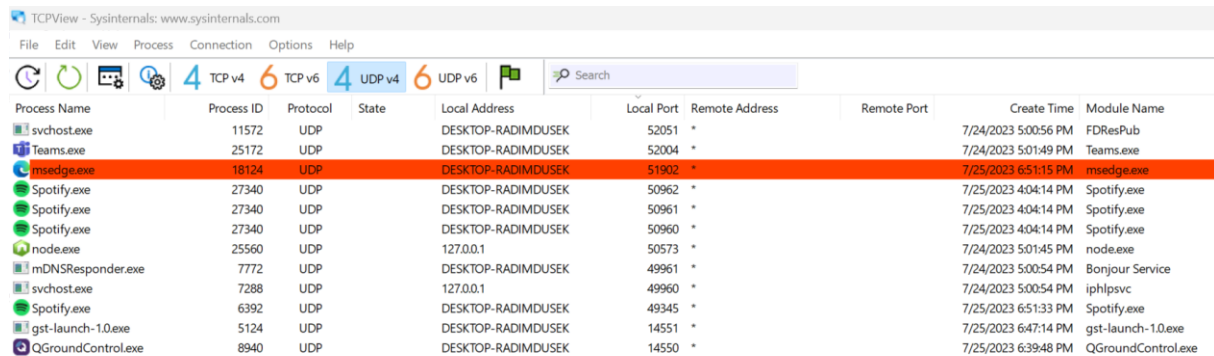
3. Na úrovni transportní vrstvy je možné volit mezi stavovým protokolem TCP, který zajišťuje garantované připojení, nebo nestavovým protokolem UDP, který má nižší režii, ale korekční mechanismy musí v takovém zajistit aplikační vrstva, anebo na ně můžeme s ohledem na charakter provozu rezignovat.
4. Na úrovni aplikační vrstvy je využíván protokol MAVLINK, který na straně serveru GS využívá UDP port 14550, a GStreamer pro přenos videa, který na straně serveru GS využívá UDP port 14551.

Na obrázku 24 je znázorněna komunikace na úrovni 3. vrstvy, která využívá UDP protokol, a připojení je iniciováno ze strany klienta směrem k serveru. Rozdíl mezi oběma využitými protokoly je mimo jiné v tom, že protokol GStreamer pro přenos videa neřeší ani z úrovně aplikační vrstvy komunikaci z pozemní stanice směrem ke klientovi, ale pouze přijímá odesílané UDP rámce z klienta. V případě, že je některý z rámců během přenosu ztracen, dojde k výpadku příslušné části videopřenosu. Oproti tomu řídicí protokol MAVLink řeší opakování ztracených rámců z úrovně aplikační vrstvy.



Obrázek 24: Schéma TCP/IP komunikace

Na Obrázku 25 je výstup volně dostupného nástroje pro monitoring aktivních připojení hostitele – nástroj TCPView, který je volně k dispozici ke stažení na webu společnosti Microsoft. V tomto výstupu vidíme 2 aktivní připojení na posledních 2 řádcích – video na lokálním portu 14551 a řídicí protokol na portu 14551.



Process Name	Process ID	Protocol	State	Local Address	Local Port	Remote Address	Remote Port	Create Time	Module Name
svchost.exe	11572	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	52051	*		7/24/2023 5:00:56 PM	FDResPub
Teams.exe	25172	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	52004	*		7/24/2023 5:01:49 PM	Teams.exe
msedge.exe	18124	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	51902	*		7/25/2023 6:51:15 PM	msedge.exe
Spotify.exe	27340	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	50962	*		7/25/2023 4:04:14 PM	Spotify.exe
Spotify.exe	27340	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	50961	*		7/25/2023 4:04:14 PM	Spotify.exe
Spotify.exe	27340	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	50960	*		7/25/2023 4:04:14 PM	Spotify.exe
node.exe	25560	UDP		127.0.0.1	50573	*		7/24/2023 5:01:45 PM	node.exe
mDNSResponder.exe	7772	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	49961	*		7/24/2023 5:00:54 PM	Bonjour Service
svchost.exe	7288	UDP		127.0.0.1	49960	*		7/24/2023 5:00:54 PM	iphlpvc
Spotify.exe	6392	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	49345	*		7/25/2023 6:51:33 PM	Spotify.exe
gst-launch-1.0.exe	5124	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	14551	*		7/25/2023 6:47:14 PM	gst-launch-1.0.exe
QGroundControl.exe	8940	UDP		DESKTOP-RADIMDUSEK	14550	*		7/25/2023 6:39:48 PM	QGroundControl.exe

Obrázek 25: Ověření UDP konektivity nástrojem TCPView

Zajímavý pohled na IP vrstvu modelu ISO/OSI nám může poskytnout nástroj traceroute, který je standardně součástí jak systémů Linux, tak i Windows.

```
admin@raspberrypi:~ $ traceroute -n 185.156.123.23
traceroute to 185.156.123.23 (185.156.123.23), 30 hops max, 60 byte packets
 1  193.179.174.82  124.349 ms  124.174 ms  123.986 ms
 2  * * *
 3  * * *
 4  62.115.185.43  124.442 ms  62.115.185.49  124.420 ms  124.176 ms
 5  88.86.97.250  124.147 ms  125.268 ms  88.86.97.246  123.791 ms
 6  185.152.128.123  123.538 ms  16.870 ms  20.489 ms
```

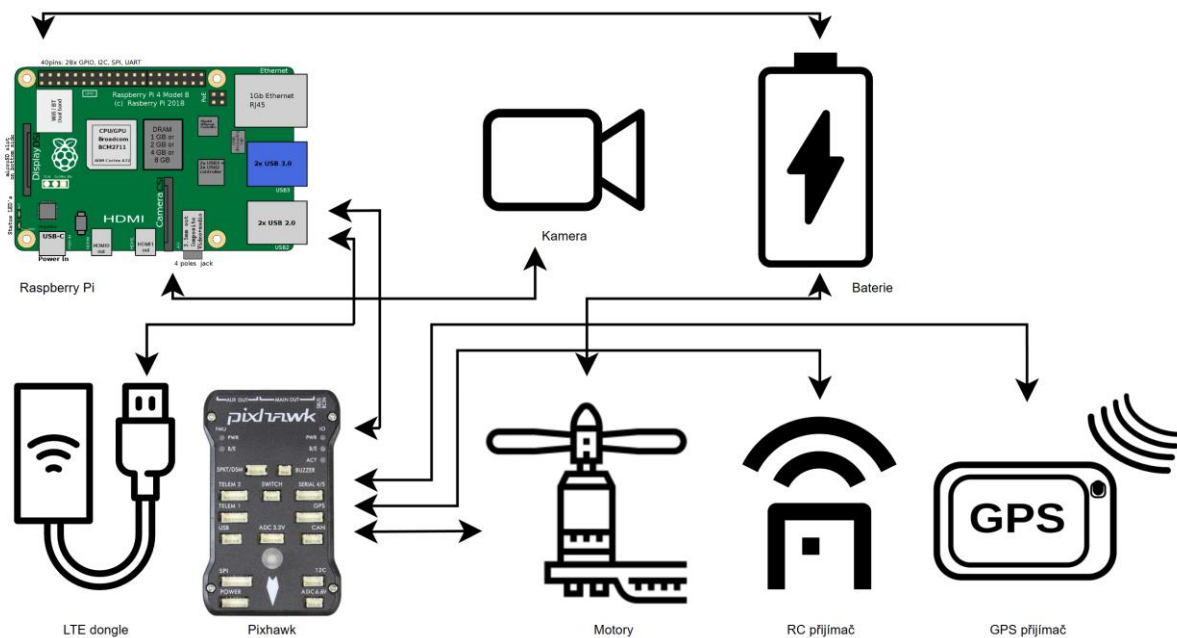
Obrázek 26: Trasování IP hostitelů mezi klientem a serverem

Jak je z výpisu na obrázku 26 zřejmé, je mezi klientem a serverem nejméně 6 routerů (nodes). Routery na pozici 2 a 3 mají pravděpodobně vypnuté poskytování informace prostřednictvím ICMP protokolu.

## 2.4 Hardwarové komponenty prototypového zařízení

Pro stavbu testovacího prostředí byly využity běžně dostupné komponenty. Pro jednoduchost byl zvolen bezpilotní prostředek typu kvadrokoptéry. Rám byl použitý DJI F450 vyvinutý firmou DJI, který je navržen pro stavbu vlastního bezpilotního prostředku. Jedná se o lehký a odolný rám. DJI F450 je vyroben z velmi odolného plastu, který zajišťuje nízkou váhu současně s velkou pevností. Rám se skládá z několika dílů, které jsou spojeny pomocí šroubů do středového dílu. Rozpětí je 450 mm. Motory byly použity bezkartáčové 2212 920KV.

Regulátory byly využity Simonk 30 A. Jedná se o elektronické regulátory, používané pro ovládání rychlosti otáček motorů. Regulátory jsou napájeny napětím 7,4 V-14,8 V. Maximální konstantní výstupní proud je 30 A, přičemž krátkodobý 35 A. Po sestavení prototypového zařízení na něj bylo aplikováno experimentální zařízení. Schéma celého zařízení je znázorněné na Obrázku 27. Obrázek 27 znázorňuje schéma zapojení použitých komponentů. Napájení je zajištěno pomocí Li-Pol baterie. Regulátory motorů jsou napájeny přímo, pro napájení Raspberry Pi byl využitý měnič na 5 V. Do Raspberry Pi byl pomocí USB připojený Pixhawk 4 a LTE modul. Ovládání motorů, RC přijímač a GPS anténa byly připojeny do Pixhawk.

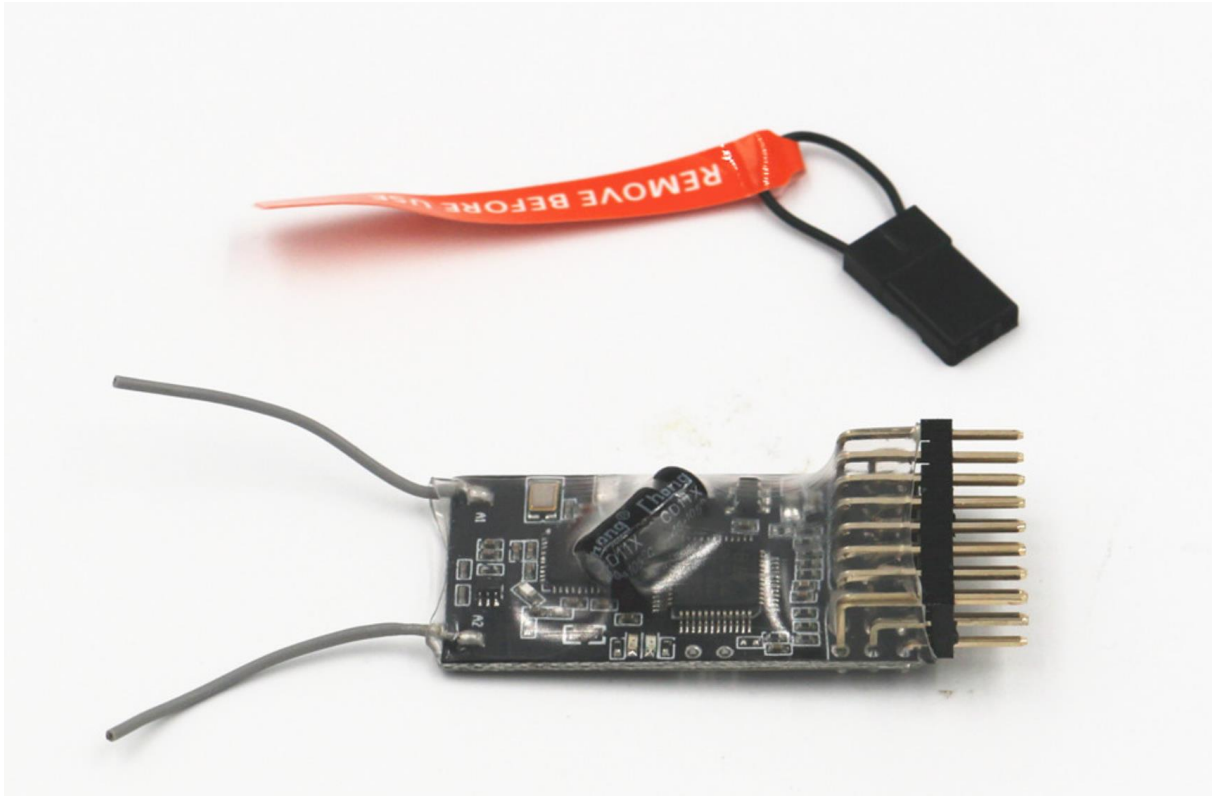


Obrázek 27: Schéma HW zapojení



### 2.4.1 Přijímač RM601

Pro stavbu prototypového zařízení byl využit 6 kanálový PPM přijímač a vysílačka Spektrum DX6i. Po připojení přijímače k Pixhawk 4 bylo nutné provést konfiguraci v softwaru QGroundControl. RM601 (Obrázek 28) je šesti kanálový přijímač pro vysílačky Spektrum. Jeho hlavní předností je PPM výstup, který je požadován pro využití s Pixhawk 4. Přijímač je možné napájet napětím 4 V-10 V. Disponuje nízkou hmotností a malými rozměry.



Obrázek 28: Přijímač RM601

### 2.4.2 3DR GPS uBlox LEA-6 V1.1

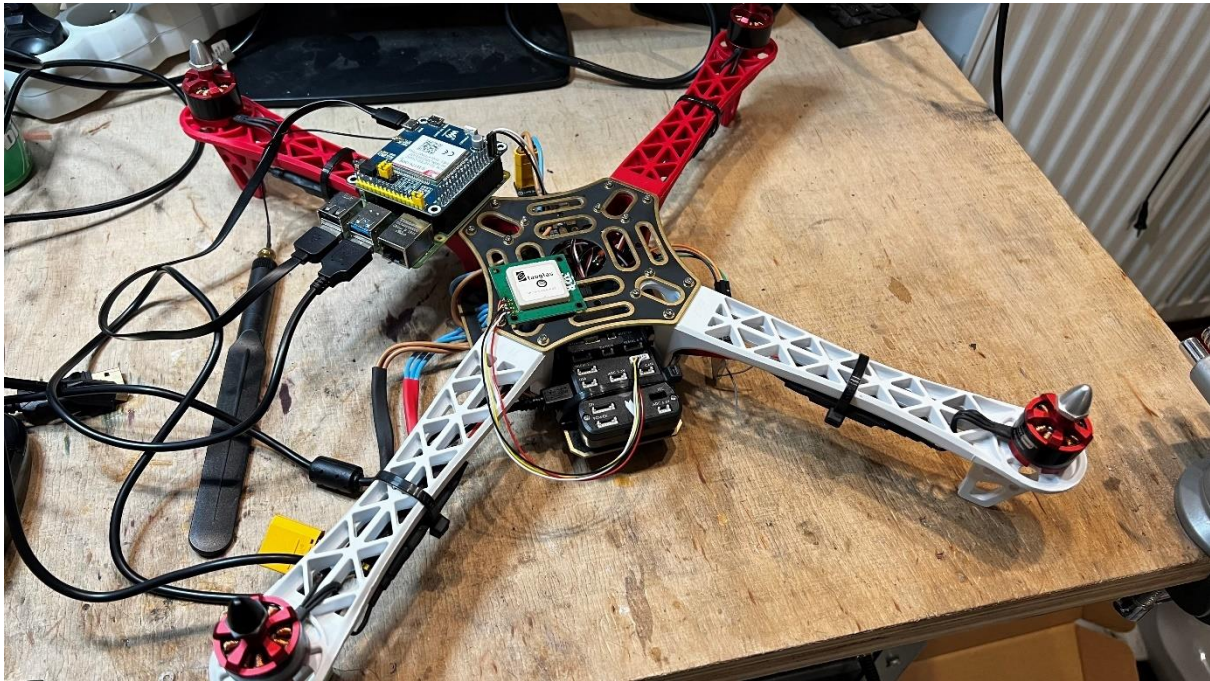
Pro stavbu prototypového zařízení byl využitý GPS LEA-6 od společnosti 3DR (Obrázek 29). Jedná se o populární modul navržený pro použití s letovými kontroléry, jako je právě Pixhawk 4. Poskytuje spolehlivý a přesný zdroj polohové informace. Modul je vybavený 50 kanály pro příjem GPS signálu. Nabízí horizontální přesnost 2,5 m a vertikální 5 metrů. Přesnost měření rychlosti 0,1 m/s. Podpora A-GPS a SBAS. (Ublox, 2017)



Obrázek 29: GPS LEA-6

### 2.4.3 Stavba prototypového zařízení

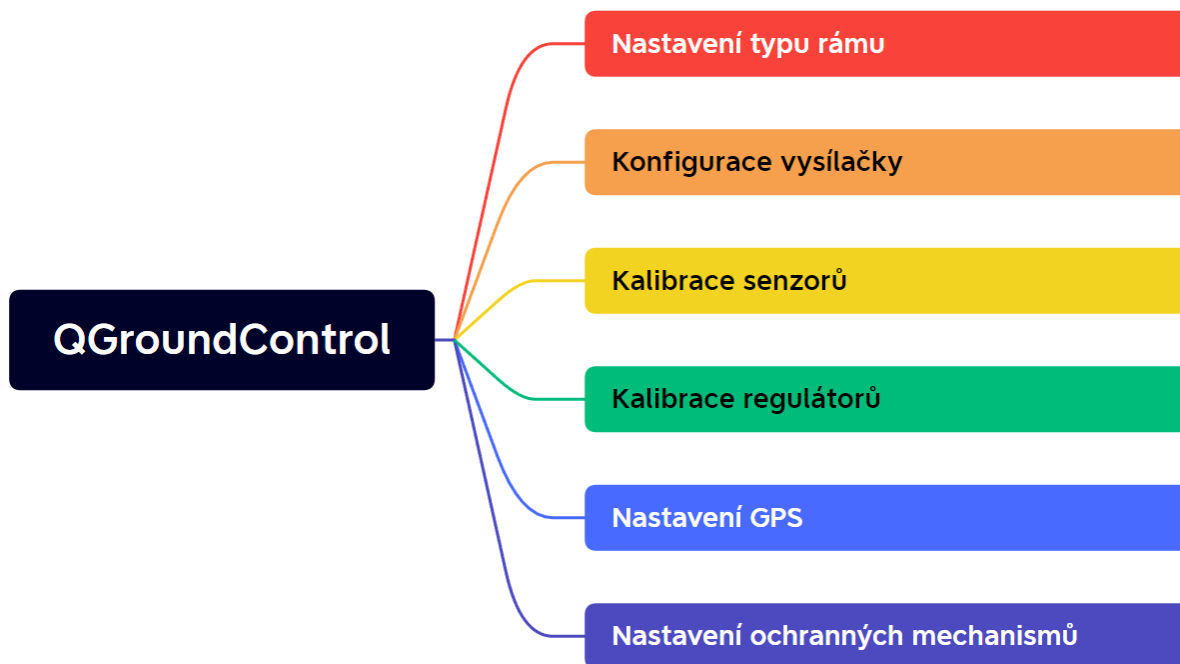
Prvním krokem bylo sestavení rámu DJI F450 a montáž motorů na ramena. Následovalo zapojení regulátorů a jejich přichycení. Do rámu byl dále přichycen Pixhawk 4, do kterého byly zapojeny regulátory, přijímač a GPS. Raspberry Pi, včetně 4G HAT, je připojeno na napájecí desku a do jednotky Pixhawk. Sestavení rámu DJI F450 bylo velmi jednoduché. Samotné sestavení vyžaduje pouze imbusový šroubovák. Montáž motorů byla také velmi jednoduchá, za pomoci přiložených šroubů. Regulátory jsem uchytil na ramena pomocí stahovacích pásek. Na obrázku 30 je hotové prototypové zařízení včetně experimentálního zařízení.



Obrázek 30: Hotový prototyp typu kvadroptéry

## 2.5 Softwarová konfigurace prototypového zařízení

V programu QGroundControl bylo potřeba nakonfigurovat několik parametrů, viz Obrázek 31. První parametr, který bylo potřeba nastavit, je typ použitého rámu a jeho konfigurace. V případě mého prototypu se jedná o kvadroptéru s rámem do X. Dále byla provedena konfigurace konvenčního RC ovládní. V průběhu natavení bylo potřeba přiřadit jednotlivé ovládací kanály a následně vysílačku zkalibrovat. Celý proces byl relativně jednoduchý a rychlý. Dalším krokem byla kalibrace regulátorů a všech senzorů. V průběhu kalibrace byly z kvadroptéry demontovány vrtule. Následně byl nastavený správný typ GPS a proběhlo i ověření její funkčnosti. Poslední krokem konfigurace bylo nastavení všech ochranných mechanismů.



Obrázek 31: Konfigurace QGroundControl

V aplikaci QGroundControl bylo nastaveno několik ochranných mechanismů, první z nich ovlivňuje chování bezpilotního prostředku při výpadku konvenčního RC ovládání. V takovém případě mohou nastat dvě situace, pokud byla před letem nastavena domovská poloha a baterie má pod 30 % bezpilotní prostředek, obdrží povel „RETURN HOME“. V případě, že baterie má stále nad 30 %, dostane povel „HOLD POSITION“ a bezpilotní prostředek vyčkává na případné obnovení spojení. Pokud nastane výpadek LTE spojení, bezpilotní prostředek pokračuje ve standardním režimu konvenčního RC ovládání, je možné zahájit „RETURN HOME“ pomocí nadefinovaného tlačítka na vysílače.

## 2.6 Metodika ověření funkčnosti obousměrného spojení

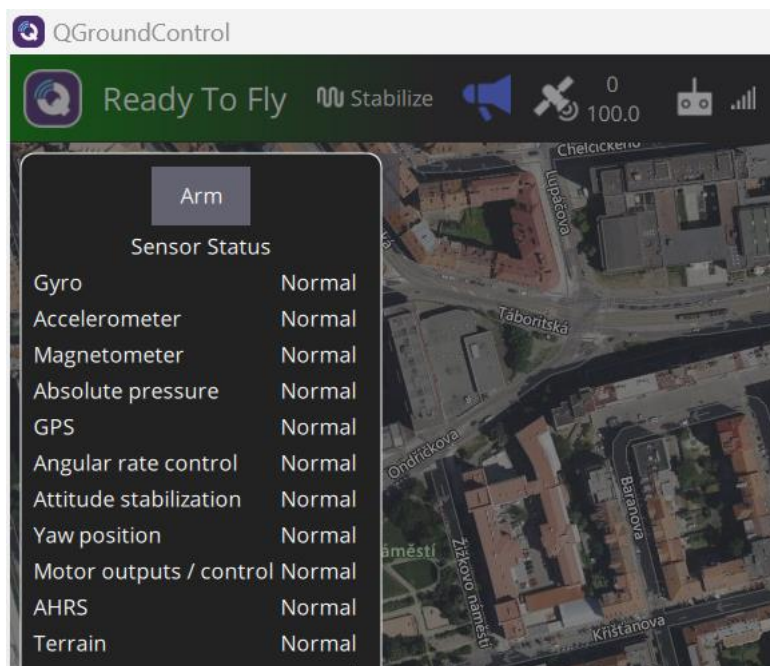
Pro ověření funkčnosti obousměrného spojení MAVLink byla stanovena metoda, která zahrnovala navázání MAVLink spojení přes mobilní síť a následné odesílání a přijímání základních příkazů (např. ARM/DISARM). Příkazy byly odesílány z aplikace QGroundControl, ověření přijetí příkazu bylo provedeno v terminálu na Raspberry Pi.

### 2.6.1 Ověření funkčnosti obousměrného datového spojení

Ověření funkčnosti obousměrného spojení bylo provedeno dle stanovené metody. Obrázek 32 ukazuje, že aplikace QGroundControl je připojena k experimentálnímu zařízení a umožňuje



odeslání ARM příkazu. V rámci ověření bylo odesláno několik základních příkazů. Ověření přijetí příkazů experimentálními zařízeními bylo provedeno v terminálu na Raspberry Pi.



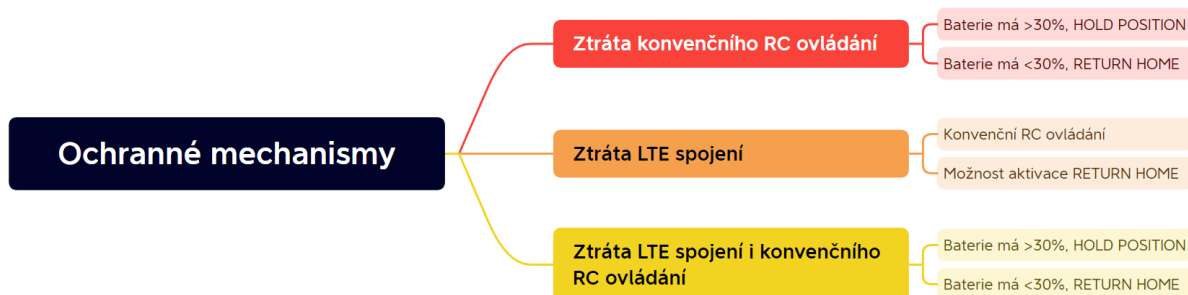
Obrázek 32: Ověření funkčnosti obousměrného spojení

## 2.7 Metodika ověření ochranných mechanismů

Ověření ochranných mechanismů bezpilotního prostředku je klíčovým krokem pro zajištění bezpečného provozu. Proces ověření ochranných mechanismů zahrnoval několik kroků. Veškeré testy byly provedeny pouze jako simulace, a to především z bezpečnostních důvodů. Výpadek konvenčního RC ovládání byl simulovaný vypnutím vysílačky. Ztráta spojení přes LTE byla navozena zakázáním LTE modemu na Raspberry Pi. V programu QGroundControl byl nastavený primárně letový režim s konvenčním RC ovládáním a přenosem telemetrických dat přes MAVLink do pozemní stanice. V případě ztráty signálu z konvenčního RC ovládání dojde ke změně letového režimu na ovládání pomocí MAVLink a bezpilotní prostředek dostane pokyn „HOLD POSITION“. V programu QGroundControl je možné také nastavit, že v případě výpadku konvenčního RC ovládání dostane pokyn „RETURN HOME“. V režimu letu, kdy je bezpilotní prostředek ovládán pomocí MAVLink spojení, je možné i manuální ovládání z programu QGroundControl.

### 2.7.1 Ověření ochranných mechanismů

Ověření ochranných mechanismů bylo provedeno celkem třikrát pro každou situaci. Výsledky byly zaznamenány do schématu na Obrázku 33.



Obrázek 33: Schéma ověřených ochranných mechanismů

### 2.8 Metodika ověření ztráty paketů a odezvy

K ověření ztráty paketů a odezvy MAVLink komunikace přes mobilní sítě byla stanovena následující metoda. Měření ztráty paketů bylo provedeno přímo v aplikaci QGroundControl, kde v záložce MAVLink (Obrázek 34) můžeme sledovat počet odeslaných a přijatých MAVLink zpráv, počet ztracených paketů a jejich procentuální ekvivalent k celkovému počtu zpráv. Počet ztracených paketů udává počet zpráv, které byly odeslány, ale již nebyly doručeny na své cílové místo. Jedná se o jednoduchý způsob posouzení kvality a spolehlivosti dané sítě.



Obrázek 34: Status MAVLink komunikace v aplikaci QGroundControl

Pro měření odezvy a rychlosti spojení mezi pozemní stanicí a experimentálním zařízením byla nainstalovaná aplikace Ookla speedtest. Umožňuje měření rychlosti připojení a odezvy k pozemní stanici.

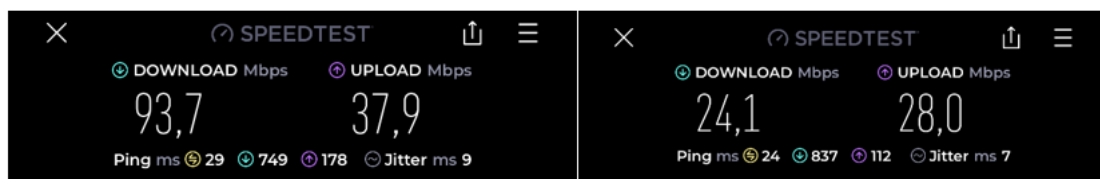
### 2.8.1 Ověření ztráty paketů a odezvy

Ověření ztráty paketů bylo provedeno dle stanovené metody v aplikaci QGroundControl. Měření bylo opakováno celkem třikrát. Pro referenci bylo měření provedeno přes mobilní síť a následně přes WI-FI. Na obrázku 35 jsou zaznamenány hodnoty ztráty paketů, vlevo při využití LTE připojení, vpravo přes WI-FI.

Total messages sent (computed):	30111	Total messages sent (computed):	30404
Total messages received:	29856	Total messages received:	29984
Total message loss:	255	Total message loss:	420
Loss rate:	1%	Loss rate:	1%

Obrázek 35: Ověření ztráty paketů LTE a WI-FI

V rámci ověření odezvy bylo provedeno celkem 100 měření. Měření bylo provedeno v mém vozidle při jízdě, aby byla ověřena rychlost spojení k pozemní stanici z různých vysílačů LTE. Na obrázku 36 jsou uvedeny dvě hodnoty měření odezvy a rychlosti připojení.



<b>93,7</b> Ping ms 29 749 178 Jitter ms 9	<b>24,1</b> Ping ms 24 837 112 Jitter ms 7
---	---

Obrázek 36: Ověření odezvy mezi pozemní stanicí a experimentálním zařízením



### **3. Výsledky**

Výsledky byly stanoveny pro ověření funkčnosti obousměrného spojení, ověření ochranných mechanismů a ověření ztráty paketů a odezvy.

#### **3.1 Výsledky ověření funkčnosti obousměrného spojení**

Výsledky ověření funkčnosti obousměrného spojení dle stanovené metody ukázaly, že spojení přes mobilní síť je plně funkční. Experimentální zařízení bylo schopné přijímání základních příkazů z pozemní stanice, zároveň bylo možné sledování telemetrických dat v reálném čase na pozemní stanici v aplikaci QGroundControl.

#### **3.2 Výsledky ověření ochranných mechanismů**

Na základě stanovené metody ověření ochranných mechanismů bylo zjištěno, že ochranné mechanismy jsou funkční. Každý ochranný mechanismus byl testován celkem třikrát, vždy jako simulace. Výsledky byly v souladu s nastavením, v žádném testu nedošlo k chybě.

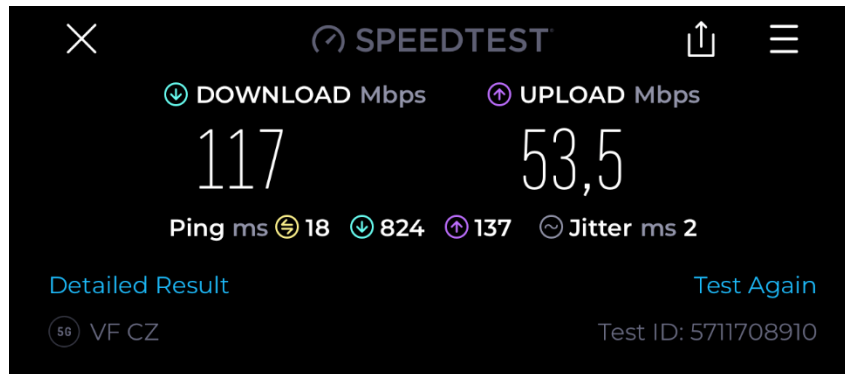
#### **3.3 Výsledky ověření ztráty paketů a odezvy**

Výsledky ověření ztráty paketů ukazují, že komunikace pomocí mobilních sítí poskytuje vyšší kvalitu a spolehlivost než WI-FI připojení. Na obrázku 35 vlevo jsou výsledky měření ztráty paketů při využití mobilních sítí, při porovnání s Obrázkem 35 vpravo je jednoznačné, že při využití mobilních sítí je počet ztracených paketů přibližně o 40% nižší oproti WI-FI komunikaci. Tento výsledek byl poměrně překvapivý a naznačuje, že využití mobilních sítí pro obousměrnou komunikaci mezi pozemní stanicí a bezpilotním prostředkem může být spolehlivý a efektivní způsob komunikace.

Výsledky ověření odezvy ukázaly jednu ze zásadních limitací mobilních sítí. Výsledky stanovené metody byly zaznamenány do tabulky. Na Obrázku 36 můžeme vidět dva vzorky měření, které poukazují na zásadní limitaci LTE připojení. Výsledky ukazují, že rychlost připojení k pozemní stanici velmi kolísá. Avšak je třeba uvést, že v průběhu měření nedošlo k situaci, kdy by se rychlost zhoršila natolik, aby došlo k přerušení MAVLink komunikace. Odezva byla velmi stabilní a její výsledek byl nad očekávání. Důležité je také uvést nesymetrických hodnot stahování a nahrávání.



Na závěr měření byl proveden test rychlosti a odezvy připojení k pozemní stanici přes mobilní síť 5G (Obrázek 37). Výsledek ukázal podstatně lepší odezvu a rychlost spojení. Zároveň nedocházelo k takovému kolísání rychlostí.



Obrázek 37: 5G měření odezvy



## 4. Diskuse

### 4.1 Možná vylepšení komunikace a konektivity

Pro obousměrnou datovou komunikaci pomocí mobilních sítí byly stanoveny limitace, avšak je třeba brát v úvahu, že cílem nebylo vytvoření konceptu primárního ovládní bezpilotního prostředku přes mobilní síť, ale pouze záložní systém ke konvenčnímu RC ovládní. Tento koncept nám zároveň poskytuje přenos videa a telemetrických dat v reálném čase. Mezi limitace patří především pokrytí území LTE sítí, zabezpečení MAVLink komunikace, zajištění nízké odezvy a spolehlivosti spojení. Poskytovatelé mobilních služeb dnes udávají uzemní pokrytí České republiky LTE signálem kolem 98 %, i přes to nelze garantovat mobilní signál v některých odlehlých oblastech a vyšších nadmořských výškách.

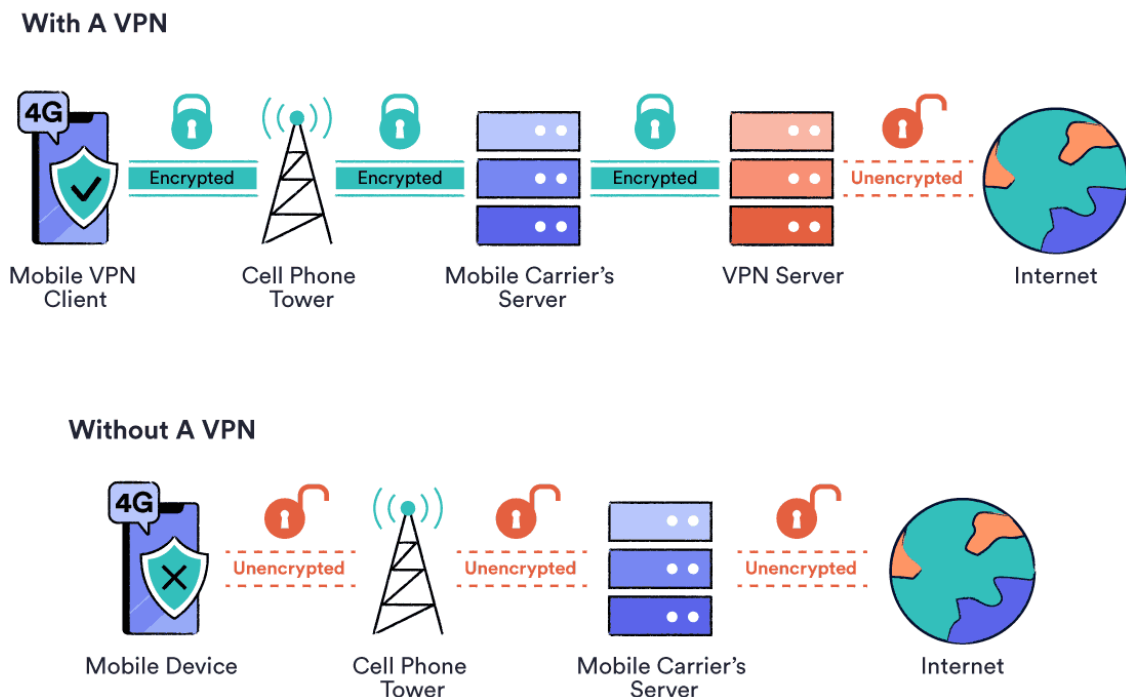
#### 4.1.1 Vylepšení na úrovni 1. vrstvy ISO/OSI

- Na této úrovni by bylo možné uvažovat o vylepšení v oblasti 5G sítí s nižší latencí a výrazně vyšší propustností.
- Rovněž by bylo možné použít 2 datové modemy nebo duální modem a realizovat zálohu na úrovni operátora a zvětšit přenosové pásmo.
- Další možností by bylo využití dedikovaného pásma, zde by ale byla nutná aktivní spolupráce na straně mobilního operátora a není jisté, zda by toto bylo ve všech geografických oblastech možné.
- Využití eSIM by přineslo zvýšení spolehlivosti – odpadá mechanická komponenta pro propojení tohoto chipu, která může být náchylná na mechanické poškození, a rovněž by bylo možné snížit celkovou hmotnost zařízení.
- Pokud by klient i server byli připojeni do sítě jednoho operátora (mobilního), rovněž by bylo možné snáze dosáhnout vyhrazeného pásma na celé přenosové trase a bylo by možné realizovat zvýšenou bezpečnost celého řešení.

#### 4.1.2 Bezpečnostní vylepšení

Jednou slabinou celého řešení je nepochybně absence bezpečnostních mechanismů. Ani jeden použitý protokol nevyužívá ověření komunikujících stran a ani šifrování datového přenosu. Je to daň za určitou jednoduchost celého řešení. Zabezpečení by bylo možné zvýšit vytvořením VPN tunelu mezi klientem a serverem, kde by došlo nejprve k ověření komunikujících stran (například certifikátem), a následně opět na bázi mechanismu privátního/veřejného klíče by probíhalo šifrování celého přenosu viz Obrázek 38. Uvedený

obrázek neilustruje přesně námi uvažovanou konfiguraci, protože VPN spojení by bylo realizováno až ke koncovému bodu sítě s pozemní stanicí (typicky zakončeno na firewallu nebo VPN koncentrátoru) a nebylo by tedy dešifrováno před spojením do internetu. Nevýhodou uvedeného řešení je vyšší zátěž na CPU při šifrování, a tedy i vyšší spotřeba energie a rovněž snížená datová propustnost, a to až o 20 %.



Obrázek 38: Princip připojení s využitím VPN a bez

## 4.2 Zhodnocení výsledků

Výsledky ukázaly, že obousměrná komunikace přes mobilní síť nabízí spolehlivý a efektivní způsob komunikace. Ověření by bylo třeba provést ve větším rozsahu, aby bylo spojení testováno v různých podmínkách a situacích. Navrnutí metody a následné ověření je velmi komplikované, bylo by to vhodné téma na navazující práci. Experimentální zařízení bylo schopno obousměrné komunikace v reálném čase s nízkou odezvou a překvapivě vyšší spolehlivostí než při připojení přes WI-FI. I tak byly stanoveny limitace daného řešení společně s možnými vylepšeními.



## 5. Závěr

Tato bakalářská práce zkoumala možnosti využití mobilních sítí pro přenos videa, monitoring a ovládání bezpilotních prostředků. Bylo zjištěno, že mobilní sítě nabízejí velký potenciál pro rychlou a spolehlivou datovou komunikaci mezi bezpilotním prostředkem a pozemní stanicí. Využitá zařízení Pixhawk, Raspberry Pi a LTE modem poskytla robustní a flexibilní řešení pro tuto aplikaci. Během testovacích letů bylo provedeno ověření funkčnosti a spolehlivosti vytvořeného konceptu. Testovací let potvrdil stabilitu a nízkou odezvu pro obousměrnou datovou komunikaci přes mobilní sítě. Výsledky ukázaly, že mobilní sítě jsou vhodným řešením pro ovládání, monitoring a přenos videa z bezpilotních prostředků. Nicméně i tak byly stanoveny některé limitace, jako například omezený dosah a signál v odlehlých oblastech, což může ovlivnit spolehlivost a odezvu celého systému. Dalším omezením bylo zabezpečení MAVLink komunikace, které není v experimentálním zařízení aplikované. Je třeba myslet na možné útoky a neoprávněný přístup třetích osob. Bylo by možné přidat větší zabezpečení pomocí VPN, případně využití šifrování. V neposlední řadě by bylo vhodné zmínit možné zhoršení odezvy v případě snížení signálu. Ochranné mechanismy, které byly nastaveny, zajišťují, že v případě výpadku konvenčního RC ovládání, případně spojení přes mobilní sítě dojde k přechodu na alternativní způsob ovládání.

Navzdory výše zmíněným limitacím využití mobilních sítí pro obousměrnou datovou komunikaci mezi pozemní stanicí a bezpilotním prostředkem představuje perspektivní směr a její implementace má velký potenciál pro zvýšení bezpečnosti bezpilotních prostředků, jelikož umožňuje alternativní způsob komunikace s UAV v případě výpadku konvenčního ovládání. Mezi možná vylepšení experimentálního zařízení patří především zabezpečení celé komunikace, využití eSIM společně s dalším modemem pro zajištění větší spolehlivosti a redundance. Dále by bylo vhodné provést rozsáhlejší testy v různých prostředích a podmínkách, aby byla ověřena robustnost celého systému. Toto by bylo vhodné téma na navazující práci.



## 6. Reference

- [1] CHEN, Liqi, Zheng HUANG, Zhenbang LIU, Dawei LIU a Xin HUANG. 4G Network for Air-Ground Data Transmission: A Drone Based Experiment. In: *2018 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 167-168 [cit. 2023-07-15]. ISBN 978-1-5386-7771-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICII.2018.00028
- [2] Pokrytí veřejně širokopásmové mobilní sítě 4G a 5G. *Pokrytí veřejně širokopásmové mobilní sítě 4G a 5G* [online]. ČTU [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: <https://digi.ctu.cz/pokryti/>
- [3] DJI Mavic 3 4G Dongle – All You Need to Know. *DJI Mavic 3 4G Dongle – All You Need to Know* [online]. Daniel Cepeda [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: <https://www.droneblog.com/dji-mavic-3-4g-dongle/>
- [4] MAVLink. *MAVLink* [online]. [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: <https://mavlink.io/en/>
- [5] Raspberry Pi Hardware. *Raspberry Pi Hardware* [online]. Raspberry Pi [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html#raspberrypi-4-model-b>
- [6] Raspberry Pi OS. *Raspberry Pi OS* [online]. Raspberry Pi [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html>
- [7] QGroundControl User Guide. *QGroundControl User Guide* [online]. Dronecode QGC [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/index.html>
- [8] PX4 Autopilot User Guide (v1.12). *PX4 Autopilot User Guide (v1.12)* [online]. Dronecode PX4 [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: <https://docs.px4.io/v1.12/en/>
- [9] [online]. [cit. 2023-07-04]. Dostupné z: <https://nix.cz/>
- [10] *RFC 6890* [online]. Internet Engineering Task Force (IETF), 2013 [cit. 2023-08-05]. Dostupné z: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6890>
- [11] JUN LI, YIFENG ZHOU a Louise LAMONT. Communication architectures and protocols for networking unmanned aerial vehicles. In: *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 1415-1420 [cit. 2023-07-23]. ISBN 978-1-4799-2851-4. Dostupné z: doi:10.1109/GLOCOMW.2013.6825193



- [12] *Install GStreamer 1.18 on Raspberry Pi 4*. [online]. January 25, 2023 [cit. 2023-07-29]. Dostupné z: <https://gengineering.eu/install-gstreamer-1.18-on-raspberry-pi-4.html>
- [13] CHRICKI, Amira, Haifa TOUATI, Hichem SNOUSSI a Farouk KAMOUN. UAV-GCS Centralized Data-Oriented Communication Architecture for Crowd Surveillance Applications. In: *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)* [online]. IEEE, 2019, s. 2064-2069 [cit. 2023-08-02]. ISBN 978-1-5386-7747-6. Dostupné z: doi:10.1109/IWCMC.2019.8766641
- [14] SHESHASHAYEE, Abhimanyu Venkatraman, John BUCZEK, Chiara PETRIOLI a Stefano BASAGNI. Experimental Evaluation of Wake-up Radio Ranges for UAV-assisted Mobile Data Collection. In: *2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* [online]. IEEE, 2022, 2022-4-10, s. 716-721 [cit. 2023-08-03]. ISBN 978-1-6654-4266-4. Dostupné z: doi:10.1109/WCNC51071.2022.9771748
- [15] Chen, X.; Tang, J.; Lao, S. Review of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Communication Architectures and Routing Protocols. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3661. <https://doi.org/10.3390/app10103661>
- [16] BARRADO, Cristina, Roc MESSEGUER, Juan LOPEZ, Enric PASTOR, Eduard SANTAMARIA a Pablo ROYO. Wildfire monitoring using a mixed air-ground mobile network. *IEEE Pervasive Computing* [online]. 2010, 9(4), 24-32 [cit. 2023-08-02]. ISSN 1536-1268. Dostupné z: doi:10.1109/MPRV.2010.54
- [17] LEA-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet. *LEA-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet* [online]. Ublox, 2017 [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/LEA-6\\_DataSheet\\_%28UBX-14044797%29.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/LEA-6_DataSheet_%28UBX-14044797%29.pdf)
- [18] SIM7600E-H 4G HAT. *SIM7600E-H 4G HAT* [online]. Waveshare [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: [https://www.waveshare.com/wiki/SIM7600E-H\\_4G\\_HAT](https://www.waveshare.com/wiki/SIM7600E-H_4G_HAT)
- [19] NGUYEN, Huan Cong, Rafhael AMORIM, Jeroen WIGARD, Istvan Z. KOVACS a Preben MOGENSEN. Using LTE Networks for UAV Command and Control Link: A Rural-Area Coverage Analysis. In: *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-6 [cit. 2023-08-06]. ISBN 978-1-5090-5935-5. Dostupné z: doi:10.1109/VTCFall.2017.8287894



- [20] GHARIB, Mohammed, Shashidhar NANDADAPU a Fatemeh AFGHAH. An Exhaustive Study of Using Commercial LTE Network for UAV Communication in Rural Areas. In: *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)* [online]. IEEE, 2021, s. 1-6 [cit. 2023-08-06]. ISBN 978-1-7281-9441-7. Dostupné z: doi:10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473547
- [21] KOUBAA, Anis, Azza ALLOUCH, Maram ALAJLAN, Yasir JAVED, Abdelfettah BELGHITH a Mohamed KHALGUI. Micro Air Vehicle Link (MAVlink) in a Nutshell: A Survey. *IEEE Access* [online]. 2019, 7, 87658-87680 [cit. 2023-08-06]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2019.2924410
- [22] ALLOUCH, Azza, Omar CHEIKHROUHOU, Anis KOUBAA, Mohamed KHALGUI a Tarek ABBES. MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems. In: *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)* [online]. IEEE, 2019, s. 621-628 [cit. 2023-08-06]. ISBN 978-1-5386-7747-6. Dostupné z: doi:10.1109/IWCMC.2019.8766667
- [23] ZIMMERMANN, H. OSI Reference Model--The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection. *IEEE Transactions on Communications* [online]. 1980, 28(4), 425-432 [cit. 2023-08-06]. ISSN 0096-2244. Dostupné z: doi:10.1109/TCOM.1980.1094702
- [24] MEIER, Lorenz, Petri TANSKANEN, Friedrich FRAUNDORFER a Marc POLLEFEYS. PIXHAWK: A system for autonomous flight using onboard computer vision. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. IEEE, 2011, s. 2992-2997 [cit. 2023-08-06]. ISBN 978-1-61284-386-5. Dostupné z: doi:10.1109/ICRA.2011.5980229
- [25] MALONY, A.D., D.H. HAMMERSLAG a D.J. JABLONOWSKI. Traceview: a trace visualization tool. *IEEE Software* [online]. 1991, 8(5), 19-28 [cit. 2023-08-06]. ISSN 0740-7459. Dostupné z: doi:10.1109/52.84213