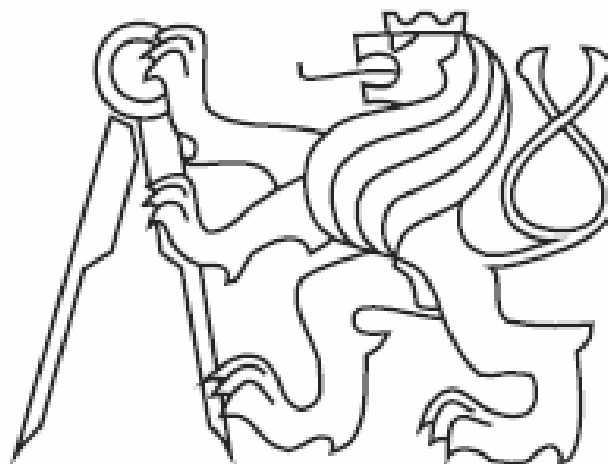


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



DIPLOMOVÁ PRÁCE

System přenosu dat z/do bezpilotního prostředku

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jan Roháč, Ph.D.

Autor:

Bc. Petr Pahorecký

Praha 2016



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Petr Pahorecký**

Obor: **Letecké a kosmické systémy/Kybernetika a robotika**

Název tématu česky: **Systém přenosu dat z/do bezpilotního prostředku**

Název tématu anglicky: **Communication link of unmanned aerial vehicle**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte systém pro přenos dat z/do UAV prostředku umožňující obousměrnou komunikaci mezi pozemní stanicí a UAV ve volném prostředí na vzdálenosti větší než 500 m pro přenos videa s rozlišením min. 720 px při 30 snímcích/s a dat určených pro řízení daného prostředku. Optimalizujte dané řešení z pohledu rychlosti přenosu, resp. kapacity kanálu. Pro přenos videa navrhněte a aplikujte vhodný typ komprese tak, aby nebylo nutné snižovat frekvenci snímkování. Doporučený formát kódování videa je H.264. Při volbě frekvence komunikačního kanálu respektujte volné frekvence a volná pásma definovaná Českým telekomunikačním úřadem. Navrhněte vhodný typ anténního bloku a jeho umístění na UAV. Jako platforma bude použit bezpilotní prostředek AR drone 2.0. Realizovaný systém přenosu dat otestujte a experimentálně ověřte. Proveďte analýzu přenosové kapacity kanálu v závislosti na vzdálenosti mezi pozemní stanicí a UAV a na výkonu vysílače.

Seznam odborné literatury:

- [1] N. Benvenuto, R. Corvaja, and L. N. Erseghe: Communication Systems, Fundamentals and Design Methods. WILEY, 2007
- [2] L.I. Couch: Digital and Analog Communication Systems, Seventh Edition, Pearson Education, 2007

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Roháč, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 10. prosince 2015

Platnost zadání do¹: 30. září 2017

L.S.

doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 12. 2015

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Poděkování

Především bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Janu Roháčovi, Ph.D. za připomínky, pomoc, cenné rady a trpělivost při zpracování diplomové práce.

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.

Datum : 6.1.2017

Podpis

Abstrakt

V práci je popsán návrh a realizace komunikačního kanálu mezi pozemní stanicí a dronem (AR Drone 2.0) na vzdálenost větší než 500m. Byly popsány 3 možné přenosové kanály, kde 2 z nich mají přenos videa pomocí LTE sítě. Další komunikační kanál je využití standardu 802.11n, který poskytuje dostatečnou rychlost pro přenos videa 720p. Z důvodu stability signálu byla upravena anténa na dronu tak, aby signál nebyl proměnný v závislosti na kurzu. Maximální testovaná vzdálenost byla 1800m, kde byl přenos 720p videa stále stabilní.

Abstract

The paper describes the design and implementation of a communication channel between a ground station and a drone (AR Drone 2.0) at a distance of over 500m. Three possible transmission channels were described of which two employ LTE networks for video streaming. The other communication channel uses 802.11n, which provides sufficient speed for 720p video streaming. The drone antenna was adjusted to ensure the stability of the signal so that the signal did not vary depending on the course. The maximum tested distance was 1.800 meters, whereby the transmission of 720p video remained stable.

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
1 Úvod.....	1
2 Kvadrokoptéra	2
2.1 Kinematika a dynamika	2
2.1.1 Equilibrium	3
2.1.2 Pohyb v ose Z.....	4
2.1.3 Změna kurzu	4
2.1.4 Náklon a sklon – pohyb v ose x a y.....	4
3 Komunikace	6
3.1 Šíření radiových vln	6
3.2 Fresnelova zóna.....	7
3.3 Modulační a přenosová rychlost.....	7
3.3.1 Modulace.....	8
3.4 IEEE 802.11n.....	8
3.5 Charakteristiky antén	10
3.5.1 Základní antény	10
3.5.2 Kruhová anténa SPW.....	11
4 Vysokorychlostní internet v mobilních sítích	12
4.1 Pokrytí LTE v ČR.....	12
5 AR Drone 2.0.....	15
5.1 Hardware.....	15
5.1.1 Popis	15
5.2 Software	16
6 Propustnost komunikačního kanálu.....	18
6.1 Minimální datová propustnost kanálu.....	18
6.1.1 Kodeky implementovány v AR Drone 2.0	18
6.1.2 Datový přenos videa při použití H264.....	19
6.1.3 Test kvalita videa	19
6.1.4 Celkový datový přenos	20

6.1.5	Latence videa	20
7	Návrh připojení AR Drone s pozemní stanicí.....	22
7.1	Analýza navržených připojení	22
7.2	Výběr komunikační frekvence.....	23
7.2.1	Sdílené frekvence dle ČTÚ.....	23
7.2.2	Útlum signálu pro 500m.....	24
7.2.3	Speciální frekvence pro modely letadel	25
7.2.4	Nově používaná frekvence pro modely letadel	25
7.2.5	Kmitočet pro přenos videa dle ČTÚ	26
7.3	Vyhodnocení návrhu	27
8	Realizované připojení	28
8.1	Přídavná anténa na dron.....	30
8.2	Měření výkonu vnitřní a venkovní antény	31
8.2.1	Vnitřní anténa.....	32
8.2.2	Externí anténa	33
8.2.3	Hotová realizace s namontovanou venkovní anténou	34
8.2.4	Porovnání výsledků měření mezi vnitřní a venkovní anténou.....	36
8.2.5	Měření maximálního dosahu spojení mezi pozemní stanicí a dronem	38
9	Komunikační software	43
9.1	Souhrn aktuálně dostupných aplikací	43
9.1.1	EASYDrone.....	43
9.1.2	JavaDrone.....	43
9.1.3	Ar Drone v. 2 control software for Windows	43
9.1.4	YADrone.....	43
9.2	CVUTDrone.....	44
9.3	Automatické připojení.....	45
10	Závěr	47
11	Přílohy	48
13	Citace	49

Seznam obrázků

Obr. 1 - Konfigurace [13].....	2
Obr. 2 - fyzikální popis [13]	3
Obr. 3 - Fresnelova zóna [5].....	7
Obr. 4 - Základní zářiče (dipól, prut) [2].....	10
Obr. 5 – Charakteristika prutové antény [2].....	10
Obr. 6 - Skew Antenna Planar Wheel [3]	11
Obr. 7 - Vyzařovací charakteristika SPW antény pro 2,4GHz [3]	11
Obr. 8 - LTE nadstavba nad HSPA+ [12]	12
Obr. 9 - Mapa pokrytí LTE - O2 [11]	13
Obr. 10 - Mapa pokrytí LTE - T-mobile [11]	13
Obr. 11 - Mapa pokrytí LTE – Vodafone [11]	14
Obr. 12 - AR Drone	15
Obr. 13 - Software.....	16
Obr. 14 - Test kvality videa.....	19
Obr. 15 - Test zpoždění s originální aplikací ARFreeFlight 2.4	21
Obr. 16 - Test zpoždění s aplikací YADrone.....	21
Obr. 17 - Navrhnuté komunikační trasy.....	22
Obr. 18 - Útlum signálu v závislosti na frekvenci pro 500m	24
Obr. 19- Útlum prostředí pro frekvenci 35MHz.....	25
Obr. 20 - Útlum prostředí pro 2,4GHz	26
Obr. 21 - Pozemní anténa včetně směrovače.....	28
Obr. 22 - Bezdrátový modul Atheros6103	28
Obr. 23 - Útlum signálu pro 2,4GHz s maximálním povoleným výkonem.....	29
Obr. 24 - Kruhová anténa.....	30
Obr. 25 - útlum signálu externí vs interní antény @ 61m	30
Obr. 26 - Umístění a tvar vnitřní antény	31
Obr. 27 - Útlum signálu s interní anténou	32
Obr. 28 – Přední pohled vnitřní antény [7].....	33
Obr. 29 - Zadní pohled vnitřní antény [7]	34
Obr. 30 - Dron s externí anténou	35
Obr. 31 - Útlum signálu s externí anténou.....	35
Obr. 32 - Externí vs interní anténa pro vzdálenost 200m.....	36
Obr. 33 - Externí vs interní anténa pro vzdálenost 500m	37
Obr. 34 - Poloha měření [maps.google.com].....	38
Obr. 35 - Měření maximálního dosahu s vnitřní anténou	39
Obr. 36 - Měření maximálního dosahu s externí anténou.....	40
Obr. 37 - Umístění antény.....	41
Obr. 38 - Zaznamenávací stanice	42
Obr. 39 – Vizualizace aplikace.....	44

Obr. 40 - Nainstalované soubory	45
Obr. 41 - Nastavení AR AutoConnect.....	46

Seznam tabulek

Tab. 1 - Přehled rychlostí připojení a modulace	9
Tab. 2 – Pokrytí LTE v ČR k 7.3.2016 [11]	14
Tab. 3 – Datový tok videa známých poskytovatelů [15]	19
Tab. 4 - Max. vyzářený výkon pro dané kmitočtové pásmo	23
Tab. 5 - Přehled útlumu v závislosti na kmitočtovém pásmu	24
Tab. 6 - Útlum signálu s vnitřní anténou	33
Tab. 7 - Útlum signálu s externí anténou	35
Tab. 8 - Porovnání externí a interní antény	37

1 Úvod

Na trhu je možno pořídit nejen profesionální drony v cenové relaci 20 – 40 tis., které se používají pro filmový průmysl či natáčení sportovních přenosů, ale i mnoho cenově přijatelných dronů v cenové relaci okolo 5 tisíc. Levnější drony nebývají schopny pojmout tak velký náklad a rovněž sensorika těchto dronů nebývá nejlepší v porovnání s profesionálními drony. Avšak většina aktuální nabídky nemá zdaleka využít plný potenciál dronu a to i přestože disponuje značnou výbavou z hlediska sensorové techniky. Největší kámen úrazu je u většiny modelů software, kde některé senzory nebývají ani použity a počítá se s nimi do dalších verzí firmwaru. Například inerciální soustavy dronu bývají použity pouze pro stabilizaci dronu, nikoliv pro určení polohy. Z toho důvodu se drony v této kategorii řídí pouze na přímou viditelnost a radiový dosah dronu. V případě přenosu i videa se pohybuje v desítkách metrů, pokud se přenáší pouze řídicí příkazy je dosah až po stovky metrů.

Kvadroptéry či oktokopty se začínají nyní i v České republice testovat pro dodání zboží v blízkých oblastech okolo skladu. Tyto lety musí být plně autonomní, jelikož na dané vzdálenosti není dron v dohledné vzdálenosti a rovněž již není signál pro komunikaci s dronem dostatečný. To však vede k ohlášení a evidenci těchto letů a tedy i podléhání norem Českého telekomunikačního úřadu, dále jen ČTU.

Stávající podoba dronu disponuje plošnou anténou na základní desce plošných spojů uvnitř dronu, to s sebou přináší jednak útlum signálu tělem dronu, tak snížení přenosové rychlosti z důvodu odrazů signálu uvnitř dronu. To má za následek rapidní snížení radiového dosahu a právě proto je cíl práce návrh komunikačního kanálu, tedy radiového dosahu, na desetinásobek původního radiového dosahu AR Dronu 2.0, čili na 500 m. Zásadní částí zadání je, aby navržený komunikační kanál byl schopen přenést video v rozlišení 720p při 30 snímcích za vteřinu. Na tuto vzdálenost již je dron těžko viditelný proto je stabilní přenos videa důležitým požadavkem. Toto je značně limitující faktor z hlediska minimálního datového toku kanálu a limitů pro přenos videa dle ČTU. ČTU v dokumentu „Doplněk X“ rovněž definuje, že veškeré lety s modelem bezpilotního letadla¹, který není na přímou viditelnost, musí být ohlášen. Vzdálenost 500 m se dá považovat za stále dohlednou vzdálenost.

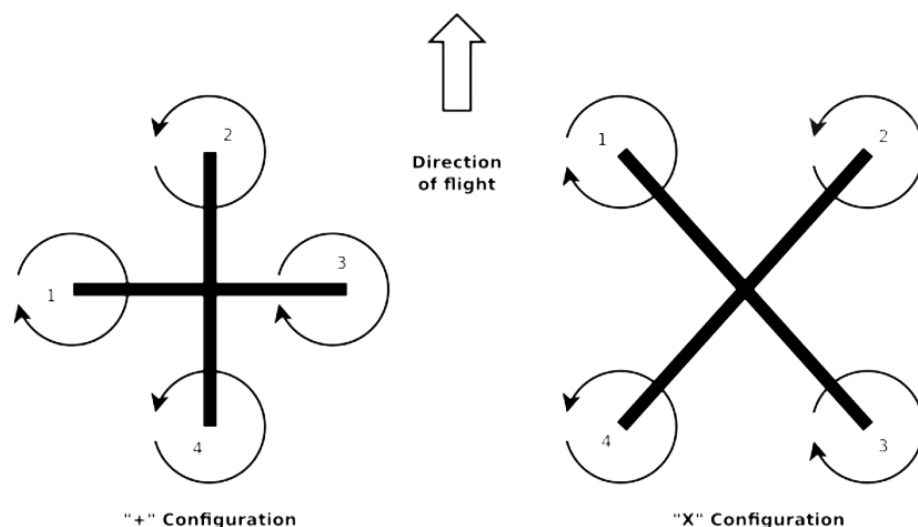
¹ do této kategorie spadají veškeré modely do 20kg

2 Kvadrokoptéra

Jak již název napovídá, jedná se o helikoptéru se 4 motory, která bez složitých řídicích algoritmů není schopna pohybu. Těžiště bývá umístěno co nejbližě středu. Pohyb je konán pouze změnou tahu, popř. momentu, na jednotlivých motorech. Toho je dosaženo pouze změnou otáček motoru.

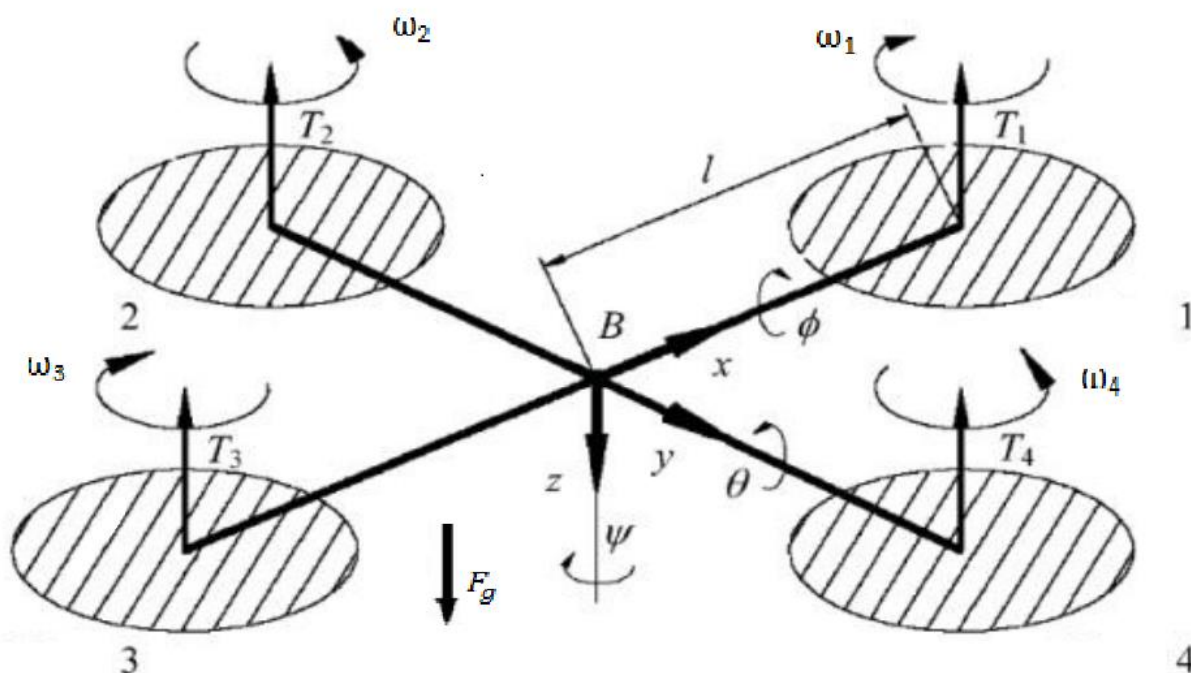
2.1 Kinematika a dynamika

Existují dvě možné konfigurace: plusová ve tvaru znaménka „+“ a X-ová ve tvaru písmene „x“, jak ukazuje obr. 1, dle typu konfigurace rozlišujeme souřadnou soustavu. Jediný rozdíl mezi těmito konfiguracemi je rotace kolem vertikální (Z-ové) osy o 45° . [13]



Obr. 1 - Konfigurace [13]

Motory jsou označeny po směru hodinových ručiček a každý druhý má opačný směr otáčení, tedy motory 1 a 3 budou mít opačný směr otáčení oproti motorům 2 a 4. Kompenzuje se tím třetí Newtonův zákon akce a reakce, a je docíleno nulového momentu. Důležité je, aby vrtule na motorech s obráceným směrem otáčení měly rovněž opačný úhel náběhu tak, aby směr tahu byl pro všechny motory stejný, zobrazeno na obr. 2.



Obr. 2 - fyzikalni popis [13]

T_i – tah jednotlivých motorů, ω_i – úhlová rychlost, θ – úhel sklonu (pitch), ϕ – úhel náklonu (roll), ψ – kurzový úhel (yaw)

2.1.1 Equilibrium

Pro rovnovážný stav jsou postačující čtyři následující podmínky:

$$T = \sum_{i=1}^4 T_i = F_g = mg, \quad (2-1)$$

kde $T_{1,2,3,4}$ mají vzájemně stejný směr, ale opačný oproti F_g , kde $F_g \parallel z$, (2-2)

$$\sum_{i=1}^4 M_i = 0 \quad a \quad (2-3)$$

$$(\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4) = 0, \quad (2-4)$$

kde m je hmotnost dronu a g je gravitační konstanta. Při nesplnění výše uvedených podmínek dochází k pohybům dronu.

2.1.2 Pohyb v ose Z

V případě nesplnění podmínky (2-1), která se dá vyvolat snížením, popřípadě zvýšením rychlosti motorů, nastane pohyb dronu a to:

$$\sum_{i=1}^4 T_i < F_g, \text{ kladný pohyb v ose } z \quad (2-5)$$

$$\sum_{i=1}^4 T_i > F_g, \text{ záporný pohyb v ose } z \quad (2-6)$$

2.1.3 Změna kurzu

Pro změnu kurzu je nutné změnit rychlosti motorů tak, aby

$$(\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4) \neq 0, \quad (2-7)$$

$$M_z = (M_1 + M_3) - (M_2 + M_4)l = J_z \ddot{\psi}, \quad (2-8)$$

kde J_i je moment setrvačnosti.

To způsobí, že derivace kurzového úhlu již není nulová,

$$\dot{\psi} = k_z [(\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4)], \quad \psi = \int \dot{\psi} dt. \quad (2-9)$$

Změna úhlu je dána dobou působení nerovnovážného stavu.

2.1.4 Náklon a sklon – pohyb v ose x a y

Pro změnu úhlu θ , ϕ a následný pohyb je zapotřebí vyvolat moment se směrem shodným s příslušnou osou. To nastane při nesplnění rovnice (2-4), ale takovým způsobem, aby byla stále splněna rovnice (2-3).

Velikost momentu je následující:

$$M_x = (T_2 - T_4)l, \quad (2-10)$$

$$M_y = (T_1 - T_3)l. \quad (2-11)$$

Vyvoláním momentu nastane změna sklonu, popřípadě náklonu, jak ukazují následující rovnice (2-12),(2-13) a (2-14).

$$\sum_{i=1}^4 T_i = F_g = mg, \quad (2-12)$$

$$\dot{\phi} = k_x (\omega_2 - \omega_4), \quad \phi = \int \dot{\phi} dt, \quad (2-13)$$

$$\dot{\theta} = k_y (\omega_1 - \omega_3), \quad \theta = \int \dot{\theta} dt, \quad (2-14)$$

Změnou náklonu (sklonu) dojde k situaci, kdy vektory tahu již nejsou rovnoběžné s osou z. To znamená nesplnění rovnice (2-2), čímž dojde k rozdělení tahu do dvou složek

$$T_L = T \cos \phi, T_{Dy} = T \sin \phi, \quad (2-15)$$

$$T_L = T \cos \theta, T_{Dx} = T \sin \theta, \quad (2-16)$$

kde T_L je tah || s osou z a T_D je pohyb ve směru osy x, popř. y a musí platit následující rovnice

$$T_L = F_g. \quad (2-17)$$

3 Komunikace

3.1 Šíření radiových vln

Útlum elektromagnetické vlny ve volném prostoru je důsledkem rozptylu vlny do prostoru a účinnou plochou antény, tzv. numerické apertury. Je dán poměrem vyzářeného výkonu a přijímaného výkonu pro všesměrovou anténu. [4]

$$S = P_o \frac{1}{4\pi d^2}, \quad (3-1)$$

kde P_o [W] je vyzářený výkon, $S \left[\frac{W}{m^2}\right]$ je výkon na plochu ve vzdálenosti d [m].

$$P_i = S \frac{\lambda^2}{4\pi}, \quad (3-2)$$

kde P_i [W] je přijímaný výkon, λ [m] je vlnová délka,

$$\text{útlum} = \frac{P_o}{P_i} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2. \quad (3-3)$$

Po převodu do logaritmického měřítka je získáno

$$\text{útlum [dB]} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right). \quad (3-4)$$

Po zavedení $\lambda = \frac{c}{f}$, kde c [ms⁻¹] je rychlost světla a f [Hz] je frekvence vlny, je

$$\text{útlum [dB]} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147,55 \quad (3-5)$$

Z výše uvedeného vztahu (3-5) plyne, že rozptyl elektromagnetické vlny je dán pouze počátečním výkonem a kvadrátem vzdálenosti od přijímací antény. Další úbytek energie je závislý na kmitočtu vlny a je pro daný kmitočet konstantní. [4]

Radiokomunikační rovnice (tzv. Friisův vztah) vyjadřuje přijímaný výkon, jako funkci vysílaného výkonu, zisku antén a útlumu signálu

$$P_i = P_o G_i G_o \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2. \quad (3-6)$$

Zobrazením v logaritmickém tvaru a po dosazení rovnice (3-5) je získáno

$$\begin{aligned} P_i[\text{dB}] &= P_o + G_i + G_o + \text{útlum [dB]}, \\ P_i[\text{dB}] &= P_o + G_i + G_o + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147,55. \end{aligned} \quad (3-7)$$

3.2 Fresnelova zóna

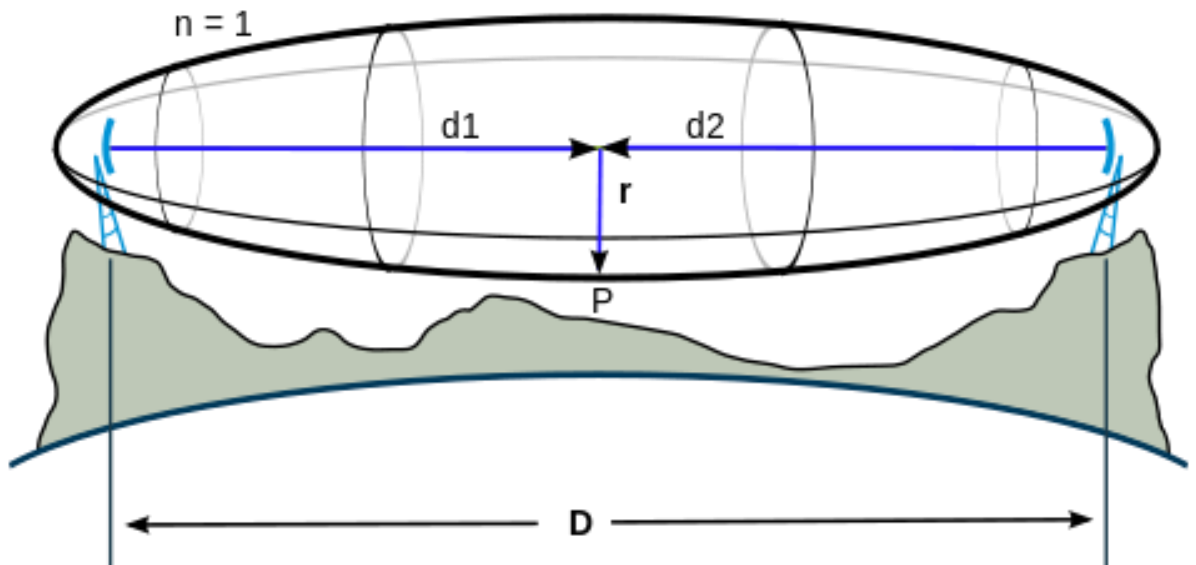
Jedná se o zónu ve tvaru elipsoidu, přes kterou se pohybuje energie mezi vysílačem a přijímačem. Překážky v zóně nemají za následek přímé zhoršení kvality signálu, ale způsobují odrazy a tím i ztrátu paketů, což má za následek snížení přenosové rychlosti. [5]

Fresnelova zóna má n úrovní jak ukazuje následující vztah,

$$F_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (3-8)$$

kde $F_n (= r)$ poloměr [m] v dané vzdálenosti $d_1 d_2$ [m] od antény.

První Fresnelova zóna, zobrazena na obr. 3, je z hlediska přenosu signálu nejvýznamnější, jelikož se v ní přenáší maximum energie, až 90 %. [13]



Obr. 3 - Fresnelova zóna [5]

3.3 Modulační a přenosová rychlost

Pro určení přenosové rychlosti je nejprve potřeba znát rychlost modulační v_m , která vyjadřuje počet signálových prvků za sekundu. Jinak řečeno, je to rychlost, se kterou se mění jednotlivé stavy nosného signálu. Tato rychlost se vyjadřuje v jednotkách Baudech [Bd] a je rovna převrácené hodnotě doby trvání a signálového prvku

$$v_m = \frac{1}{a}. \quad (3-9)$$

Maximální modulační rychlost vychází z Nyquistova-Shannonova teorému, který říká, že modulační rychlost závisí na šířce použitého pásma f_m , jak nám ukazuje následující vztah

$$v_m \leq 2f_m. \quad (3-10)$$

Z toho vyplývá, že maximální modulační rychlost je rovna dvojnásobku šířky pásma.

Druhým potřebným parametrem pro určení přenosové rychlosti je informace, kolik různých stavů n může nabývat jeden signálový prvek – to záleží na použité modulaci. (viz kapitola 3.3.1)

Výsledný vztah pro výpočet přenosové rychlosti v_p [bit s⁻¹] je

$$v_p = v_m \log_2 n. \quad (3-11)$$

Dle Shannonova teorému je maximální přenosová rychlost na dané šířce pásma dána následujícím vztahem

$$v_{pmax} = f_m \log_2 \left(1 + \frac{\text{signál}}{\text{šum}} \right). \quad (3-12)$$

Neboli zvyšování n v závislosti na modulaci je omezeno odstupem signál/šum, čímž je omezena přenosová rychlost. Další navýšení rychlosti je možné pouze navýšením šířky pásma. [4]

3.3.1 Modulace

Modulace je proces, který mění charakter signálu nesoucího informaci pomocí modulujícího signálu. Modulace se dělí dle způsobu modulace na:

- ASK – Amplitude-Shift Keying (odpovídá AM)
- FSK – Frequency-Shift Keying (odpovídá FM) a její speciální případ MSK – Minimum-Shift Keying
- PSK – Phase-Shift Keying (odpovídá PM), typičtí představitelé:
 - BPSK – Binary Phase Shift Keying (dvoustavová)
 - QPSK – Quadrature Phase Shift Keying (čtyřstavová), 8PSK, 16PSK (vícestavové)

Složením více typů modulací získáme:

- QAM - kvadrurní amplitudová modulace, jedná se o složení ASK a PSK

3.4 IEEE 802.11n

Standard 802.11n popisuje komunikační vrstvu založenou na frekvenci 2,4 GHz a 5 GHz. Pro určení přenosové rychlosti kanálu je použit rozhodovací proces, jež je založen na základě zpětné vazby od přijímače o stavu kanálu, díky kterému se upravuje vysílací modulace tak, aby nastal co nejlepší kompromis mezi rychlostí přenosu dat a chybovostí. Standard 802.11n rovněž

definuje možnost použití více komunikačních proudů pro jedno zařízení, čímž je docíleno dalšího zvýšení rychlosti. Z důvodu komplexnosti 802.11n a vzhledem k variabilitě kanálu byl vytvořen koncept kódování MCS². Právě tento typ je trvale upravován na základě aktuálního stavu komunikačního kanálu. Ve standardu je definováno 76 typů, pro potřeby práce je však důležitý pouze přenos MCS 0-7 na frekvenci 2,4 GHz a to na základě hardwaru na AR Dronu popsaného v kapitole 8. V tab. 1 jsou uvedeny přenosové rychlosti pro jednotlivé typy MCS 0-7. Rychlosti jsou navíc rozděleny dle základního módu GI³ = 800 ns a doplňkového GI = 400 ns. [14]

MCS	Modulace	Datová propustnost [Mbps] GI = 800 ns		Datová propustnost [Mbps] GI = 400 ns	
		20 MHz	40 MHz	20 MHz	40 MHz
0	BPSK	6,5	13,5	7,2	15
1	QPSK	13	27	14,4	30
2	QPSK	19,5	40,5	21,7	45
3	QAM16	26	54	28,9	60
4	QAM16	39	81	43,3	90
5	QAM64	52	108	57,8	120
6	QAM64	58,5	121,5	65,0	135
7	QAM64	65	135	72,2	150

Tab. 1 - Přehled rychlostí připojení a modulace

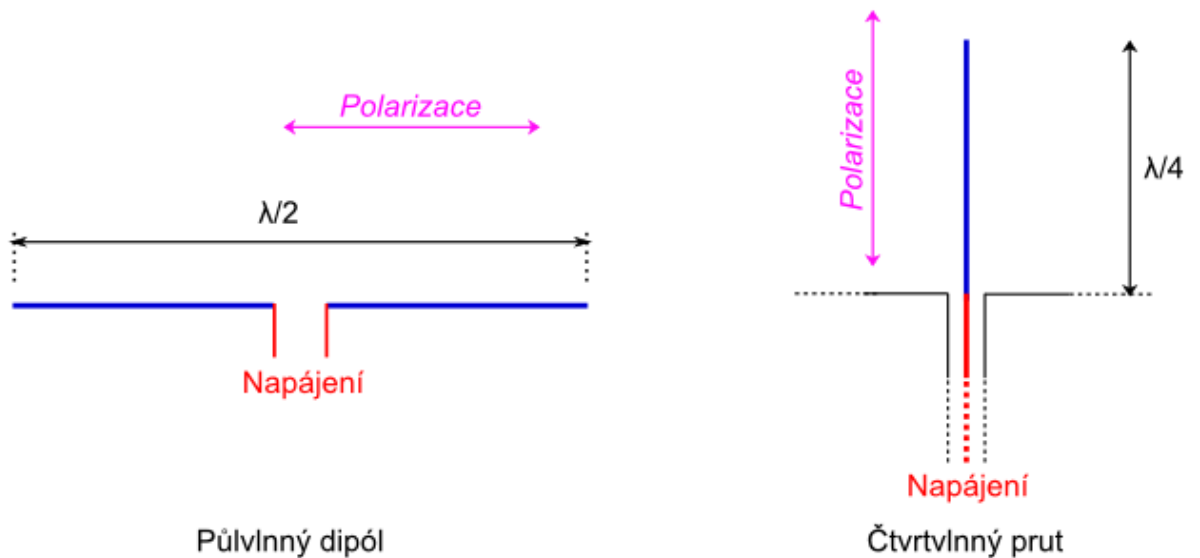
² MCS – Modulation Coding Scheme

³ Guard interval = interval mezi vysílanými signály

3.5 Charakteristiky antén

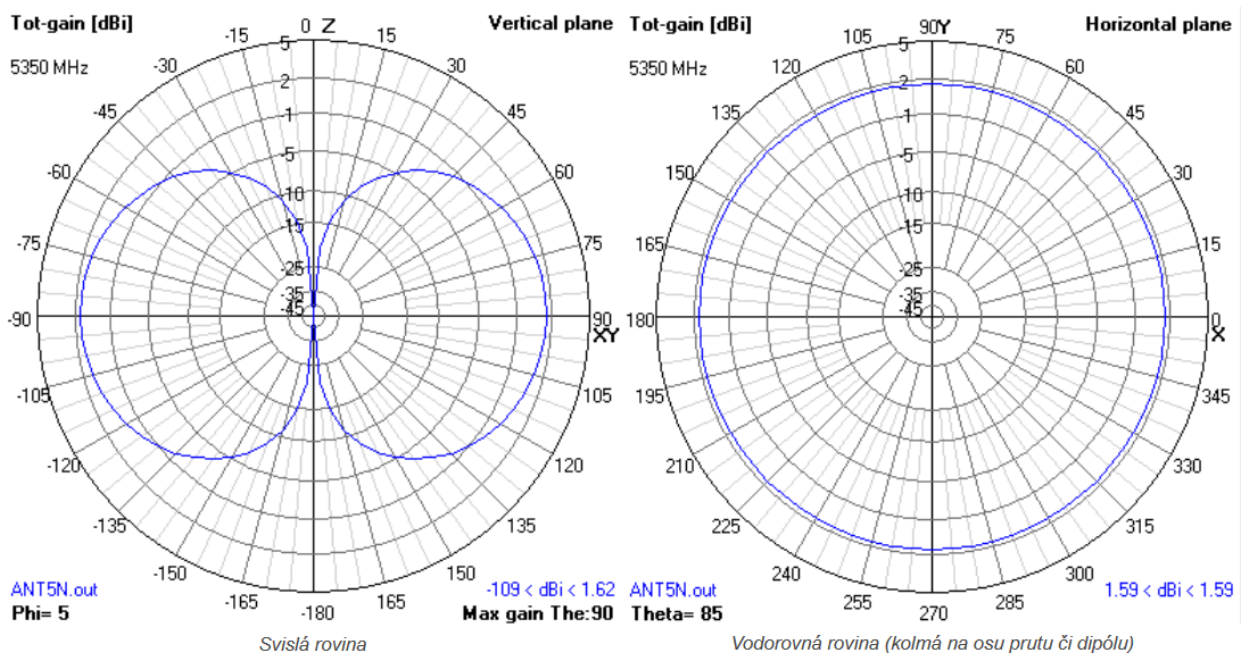
3.5.1 Základní antény

Obr. 4 zobrazuje základní anténní zářiče, a to $\lambda/4$ ("čtvrt vlnný") prut napájený asymetricky na konci a půlvlnný dipól napájený symetricky uprostřed.



Obr. 4 - Základní zářiče (dipól, prut) [2]

Na obr. 5 je zobrazena vyzářovací charakteristika prutu, či dipólu.



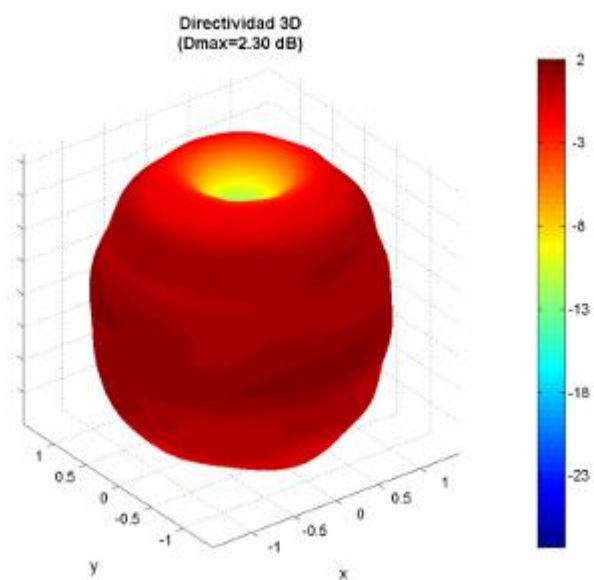
Obr. 5 – Charakteristika prutové antény [2]

3.5.2 Kruhová anténa SPW⁴

Kruhová anténa SPW, zobrazena na obr. 6, dodává oproti dipólu lepší výsledky vzhledem ke směrovosti ve svislé rovině. Z toho důvodu se hojně používají u modelů letadel s přenosem videa. Charakteristika této antény je zobrazena na obr. 7. [3]



Obr. 6 - Skew Antenna Planar Wheel [3]

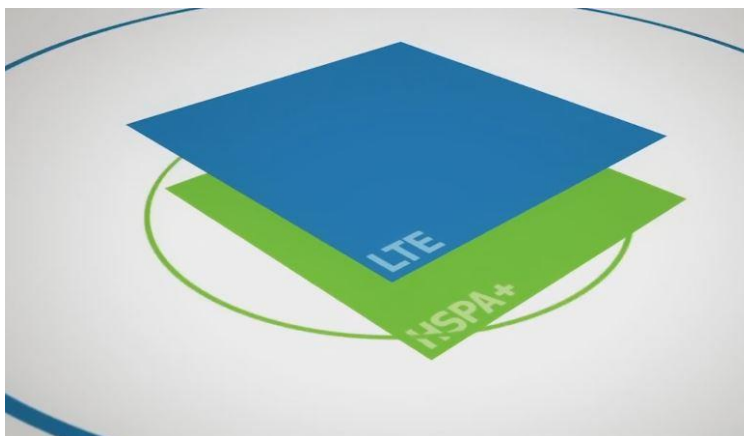


Obr. 7 - Vyařovací charakteristika SPW antény pro 2,4GHz [3]

⁴ Skew Antenna Planar Wheel

4 Vysokorychlostní internet v mobilních sítích

Technologie LTE⁵, v současné době dostupná u všech místních mobilních operátorů, je založena na principech 3G sítí. Vylepšení spočívá pouze v implementaci tzv. LTE nadstavby, ilustrace na obr. 8, takže se nejedná o klasickou síť typu 4G. [12] Za reálnou 4G síť je možné považovat až síť s označením LTE Advanced(LTE-A), nabízenou operátorem T-Mobile a to pouze v lokalitě Praha. LTE-A je založena na navázání komunikačního kanálu na 2 frekvenčních pásmech nejčastěji 800 MHz a 2100 MHz, popř. 800 MHz a 1800 MHz.



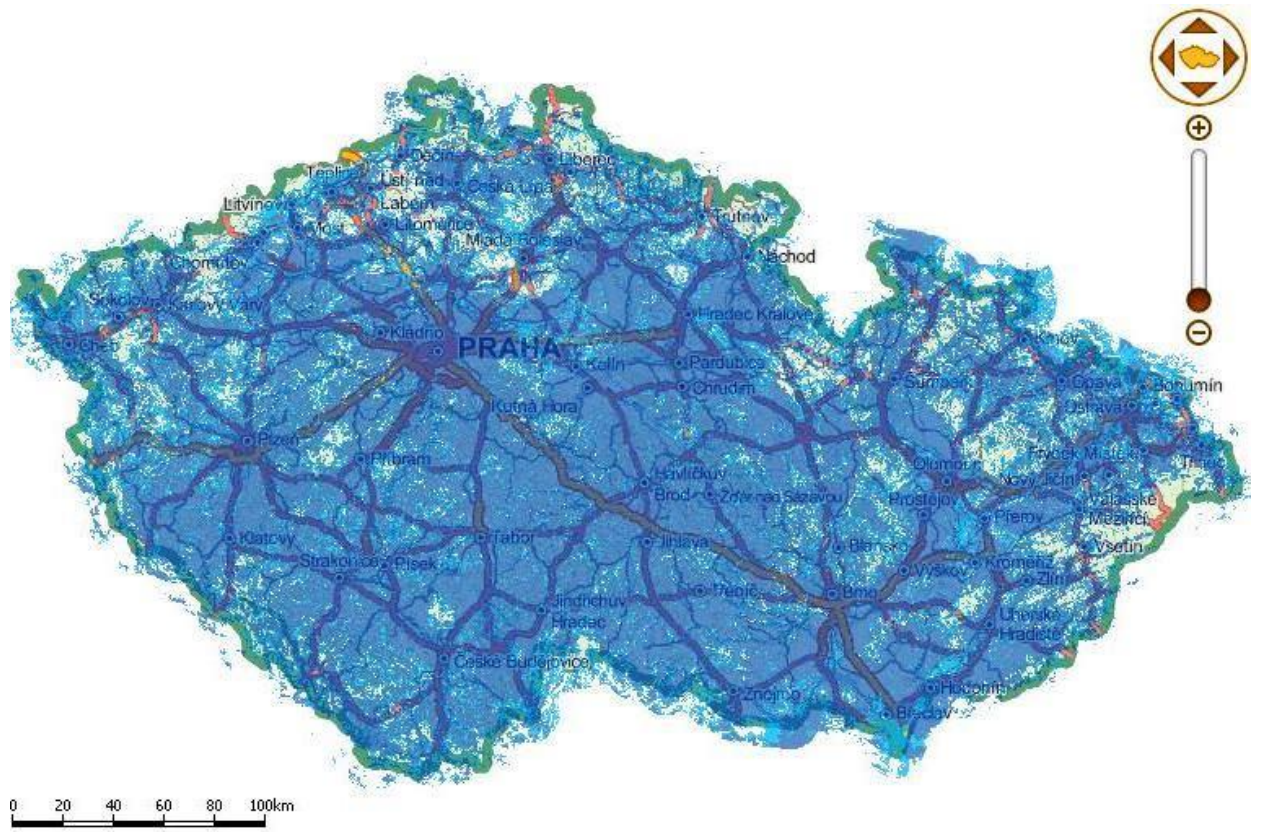
Obr. 8 - LTE nadstavba nad HSPA+ [12]

4.1 Pokrytí LTE v ČR

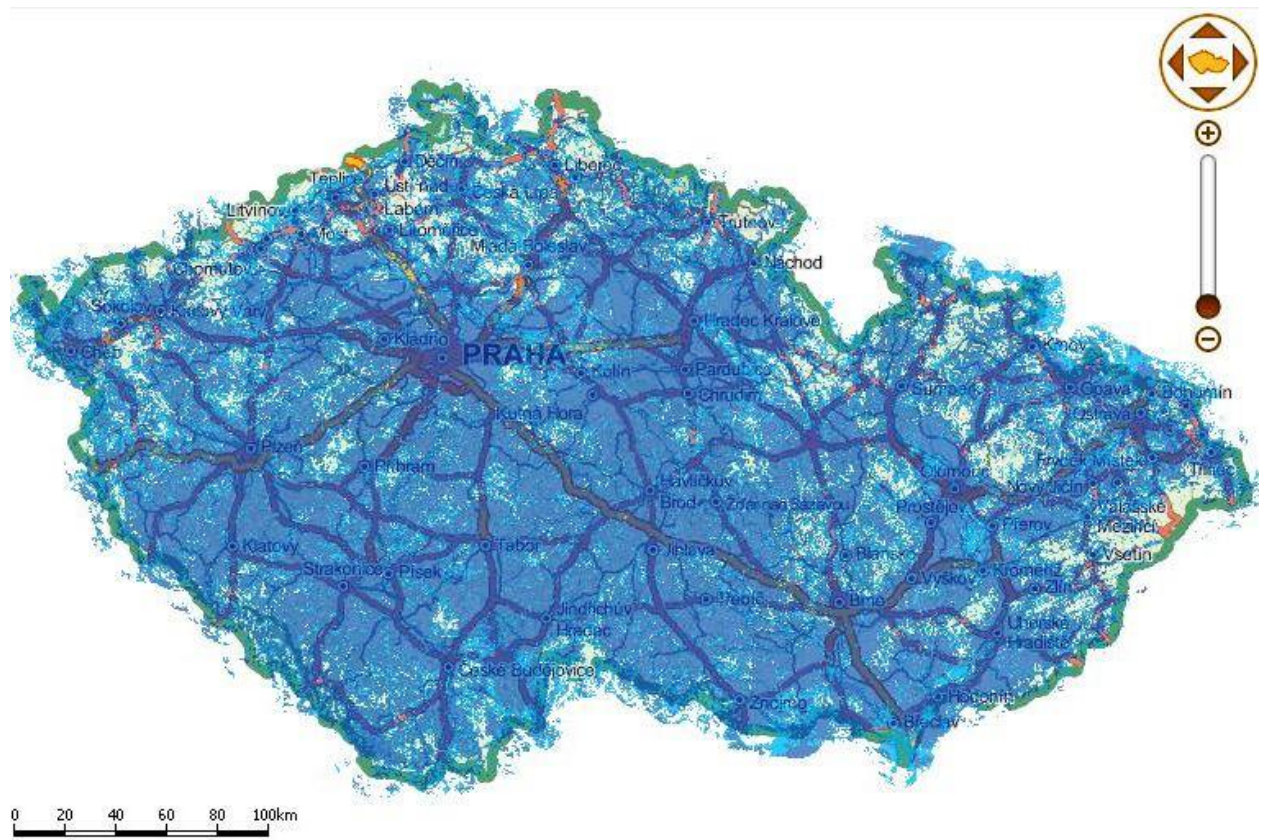
Na základě dat dle ČTU ze dne 7. 3. 2016 bylo vytvořeno následující porovnání. Porovnání se může lišit na internetových stránkách jednotlivých operátorů a to zejména z důvodu rozdílných metod výpočtu. Tento výpočet je proveden dle dokumentu „Výpočet a měření pro účely kontroly pokrytí území signály mobilních širokopásmových datových sítí“, příloha č. 3 k Vyhlášení výběrového řízení za účelem udělení práv k využívání rádiových kmitočtů k zajištění veřejné komunikační sítě v pásmech 800 MHz, 1800 MHz a 2600 MHz.

Nejvíce využívané pásmo je 800MHz, využívané všemi operátory. Pásmo 900MHz využívá pouze operátor Vodafone, pásmo 1800MHz zatím není příliš využito, nejvíce opět využívá Vodafone. Pásmo 2600MHz zatím nevyužívá žádný z operátorů. Následující mapy pokrytí, dle obr. 9, 10, 11, ukazují veškerá pásma dle jednotlivých operátorů. Pokrytí v jednotlivých krajích je zobrazeno v tab. 2. [11]

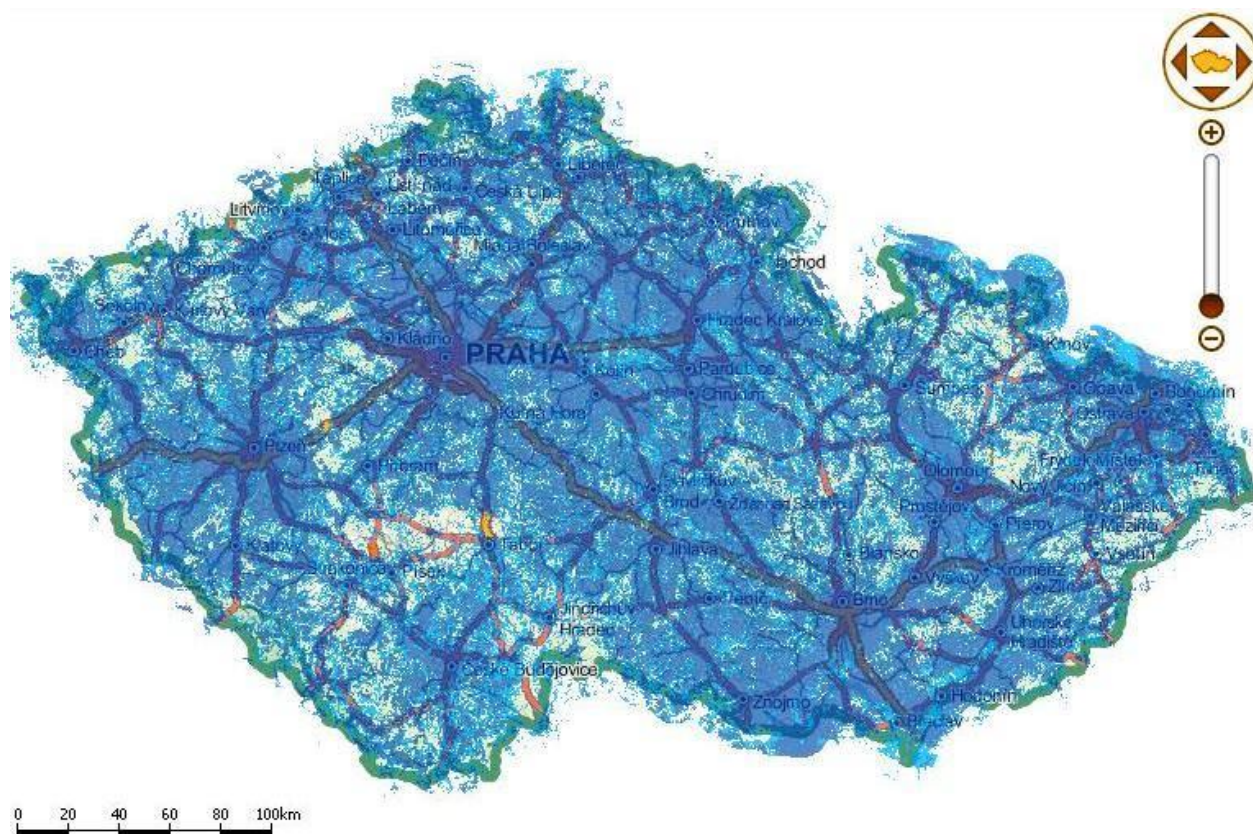
⁵ LTE - Long term evolution



Obr. 9 - Mapa pokrytí LTE - O2 [11]



Obr. 10 - Mapa pokrytí LTE - T-mobile [11]



Obr. 11 - Mapa pokrytí LTE – Vodafone [11]

	Rozloha[km ²]	O2	T-mobile	Vodafone
Praha	495,9	100,0%	99,9%	99,5%
Jihočeský kraj	10 070,1	94,4%	93,0%	66,5%
Jihomoravský kraj	7 208,4	94,1%	90,8%	87,3%
Karlovarský kraj	4 304,0	78,0%	76,4%	76,7%
Kraj Vysočina	6 791,3	98,6%	97,6%	91,0%
Královéhradecký kraj	4 769,4	82,7%	81,4%	90,8%
Liberecký kraj	3 170,2	71,6%	69,2%	84,6%
Moravskoslezský kraj	5 450,2	81,0%	78,4%	78,3%
Olomoucký kraj	5 273,7	86,1%	83,3%	81,7%
Pardubický kraj	4 519,6	90,6%	87,4%	87,4%
Plzeňský kraj	8 003,6	89,2%	89,8%	83,0%
Středočeský kraj	11 009,6	92,9%	92,6%	89,6%
Ústecký kraj	5 350,3	68,4%	67,6%	81,4%
Zlínský kraj	3 969,3	77,4%	74,8%	78,2%
Česká republika	80 385,6	87,3%	85,8%	82,7%

Tab. 2 – Pokrytí LTE v ČR k 7.3.2016 [11]

5 AR Drone 2.0

Jedná se o kvadrokoptéru, zobrazenou na obr. 12, která je hlavním produktem firmy Parrot. Díky příznivé ceně a kvalitnímu zpracování se hojně rozšířila a začalo pro ni vznikat více variant řízení, jak automatických tak ručních.



Obr. 12 - AR Drone

5.1 Hardware

5.1.1 Popis

Jak již název napovídá, jedná se o dron se 4 voděodolnými motory o výkonu 14,5 W s maximálními otáčkami 28500 otáček za sekund a poloměru vrtule 62mm. Je vyrobena z karbonových vláken a ve venkovním provedení váží pouze 380 g.

Dron rovněž disponuje dvojicí kamer horizontální pro videostreaming 720p⁶ 30 fps⁷ se širokouhlým objektivem a vertikální 320p 60 fps, která se používá pro měření rychlosti vůči zemi.

O řízení dronu se stará 32bitový procesor ARM Cortex A8 pracující na frekvenci 1 GHz společně s digitálním signálovým procesorem DSP TMS320DMC64x, sloužícím ke zpracování videosignálu. Systém je dále vybaven paměťovými moduly typu DDR2 pracujícími na frekvenci 200 MHz, komunikačním čipem pro bezdrátový přenos a rozhraními USB 2.0 pro možnost připojení externího paměťového média nebo GPS modulu.

⁶ P = progresivní vykreslování

⁷ Frame per second , počet snímků za sekundu.

Vlastnosti použitých senzorů:

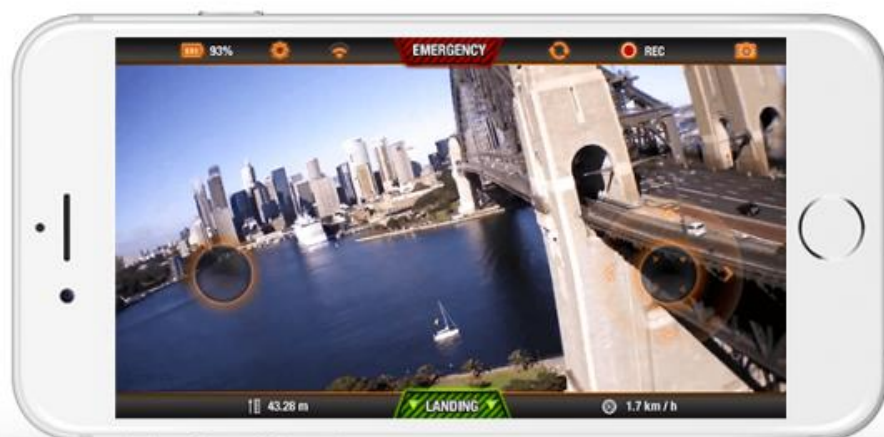
- 3-osý gyroskop s přesností 2000 °/s,
- 3-osý akcelerometr s přesností ± 50 mg,
- 3-osý magnetometr s přesností ± 6 °,
- senzor tlaku s přesností ± 10 Pa,
- ultrazvukový senzor.

Klíčové vlastnosti:

- až 12 minutový let,
- dosah 50m,
- 720p stream,
- ovládání pomocí mobilního zařízení.

5.2 Software

Dron je určen pro mobilní zařízení Android a IOS, pro které je vyvinuta oficiální aplikace s názvem *AR.FreeFlight 2.4*. Aplikace umožňuje jednoduché a intuitivní ovládání dronu dvěma volitelnými módy. První mód využívá akcelerometru v mobilním telefonu, kdy nakláněním telefonu měníme polohu dronu. Druhým režimem je takzvaný joystick mód, kdy se křížovým ovladačem ovládá otočení a výška dronu a druhým jeho natočení. Tento mód se dá využít relativně nebo absolutně. V relativním módu mění se vždy úhel náběhu a náklonu podle směru dronu (směrem k záběru kamery). Při absolutním módu se směrový úhel „zafixuje“ k magnetickému severu, dle magnetometru, a poté se úhel náběhu a náklonu mění dle této osy, nikoliv vzhledem k natočení dronu.



Obr. 13 - Software

Další možností je nastavení maximálních náklonů, rychlosti a maximální výšky. Nastavení se dělí na venkovní a vnitřní, pro každé platí jiná výšková a rychlostní omezení. [9]

Kvalitu streamovaného videa není možné nastavit. Je dána továrním nastavením aplikace a použitého zařízení. Informace o nastavení jsou dostupné pouze pro operační systém IOS na zařízeních Apple:

- iPhone 4S : 360p, 30 fps, 4 Mbps
- iPhone 4 : 360p, 25 fps, 1,5 Mbps
- iPhone 3GS : 360p, 15 fps, 500 kbps

Zajímavou funkcí je také možnost dokoupit GPS modul a využít plánování tras pro autonomní let. Pro tento účel existuje nadstavba AutoFlight Mode, další zajímavá softwarová nadstavba je například Director Mode, který je určen pro natáčení.

Tyto funkce nebylo možné ověřit z důvodu nedostupnosti modulů.

6 Propustnost komunikačního kanálu

Pro navržení spoje je nutné znát celkovou datovou náročnost. Komunikace je rozdělena do několika kanálů [9]:

- řídicí příkazy, 30x za sekundu
- navigační data, 15 (demo)-200 (debug)x za sekundu
- přenos videa, 30x za sekundu

6.1 Minimální datová propustnost kanálu

Na základě zadání je nutné přenést video v rozlišení 720p při 30 snímcích za sekundu. Jelikož řídicí příkazy i navigační data jsou pouze textové informace o maximální velikosti v řádu desítek kbps, bude video nejnáročnější datová část.

Datová náročnost videa je dána velikostí datového toku, jenž je určen následujícím vztahem (6-1).

$$\text{datový tok [bit]} = \text{šířka} \times \text{výška} \times \text{RGB} \times \text{FPS}, \quad (6-1)$$

kde RGB jsou jednotlivé složky barvy v rozlišení 8 bitů $2^8 = 256$ odstínů na barvu, tedy celkem 16,7 mil. barev (24 bit), fps = 30.

V případě rozlišení videa 720p (šířka 720 pixelů, výška 1280) je výsledný datový tok 632Mb za sekundu, pro snížení datového přenosu je nutné použít dostupné kodeky.

6.1.1 Kodeky implementovány v AR Drone 2.0

AR Drone 2.0 již využívá standardní H264 (MPEG 4.10 AVC⁸) kodek, oproti předchozí generaci, kde byla využita jeho obdoba P264. Dron disponuje hardwarovým H264 (MPEG 4.10 AVC) enkodérem a softwarovým MPEG 4.2 (ASP⁹) enkodérem. Softwarový enkodér je využit pouze při nahrávání videa na USB flash na dronu. Maximální kvalita videa, tedy i nastavení hardwarového enkodéru je 720p, 30 fps a 4 Mbps, kdežto při použití softwarového enkodéru lze maximální datový tok, opět pro 720p a 30 fps, nastavit pouze na 1 Mbps. [9]

Jelikož je kodek MPEG 4.10 až 2x efektivnější při zachování stejné kvality videa než MPEG 4.2, je výhradní použití H264 kodeku nejvhodnější. [10]

⁸ Advanced Video Coding

⁹ Advanced Simple Profile

6.1.2 Datový přenos videa při použití H264

Kodek H264 byl standardizován pro přenos videa již v roce 2003 a to z důvodu vzniku HD videí, kde je možnost snížení datového toku na úkor kvality videa. V tab. 3 je bitrate světových poskytovatelů streamovaného videa při 720p:

Poskytovatel	Datový přenos [kbps]
BBC	3200
Netflix	3600
iTunes	4000
Youtube (720p)	2500
Nova DVB-T2(1080i)	4400

Tab. 3 – Datový tok videa známých poskytovatelů [15]

6.1.3 Test kvalita videa

Video z kamery je možné zasílat, popřípadě nahrávat v rozlišení 720p s 30 fps, kde datový tok lze nastavit na konkrétní hodnotu, popřípadě „neomezeně“ což odpovídá hodnotě maximálního datového toku 4000 kbps. Na obr. 14 je zachycen jeden snímek z testu, který byl proveden za použití aplikace *AR.FreeFlight* 2.4. Jak je vidět, objektiv implementován v dronu je typu „rybí oko“, neboť je vidět soudkovité zkreslení obrazu.



Obr. 14 - Test kvality videa

Aplikace umožňuje nahrání videa na koncové zařízení pro volný pohyb do okruhu 50 m s nastaveným neomezeným datovým přenosem po dobu 210 s. Datový tok v uloženém souboru byl 3978 kbps, což odpovídá nastavené hodnotě.

6.1.4 Celkový datový přenos

Na základě sledování vytíženosti sítě během 10 minutového testování byla potřebná přenosová rychlost pro maximální kvalitu videa 4097 kbps. Tato hodnota obsahuje všechny komunikační kanály. Vzhledem k nastavení videa na 4000 kbps zbývá pro řídicí navigační kanál 97 kbps, což tvoří pouhých 2 % z celkového přenosu.

Florwick, Whiteaker, Amrod a Woodhams (2013, s. 9) uvádí, že průměrný datový tok pro standard 802.11n, popsán v kapitole 3.4, je při MCS7 25 Mbps avšak za dobrých podmínek přenosu signálu. Teoretická rychlost standardu MCS7 je 72,2 Mbps. Z těchto hodnot je možné získat odhad

$$v_t = v_r * \left(\frac{72,2}{25}\right), \quad (6-2)$$

kde v_t je potřebná teoretická rychlost a v_r je potřebná reálná rychlost.

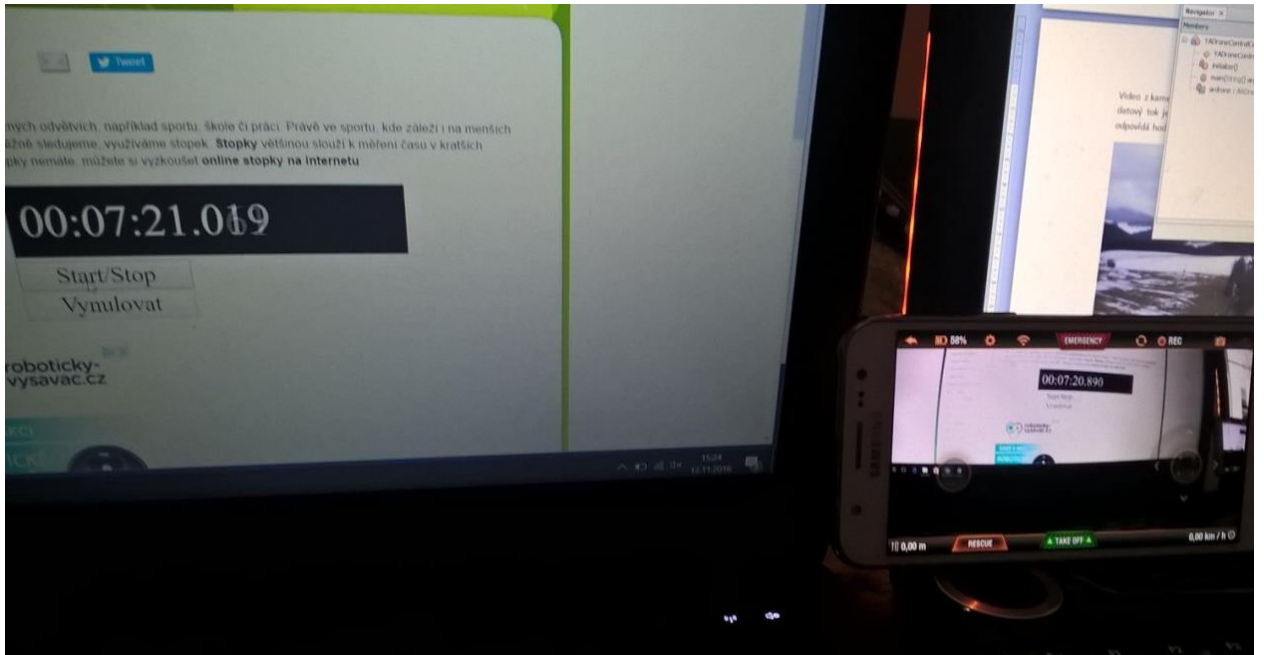
Po dosažení změřené přenosové rychlosti $v_r = 4097$ Kbps je získána potřebná teoretická rychlost $v_t = 11,8$ Mbps. První následující typ spoje pro v_t je úroveň MCS 1, tedy 13Mbps pro GI = 800 ns. Jelikož je rezerva od v_t pouze $\approx 10\%$ bude vzhledem ke stabilitě signálu uvažována min. potřebná úroveň signálu o typ výše, tedy typu MCS 2.

6.1.5 Latence videa

Dalším z parametrů přenášeného videa je jeho zpoždění, tzv. latence. Software *AR.FreeFlight* integruje funkci *Latency Reduction System* určenou pro snížení latence přenášeného videa, která funguje následovně. V případě, že vyrovnávací paměť příchozích snímků obsahuje klíčový snímek, předchozí snímky se zahodí a rovnou se dekoduje klíčový snímek, tato funkce je rovněž implementována na vysílací straně v dronu.

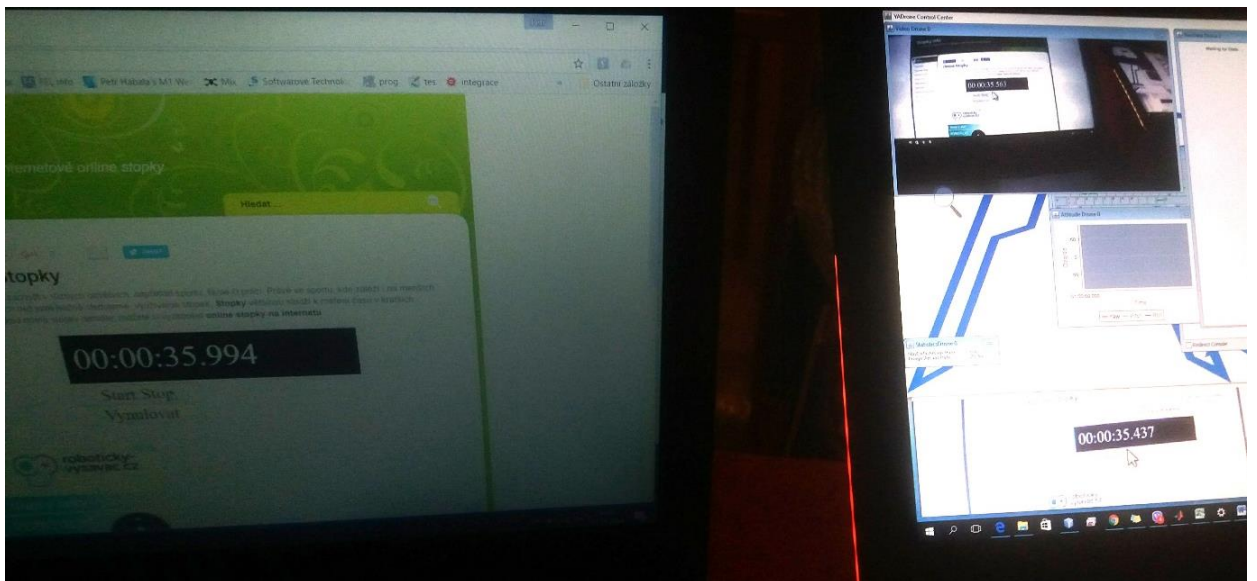
Pro změření celkového zpoždění přenosu videa byl zvolen následující postup. Kamera byla nasměrována na běžící čas a v jeden moment byl pořízen snímek jak vstupního, tak výstupního času, tedy zobrazeného po přenosu videa.

Test byl proveden jak pro originální aplikaci, tak pro aplikaci YADrone. Zpoždění v originální aplikaci bylo do 150ms. Konkrétní hodnota je vidět na obr. 15, čili 7:20,890 - 7:21,019 = 129ms.



Obr. 15 - Test zpoždění s originální aplikací ARFreeFlight 2.4

V Java aplikaci YADrone, popsánu v kapitole 9.1.4, zpoždění dosahovalo průměrně 500ms, konkrétně jak je vidět na obr. 16, čili $35,994 - 35,437 = 557\text{ms}$.



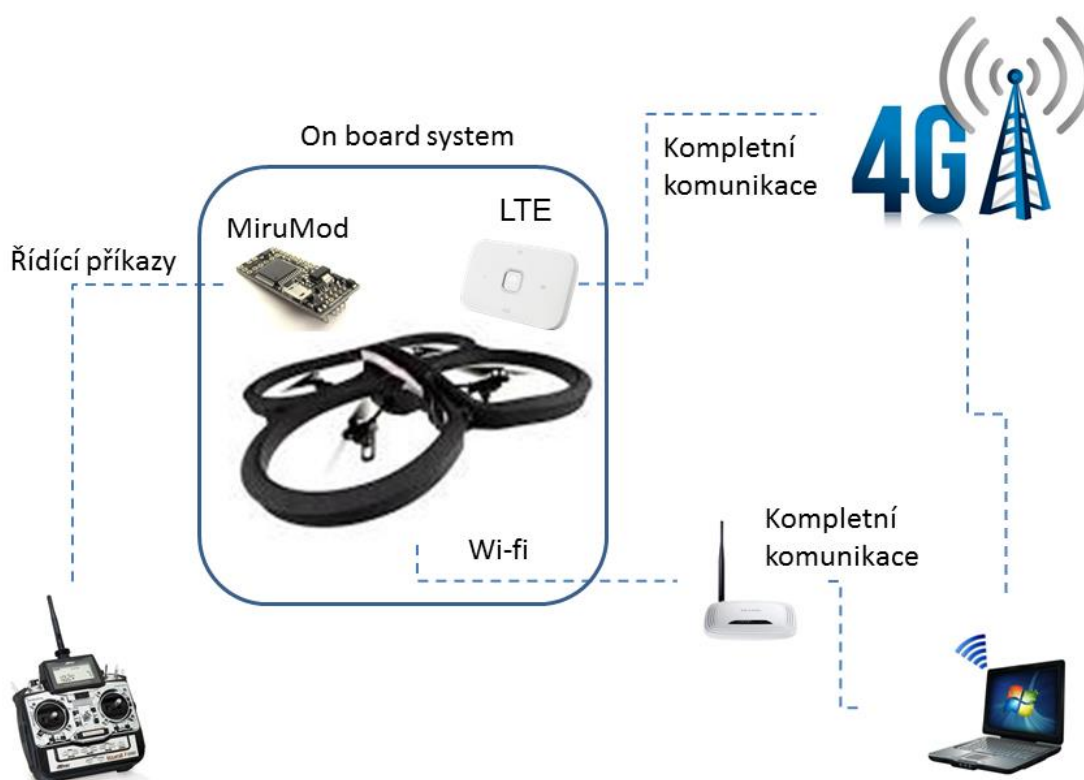
Obr. 16 - Test zpoždění s aplikací YADrone

Tato aplikace využívá dekodovací Java knihovnu XugglerDecoder, která využívá přímo FFmpeg knihovny. Každý příchozí datový paket je okamžitě po obdržení odeslán do FFmpeg knihovny a navrácen již v podobě bitmapy, která se vykresluje. Zpoždění je konstantní jak při snížení kvality videa na 1500 kbps, tak při snížení rozlišení na 360p či snížení fps na hodnotu 15.

Příčinu rozdílu zpoždění $\approx 300\text{ms}$ nebylo možné odhalit.

7 Návrh připojení AR Drone s pozemní stanicí

Navržené schéma komunikačních kanálů obsahuje několik variant. První varianta je komunikace čistě pomocí Wi-Fi dle standardu IEEE 802.11n, kde bude probíhat jak zasílání navigačních dat, tak řídicích příkazů a videa. Druhá varianta se zakládá na obdobné komunikaci jako při použití Wi-Fi, ale za využití přemostění přes LTE¹⁰. Třetí varianta je pouze doplňková k LTE, a to možnost přepnutí řízení pomocí standardní RC letecké vysílačky, která je poté schopna komunikovat s MiruModem¹¹ a předávat řídicí příkazy do základní desky dronu. Schéma navržených připojení je zobrazeno na obr. 17.



Obr. 17 - Navrhnuté komunikační trasy

7.1 Analýza navržených připojení

Jako nejvhodnější z hlediska „neomezeného“ dosahu se jeví připojení pomocí LTE. Vzhledem k tomu, že dron nedisponuje touto technologií, bylo by nutné realizovat vlastní implementaci. Základní deska dronu obsahuje rozhraní USB, I2C a sériovou linku, která by mohla být k tomuto účelu využita. Problémy však vyvstaly během analýzy operačního systému

¹⁰ Více o LTE a pokrytí v ČR v kapitole 4.1

¹¹ Arduino zařízení které přemostňuje řídicí příkazy pomocí seriové linky do dronu

dronu. Ten je postaven na modifikovaném linuxovém jádře, které neposkytuje potřebné jaderné moduly pro obsluhu výše uvedených rozhraní a navíc je celý systém postaven jako uzavřené řešení. Jedinou možností by byla reinstalace operačního systému s jádrem poskytujícím potřebné funkce pro obsluhu periferních zařízení, což bylo zavrženo z důvodu časové náročnosti a nejistého výsledku.

Druhou možností připojení LTE je použít externí hardware a následné přemostění připojení přes Wi-Fi, tedy vytvoření lokální sítě s tunelem na danou statickou IP. Avšak toto řešení bude náročnější jak na celkovou hmotnost dronu tak na spotřebu energie.

Dalším problémem který nastal je nemožnost řídit RC soupravu pouze za použití LTE sítě, jelikož dostupnost sítě není garantována. Proto je rovněž ve schématu zahrnut tzv. „Miru Mód“. Jedná se již o hotový produkt od fanoušků AR Drone, který slouží pro zasílání řídicích příkazů do základní desky dronu přes servisní připojení. Toto řízení je v době testování stále v beta verzi.

7.2 Výběr komunikační frekvence

Jedna z variant komunikace je využití standardu IEEE802.11n. V následujících kapitolách bude vysvětlen důvod pro použití tohoto standardu.

7.2.1 Sdílené frekvence dle ČTÚ

Jako takzvané volné frekvence se označují frekvence pro stanice krátkého dosahu. Při splnění maximálního vyzářeného výkonu na daném kmitočtu je možné vysílat bez nutnosti dalšího povolení. Viz tab. 4.¹²

Kmitočtové pásmo [MHz]	Vyzářený výkon [mW]
40,660 – 40,700	10
138,200 – 138,450	10
433,050 – 434,790	10
863,000 – 870,000	25
2400 – 2483,5	25
5725 – 5875	25
24000 – 24250	100
61000 – 61500	100
122000 – 123000	100
244000 – 246000	100

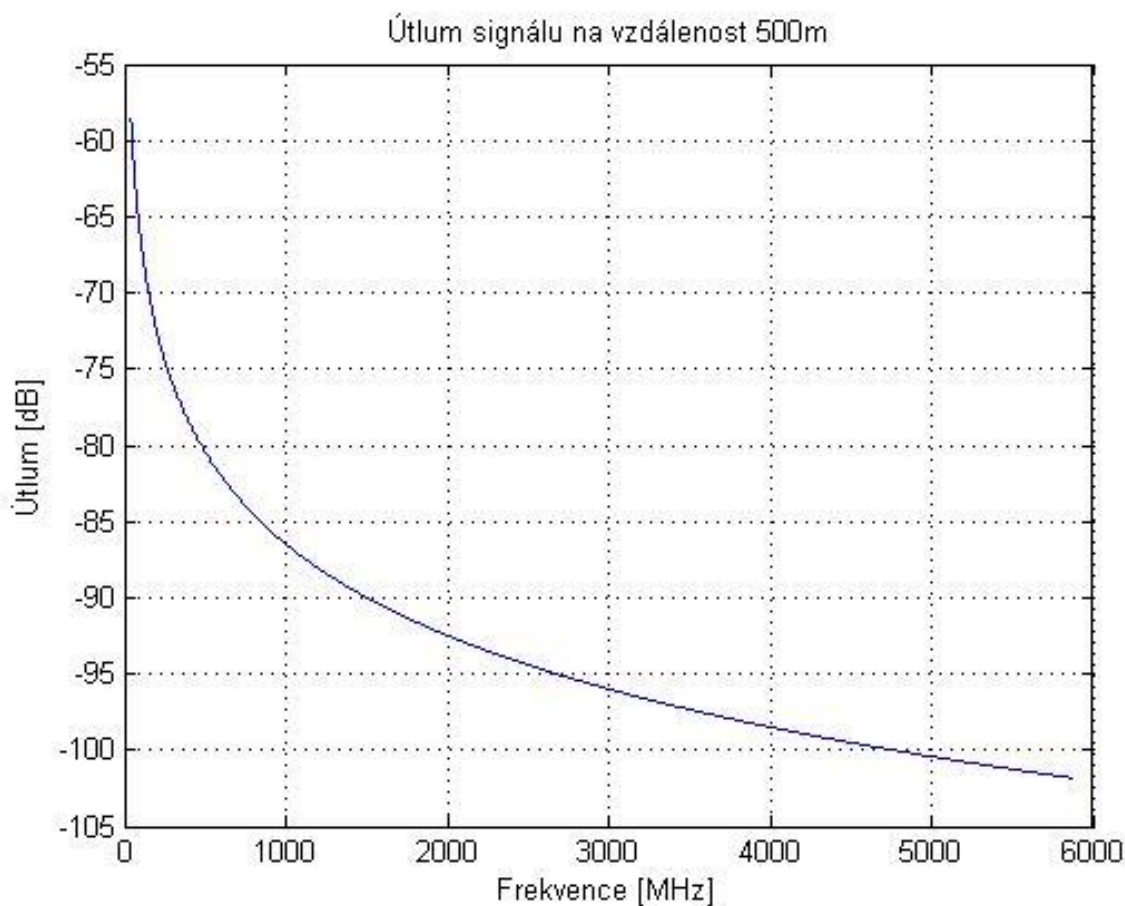
Tab. 4 - Max. vyzářený výkon pro dané kmitočtové pásmo

¹² Kompletní a aktuální znění na www.ctu.cz

7.2.2 Útlum signálu pro 500m

Dle vztahu (3-5), uvedeného v kapitole 3.1, je vytvořen graf zobrazen na obr. 18 znázorňující útlum signálu na vzdálenost 500m v závislosti na frekvenci. Útlumy pro jednotlivá kmitočtová pásma jsou vypsány v tab. 5. Vzorový výpočet útlumu pro 500 m a 2,4 GHz, je

$$\text{útlum [dB]} = 20 \log_{10}(500) + 20 \log_{10}(2,4e9) - 147,5 = 94,03 \text{ dB} \quad (7-1)$$



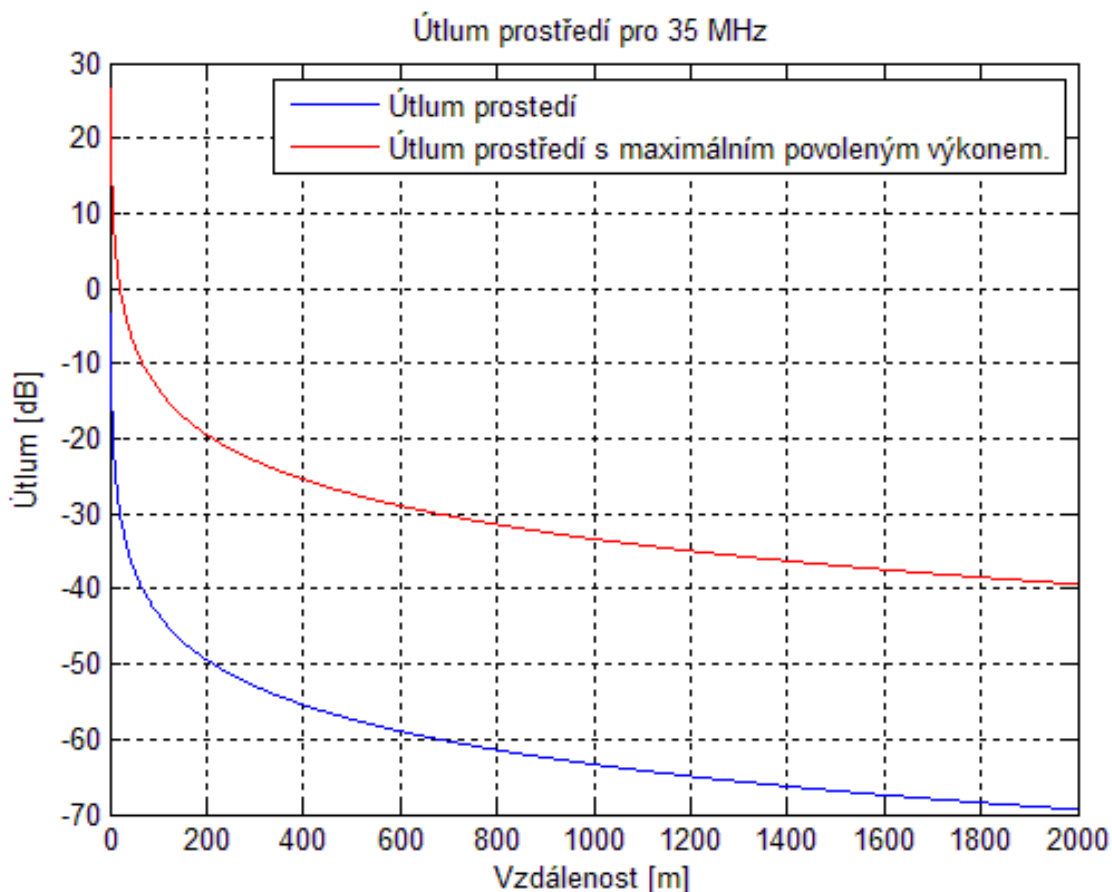
Obr. 18 - Útlum signálu v závislosti na frekvenci pro 500m

Kmitočtové pásmo [MHz]	Kmitočtově závislý úbytek [dB]	Útlum na 500m [dB]
40,660 – 40,700	152,2	58,65
138,200 – 138,450	162,8	69,25
433,050 – 434,790	172,7	79,12
863,000 – 870,000	178,7	85,15
2400 – 2483,5	187,6	94,05
5725 – 5875	195,2	101,65

Tab. 5 - Přehled útlumu v závislosti na kmitočtovém pásmu

7.2.3 Speciální frekvence pro modely letadel

Pásmo (35 – 37,5) MHz je přiděleno pouze pro ovládání letadel a to s povoleným maximální vyzářeným výkonem 1 W e.r.p.. Na základě zmíněného výkonu a vztahů útlumu signálu dostáváme dle vztahu (3-5) graf útlumu zobrazen na obr. 19.



Obr. 19- Útlum prostředí pro frekvenci 35MHz

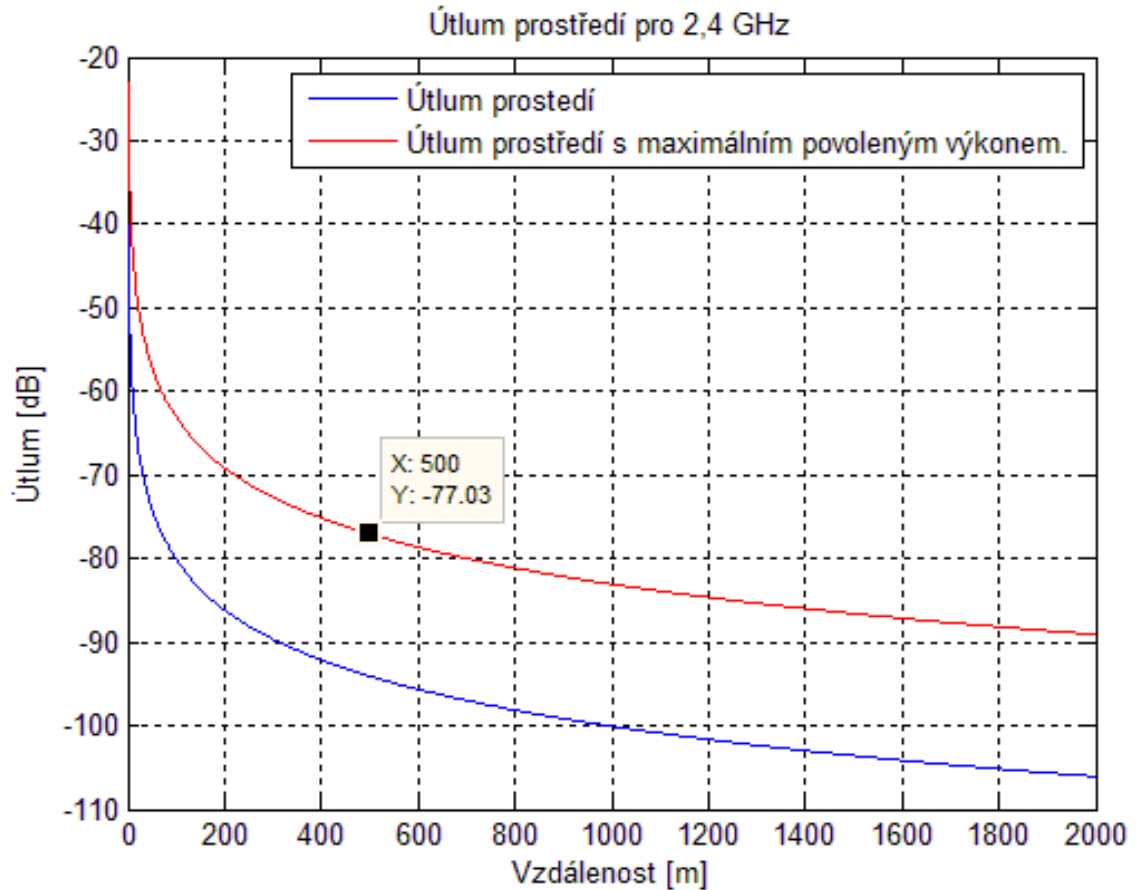
7.2.4 Nově používaná frekvence pro modely letadel

V dnešní době se přechází ze standardní frekvence pro modely na sdílené frekvence 2,4 GHz, kde je dosah udávaný výrobcí až 2 km (citlivost těchto zařízení je standardně až -90 dB, bude blíže popsáno v dalších kapitolách). Dle ČTÚ je však výkon oproti 35 MHz značně omezen a to na 25 mW pro maximální vyzářený výkon, to odpovídá hodnotě 20 dBm. Jelikož signál Wi-Fi je rozložen na šířce pásma 20/40/80MHz(v našem případě 20), je nutné vycházet v tomto případě z přísnější podmínky ČTÚ a to z maximální ho výkonu vyzářeného na 1 MHz, tedy ze spektrální hustoty, kde se dostaneme na +17 dBm. Na základě zmíněného výkonu a vztahů útlumu signálu, dle kapitoly 3.1, konkrétně vztahu (3-5), je získán následující graf útlumu zobrazen na obr. 20. Útlum pro vzdálenost 500 m s maximálním vyzářeným výkonem dle limitu ČTU, činí dle vztahu (7-3), 77 dB.

Výpočet:

$$\text{útlum [dB]} = 20 \log_{10}(500) + 20 \log_{10}(2,4e9) - 147,5 = 94,03 \text{ dB}, \quad (7-2)$$

$$\text{útlum s max výkonem dle limitu ČTÚ [dB]} = 94,03 - 17 \approx 77 \text{ dB}. \quad (7-3)$$



Obr. 20 - Útlum prostředí pro 2,4GHz

7.2.5 Kmitočty pro přenos videa dle ČTÚ

Na základě předchozích tabulek by bylo vhodné zvolit co nejnižší frekvenci pro dosažení co nejmenšího útlumu signálu. Dle normy ČTÚ [Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu.] není povoleno přenášet obrazové informace na kmitočtech nižších než 2,4 GHz. Toto omezení je jasným důvodem proč výrobci přechází na tuto frekvenci. Z toho důvodu se i já budu v této práci nadále zabývat pouze tímto kmitočtem.

7.3 Vyhodnocení návrhu

Jelikož základní deska dronu již disponuje wireless modulem Atheros6103 pracujícím na frekvenci 2.4 GHz a dle kapitoly 7.2.4, kde je ukázáno, že je možné dosáhnout spojení na zmíněné frekvenci na vzdálenosti větší než 500 m, byla tato cesta po konzultaci s vedoucím práce zvolena jako nejschůdnější. Práce se tedy nadále bude ubírat pouze tímto směrem.

8 Realizované připojení

Jako pozemní anténa byla vybrána směrová MIKROTIK RouterBoard SXT Lite 2 (obr. 21) a to z důvodu vysokého maximálního výkonu směrem k dronu a především z důvodu velmi dobré citlivosti. Jelikož se jedná o směrovou anténu, je důležité správné natočení antény.



Klíčové vlastnosti:

Max. přenosová rychlost MCS 7 – 72,2 Mbps

Max. výkon 27 dBm @ MCS0, 22 dBm @ MCS 7

Zisk antény 10 dBi

Vysoká citlivost -95 dBm @ MCS0, -77 dBm @ MCS7

Vyzařovací úhel H i V 60°

Obr. 21 - Pozemní anténa včetně směrovače

Jelikož Wi-Fi komunikace je obousměrná je nutné počítat s výkonem i citlivostmi na obou stranách.

AR Drone 2.0 disponuje čipem Atheros6103 (obr. 22)

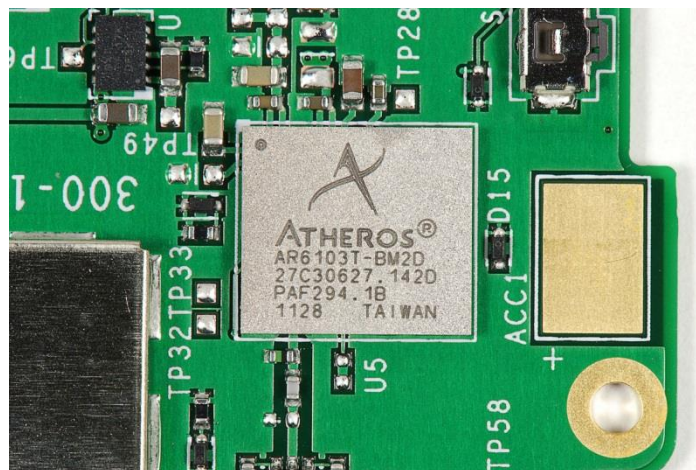
Klíčové vlastnosti:

Max. přenosová rychlost MCS 7 - 65 Mbps

Max. výkon 18,5 dBm @ MCS0, 13 dBm @ MCS 7

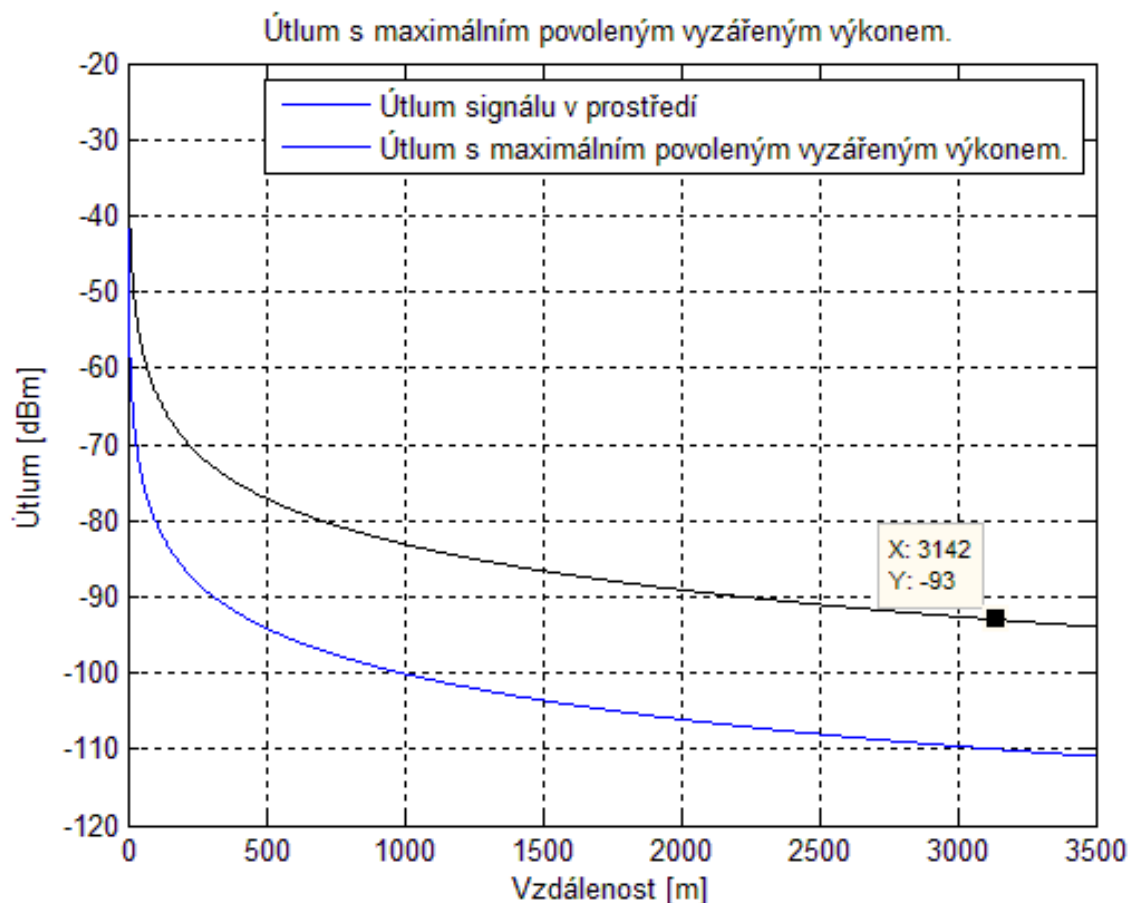
Citlivost -93 dBm @ MCS0, -73 dBm @ MCS 7

PIFA – inverted F antenna



Obr. 22 - Bezdrátový modul Atheros6103

Teoretickou dostupnost ukazuje graf vyobrazen na obr. 23. V grafu je rovněž znázorněna citlivost pro minimální datový přenos MCS 0 dle standardu IEEE 802.11n, popsáném v kapitole 3.4.



Obr. 23 - Útlum signálu pro 2,4GHz s maximálním povoleným výkonem

Dle kapitoly 6.1.4 je pro splnění požadavku na minimální datový přenos nutné splnit typ komunikace vysílané dronem minimálně MCS 2. Na základě dokumentace jednotlivých zařízení je vysílací výkon čipu dronu při MCS 2 16,9 dBm, citlivost pozemní antény je 90,5 dBm. Maximální dosah navrženého spoje pro MCS 2 je, dle rovnice (3-2), 2316 m.

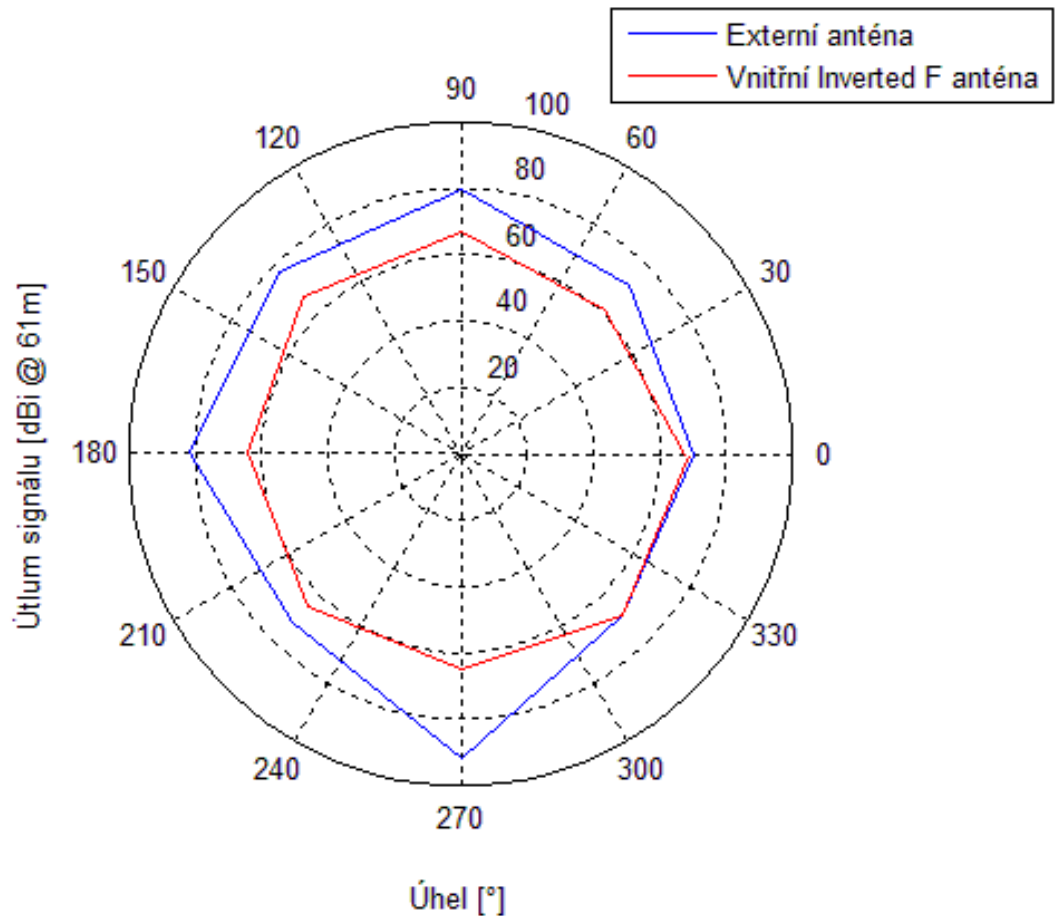
8.1 Přídavná anténa na dron

Jak je popsáno v kapitole 3.5, je z hlediska vyzařovací charakteristiky vhodnější použít kruhovou anténu oproti klasickému prutu (popř. dipólu). Pro tento účel byla vybrána robustnější varianta kruhové antény, která se využívá na kvadroptérách, je zobrazena na obr. 24.



Obr. 24 - Kruhová anténa

Charakteristika antény nebyla od výrobce dostupná, pouze měření uvedené v příloze. Na základě zmíněného měření výkonu bylo zpracováno porovnání, zobrazeno na obr. 25, s vnitřní anténou dronu, ve kterém je vidět, že průměrné navýšení úrovně signálu při zapojení kruhové antény oproti vnitřní invertované F anténě je 10 dBi a to při vzdálenosti 61 m. Jedním z dílčích cílů bylo toto měření opětovně realizovat, jak je popsáno v následující kapitole 8.2.



Obr. 25 - útlum signálu externí vs interní antény @ 61m

8.2 Měření výkonu vnitřní a venkovní antény

Na základě předchozích informací bylo provedeno měření s vnitřní anténou a poté s namontovanou kruhovou anténou a to pro vzdálenost 200 m a 500 m. Pozemní anténa byla pouze pro testovací účely nastavena během všech měření na maximální vysílací výkon. Veškeré odečtené hodnoty jsou měřeny na pozemní anténě, kde byla tato informace dostupná již od rozhraní dodávané výrobcem. Údaje z dronu nebylo možné získat. Z důvodu vysokého vyzařovacího výkonu pozemní antény a přenosu převážného objemu data směrem od dronu, je limitující faktor dosahu pouze příjem signálu na pozemní straně. Na obr. 26 je vyznačena integrovaná anténa v dronu.

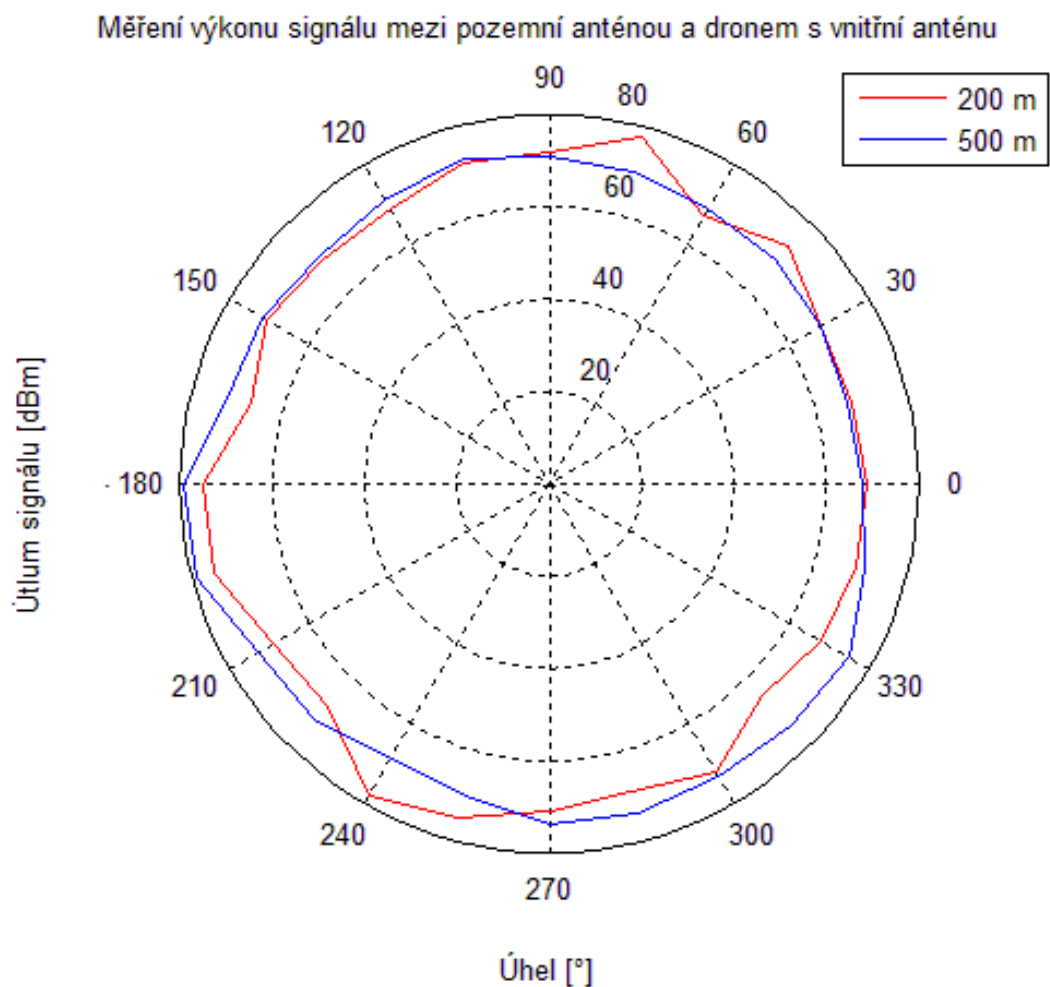


Obr. 26 - Umístění a tvar vnitřní antény

8.2.1 Vnitřní anténa

Během měření s vnitřní anténou nastávalo v určitých místech natočení, konkrétně okolo hodnoty 75° a 240° , ke skokovým rozdílům útlumu signálu a to až o 10 dBm. V grafu zobrazeného na obr. 27 je vždy zanesena maximální hodnota jelikož chceme nasimulovat „nejhorší“ variantu tak, aby byl přenos stále stabilní. Zajímavý postřeh však byl, že na vzdálenost 500 m již takto velké rozdíly nebyly pozorovány a signál osciloval s maximální amplitudou 1 dBm.

Dron i anténa byly během měření umístěny 3m od země, pro měření pozice byla použita GPS s přesností $\pm 3\text{m}$. Skokové rozdíly útlumu signálu jsou zapříčiněny tvarem a umístěním invertované F antény vzhledem k pozemní anténě.



Obr. 27 - Útlum signálu s interní anténou

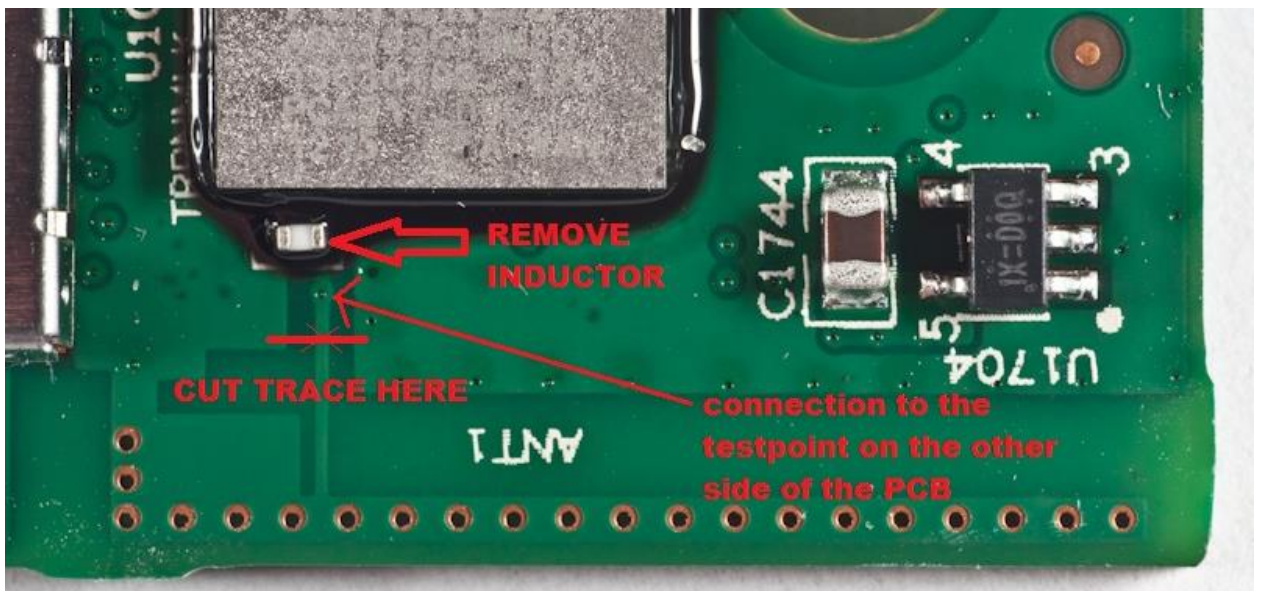
Z výsledků plyne, že útlum signálu je značně směrově závislý na natočení dronu, kde rozptyl dosahuje 11 dBm jak je vidět v tab. 6 Tab. 1, potažmo směrodatná odchylka 3,4 dBm. To by při větší vzdálenosti mělo za následek nestabilní signál při změně kurzu.

Vzdálenost/[dBm]	Min	Max	Průměr	Rozptyl	Odchylka
200 m	65	78	70,6	11,7	3,4
500 m	67	79	72,1	11,2	3,4

Tab. 6 - Útlum signálu s vnitřní anténou

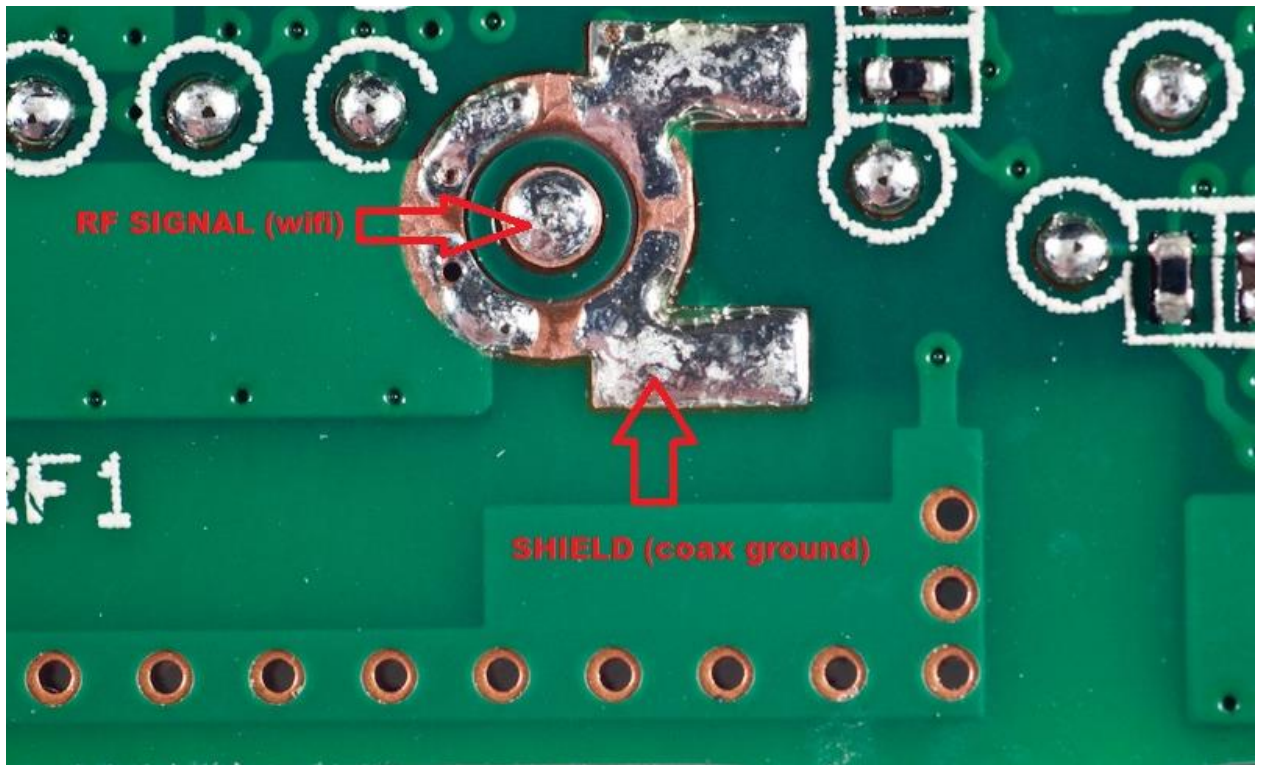
8.2.2 Externí anténa

Pro montáž kruhové antény, bylo nutné provést nevratný zásah do základní desky a to přerušit spoj k integrované F invertované anténě a odstranit kondenzátor jak je zobrazeno na obr. 28.



Obr. 28 – Přední pohled vnitřní antény [7]

Následně bylo provedeno přímé připojení (přiletování) antény. To je napojeno na druhou stranu základní desky, jak je zobrazeno na obr. 29.



Obr. 29 - Zadní pohled vnitřní antény [7]

8.2.3 Hotová realizace s namontovanou venkovní anténou

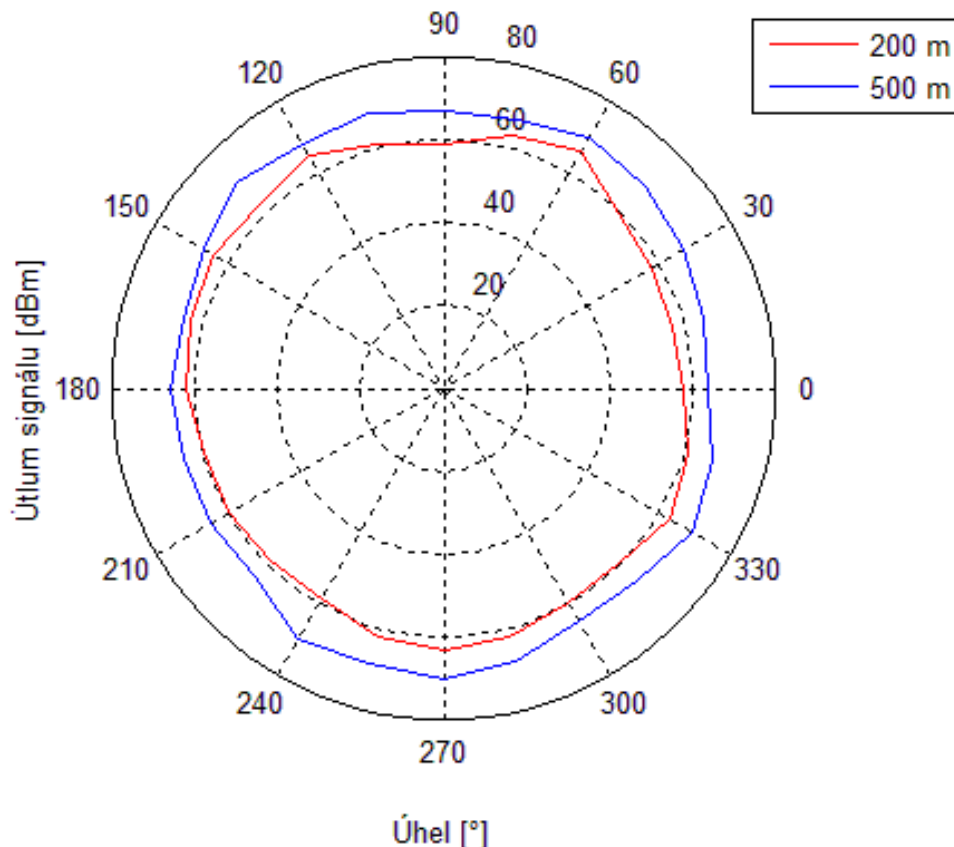
Vyvedený signál mimo dron je přímo zakončen rohovým SMA konektorem pro možné připojení libovolné antény. V tomto případě je připojen prodlužovací stojan s kruhovou anténou. Kompletní provedení je vidět na obr. 30.



Obr. 30 - Dron s externí anténou

Výsledky měření s externí anténou jsou zobrazeny na obr. 31. Na rozdíl od vnitřní antény zde nedocházelo k oscilaci na jednotlivých úhlech natočení a signál byl o poznání stabilnější.

Měření výkonu signálu mezi pozemní anténou a dronem s wheel externí anténou



Obr. 31 - Útlum signálu s externí anténou

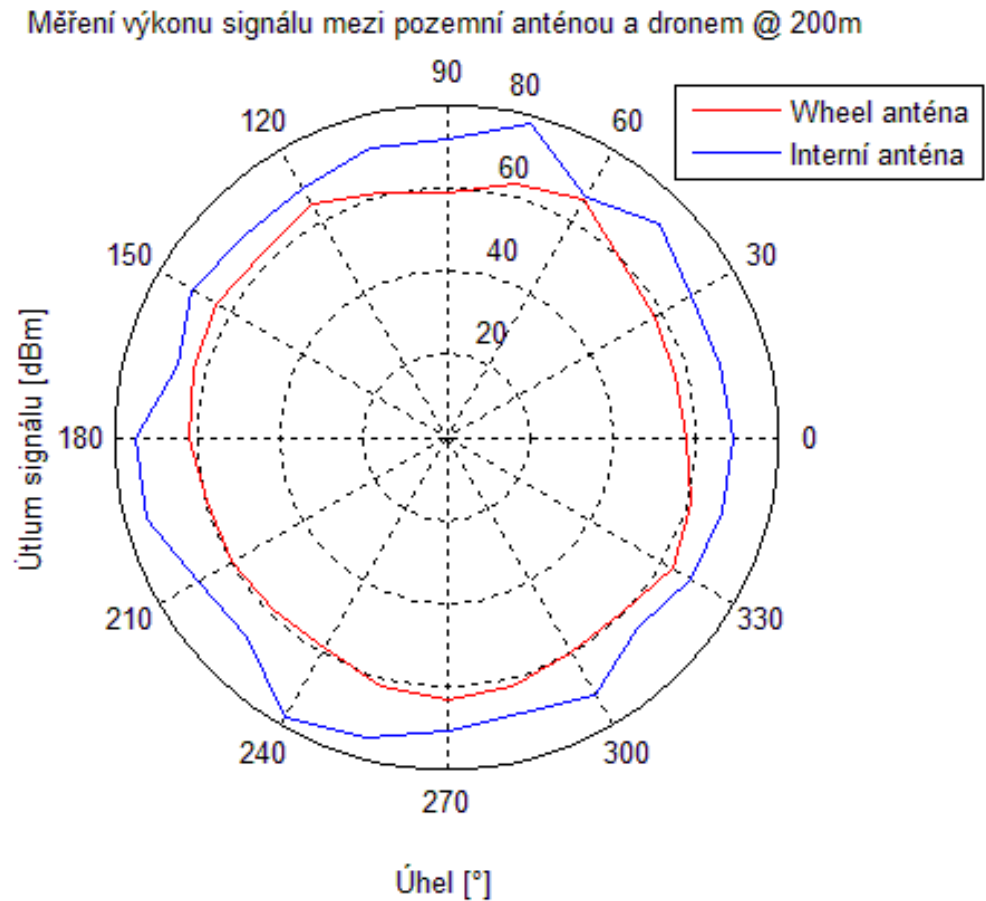
Z měření plyne, že charakteristika antény je téměř kruhová, jak ukazuje odchylka dle tab. 7. Jediné nesrovnalosti jsou v okolí motorů. Jelikož není anténa umístěna na středu, nejsou tyto nesrovnalosti plně symetrické, avšak z grafu zobrazen na obr. 31 patrné. Nemalé zvýšení vyzářeného výkonu je dáno odstraněním stínění těla, vytažením antény mimo dron a vyzářovací plochou antény.

Vzdálenost/[dBm]	Min	Max	Průměr	Rozptyl	Odchylka
200 m	57	66	61	5,5	2,4
500 m	64	70	67	4,3	2

Tab. 7 - Útlum signálu s externí anténou

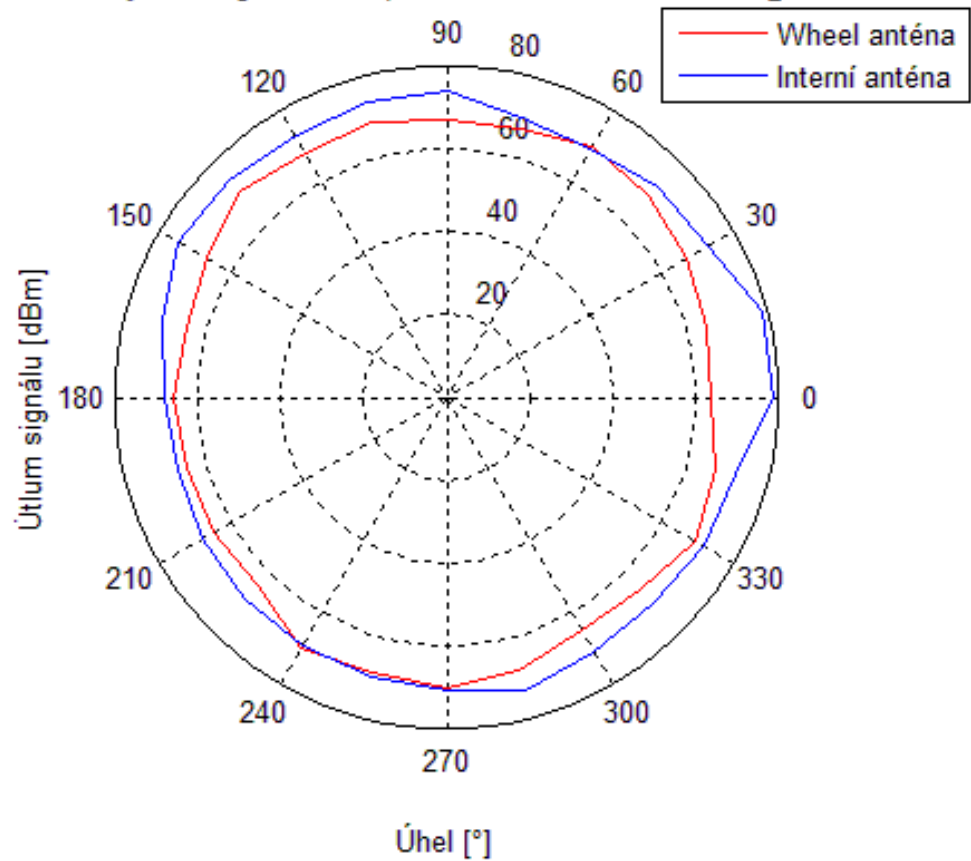
8.2.4 Porovnání výsledků měření mezi vnitřní a venkovní anténou

Na základě naměřených hodnot byly porovnány jednotlivé antény pro jednotlivé vzdálenosti, které jsou zobrazeny na obr. 32 a 33. Na grafech je jasně vidět snížení rozptylu v průměru o 6,5 dBm a zvýšení vyzářeného výkonu mimo dron průměrně o 9 dBm, jak je vidět v tab. 8.



Obr. 32 - Externí vs interní anténa pro vzdálenost 200m

Měření výkonu signálu mezi pozemní anténou a droneem @ 500m



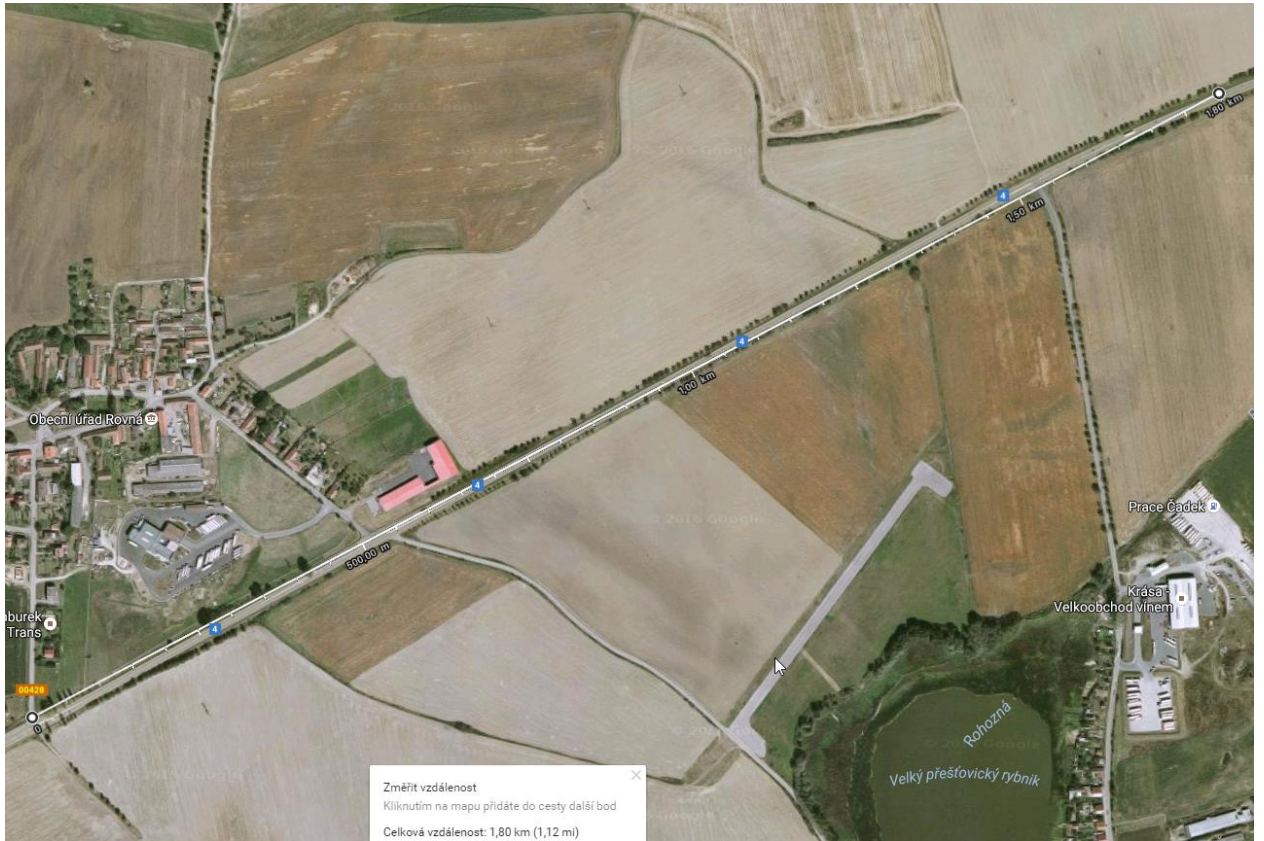
Obr. 33 - Externí vs interní anténa pro vzdálenost 500m

Typ [dBm]	Vzdálenost	Min	Max	Průměr	Rozptyl	Odchylka
Vnitřní	200 m	65	78	70,6	11,7	3,4
Venkovní	200 m	57	66	61	5,5	2,4
Vnitřní	500 m	67	79	72,1	11,2	3,4
Venkovní	500 m	64	70	67	4,3	2

Tab. 8 - Porovnání externí a interní antény

8.2.5 Měření maximálního dosahu spojení mezi pozemní stanicí a dronem

Dalším testem bylo měření maximálního dosahu. To z důvodu potřeby dobré viditelnosti probíhalo na rovné silnici poblíž obce Rovná, kde byla zaručena přímá viditelnost po celou dobu trvání testu. Poloha měření je vidět na obr. 34.

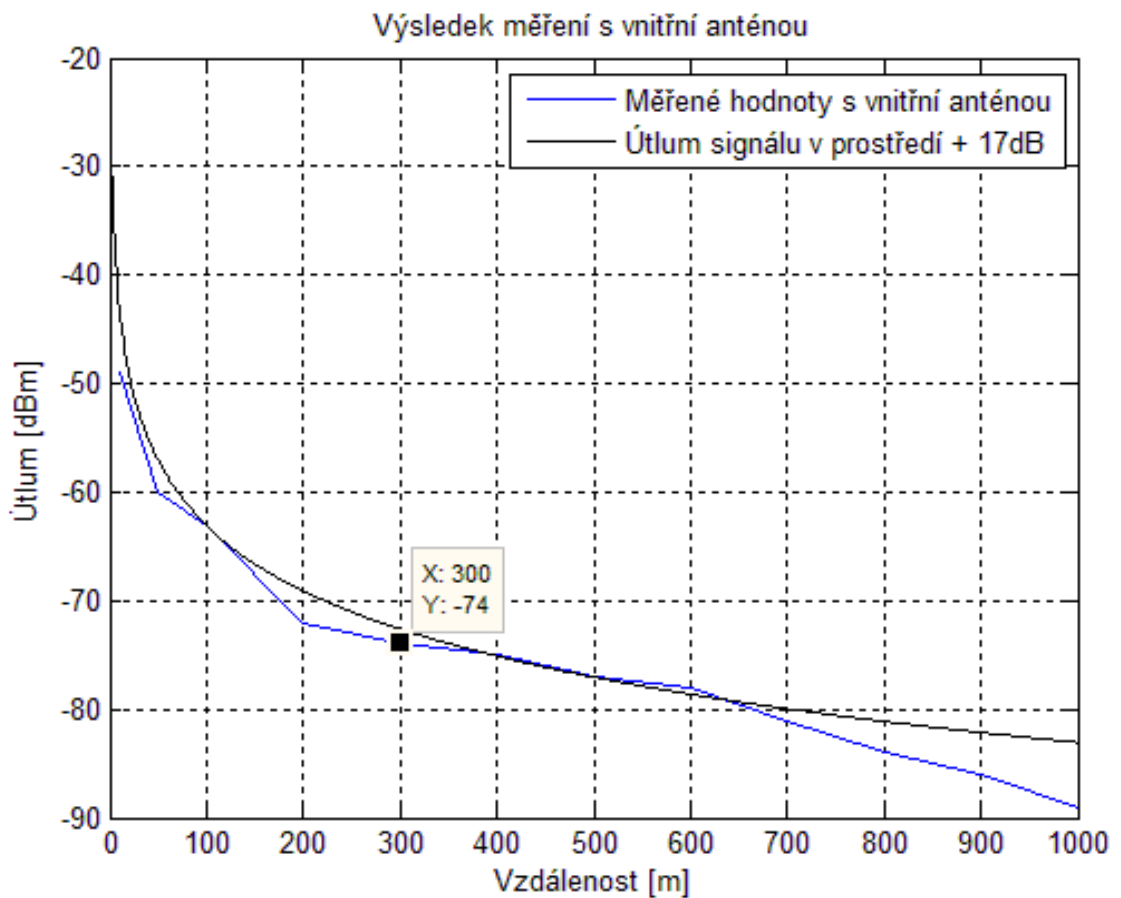


Obr. 34 - Poloha měření [maps.google.com]

V oblasti do 200 m byl mírný kopec, který se na výsledcích mírně projevil z důvodu nepřesného natočení antény směrem k dronu. Ta byla nasměrována konstantně na koncový bod měření, proto se v měření projevila vyzařovací charakteristika pozemní antény.

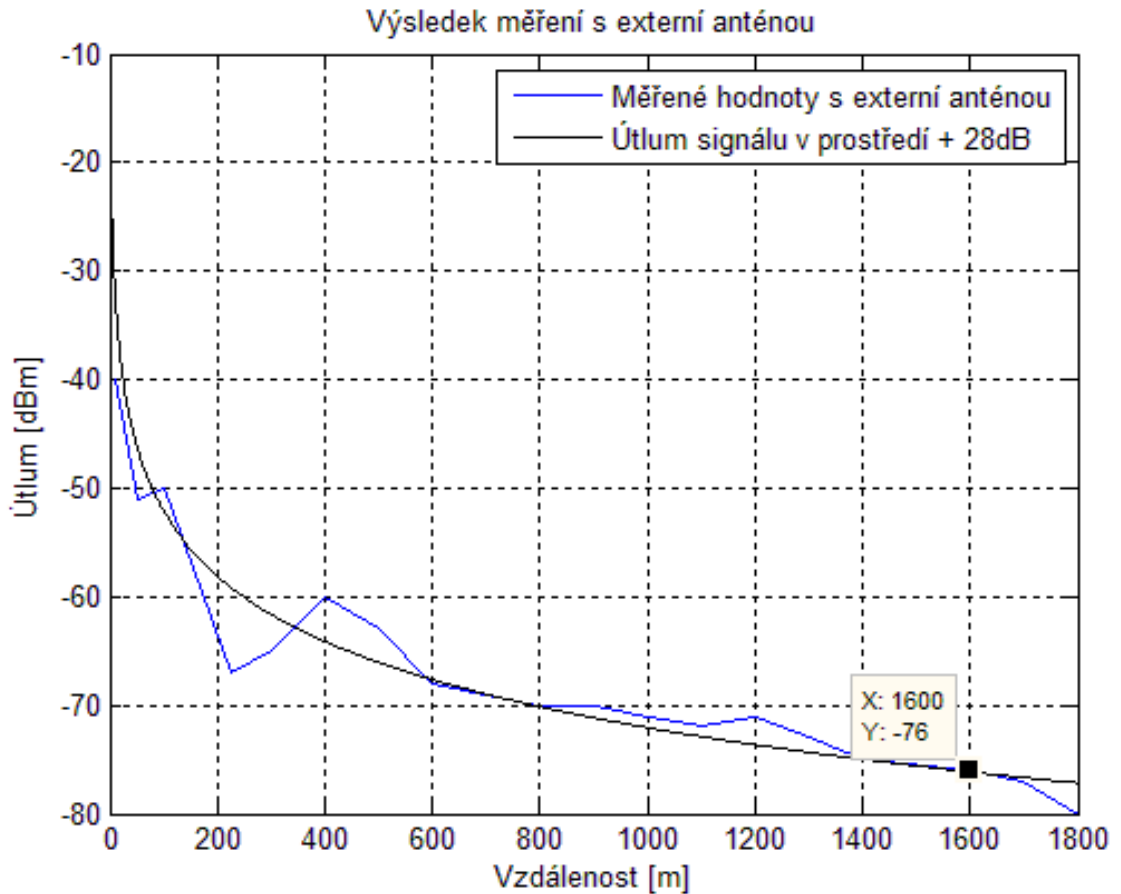
Na obr. 35, jsou zobrazena naměřená data s vnitřní anténou a proložena rovnicí útlumu dle prostředí upravenou o ofset (+17 dB). Ofset zahrnuje zisk pozemní antény (10 dBi) a vyzářovací výkon vnitřní antény dronu. Dle specifikace čipu je ofset funkcí komunikační rychlosti, avšak pro jednoduchost nebude uvažována, jelikož rychlost není závislá pouze na citlivosti, ale také na poruchovosti přenosu. Proto nelze tuto funkci vhodně definovat.

Vyznačený bod představuje vzdálenost, ve které nastalo přerušení přenosu videa, přestože komunikace byla stále aktivní. Přijímací rychlost na pozemní anténě byla při této vzdálenosti 19,5Mbps. Vysílací rychlost pozemní antény se pohybovala mezi 26-65 Mbps.



Obr. 35 - Měření maximálního dosahu s vnitřní anténou

Následující graf zobrazen na obr. 36 znázorňuje měření s integrovanou externí kruhovou anténou, kde je rovněž vidět propad okolo hodnoty 200 m. Vyznačen je opět bod přerušení video kanálu rovněž s hodnotou přijímací rychlosti 19,5 Mbps, avšak po restartování kanálu bylo měření prodlouženo až do 1800 m, kde přijímací rychlost na pozemní stanici byla konstantní 39 Mbps. Delší měření již nebylo možné z důvodu přímé viditelnosti na anténu. Proložení výsledků je provedeno obdobně jako u vnitřní antény. Vysílaný výkon z dronu zde dosahuje 18 dBm (28 dB-zisk antény 10 dBi), což je na hranici maximálního povoleného vyzářeného výkonu dle ČTU.



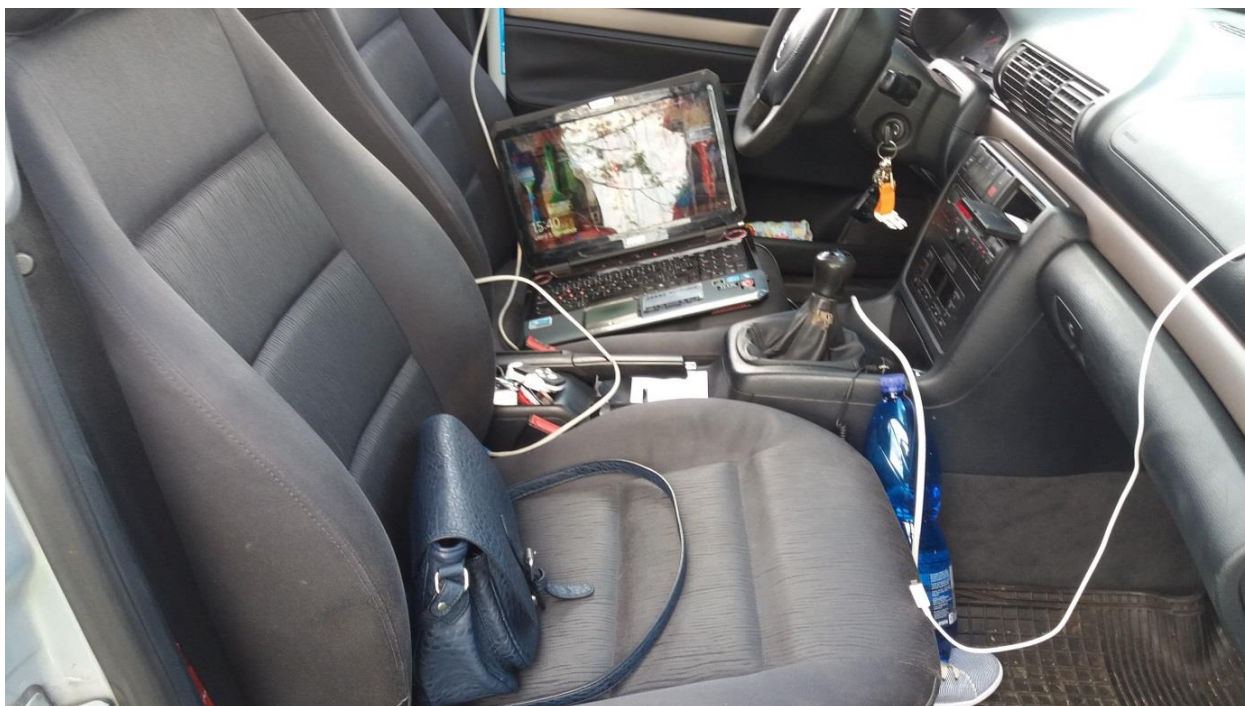
Obr. 36 - Měření maximální dosahu s externí anténou

Na obr. 37 a 38 je zobrazena pozemní stanice z měření. Pozemní stanice je tvořena směrovačem s anténou umístěnou čtyři metry od země, která je napájena pomocí POE¹³ z autobaterie, Jelikož směrovač disponuje ethernetovým rozhraním, byl napřímo připojena k notebooku pomocí UTP kabelu. Směrovač přesměroval komunikační kanály z dronu, přímo do notebooku zpoždění tímto přemostěním bylo měřeno v řádu milisekund a nebude na něj brán zřetel.

¹³ Power Over Ethernet je napájení přes ethernetové rozhraní



Obr. 37 - Umístění antény



Obr. 38 - Zaznamenávací stanice

Na notebooku byl spuštěn program CVUTDrone, popsán v kapitole 9.2, připojený ke dronu, na kterém byla vizuálně kontrolována stabilita přenosu videa. Druhou částí testu bylo zaznamenávání rychlostí a úrovně přijímaného signálu za pomoci webového rozhraní implementovaného v pozemní anténě.

I přes „polní podmínky“ dopadlo měření dle očekávání a potvrzuje teoretickou část. Jediné, co se neshoduje, je robustnost spojení, jelikož dle standardu IEEE802.11n a dokumentace jednotlivých wireless čipů by pro datový tok 4Mbps mělo být postačující MCS2 s rychlostí 19,5Mbps. Jak ale ukazují testy, právě při dosažení této rychlosti bylo spojení přerušeno.

Nutná podmínka stabilního připojení pro přenos je tedy MCS3, neboli teoretická propustnost kanálu 26Mbps.

9 Komunikační software

Pro pozemní stanici existuje několik variant SW. Oficiální verze, která je určena pro Apple a Android s názvem *AR.FreeFlight 2.4*, pro kterou existují různé nadstavby jako možnost připojení GPS, AutoFlight Mode či Director Mode však není modifikovatelná a existuje pouze jako finální produkt. Aby mohl být dron dále vyvíjen a mohly být přidávány další senzory, je nutné mít komunikaci otevřenou a dále modifikovatelnou. Proto bylo nutné vyvinout software, který bude obstarávat veškeré potřebné služby. Pro tento případ vydal výrobce AR Drone 2.0 vývojářskou příručku „Developer Guide SDK [9]“, poslední ve verzi 2.0.1 ve které je obsažen popis vlastností a možností dronu. Rovněž jsou zde k nalezení tvary příkazů a to jak nastavovacích, tak řídicích. Samozřejmě jsou zde k nalezení i čísla komunikačních portů a základní informace o architektuře a systému dronu.

Jelikož je AR Drone hojně rozšířen, vzniklá komunita již vytvořila několik programů, které se umí připojit k dronu, zobrazovat video, či ovládat dron pomocí klávesnice nebo joystiku.

9.1 Souhrn aktuálně dostupných aplikací

9.1.1 EASYDrone

Jedná se o Java Api rozhraní s nejjednoduššími příkazy pro řízení, zaměřený na rozpoznání tagu a tváře spolu s následováním. Projekt byl určen pro AR Drone 1.0, poslední aktualizace proběhla v roce 2011.

9.1.2 JavaDrone

Jedná se o Java Api pro řízení AR Drone. V projektu nejsou použity Parrot SDK, ale pouze čistý Java kód, který nahrazuje použití knihovny. Obsahuje základní nastavení a možnost řízení pomocí Gamepadu. Projekt byl určen pro AR Drone 1.0, poslední aktualizace proběhla v roce 2013.

9.1.3 Ar Drone v. 2 control software for Windows

Tento program je napsán čistě pro Windows 32bit, umí zpracovávat i nahrávat video a ovládat dron pomocí klávesnice nebo joystiku. Poslední aktualizace 2013.

9.1.4 YADrone

Jedná se o program sloužící výhradně ke komunikaci s AR Drone 2.0. Jeho výhodou je, že je napsán čistě v Javě a nepotřebuje jiné knihovny. V programu jsou připravené možné příkazy dle SDK, je zde hotova dekomprese videa a vytvořeno jednoduché grafické rozhraní. Vychází z programů ARDroneForP5 a JavaDrone.

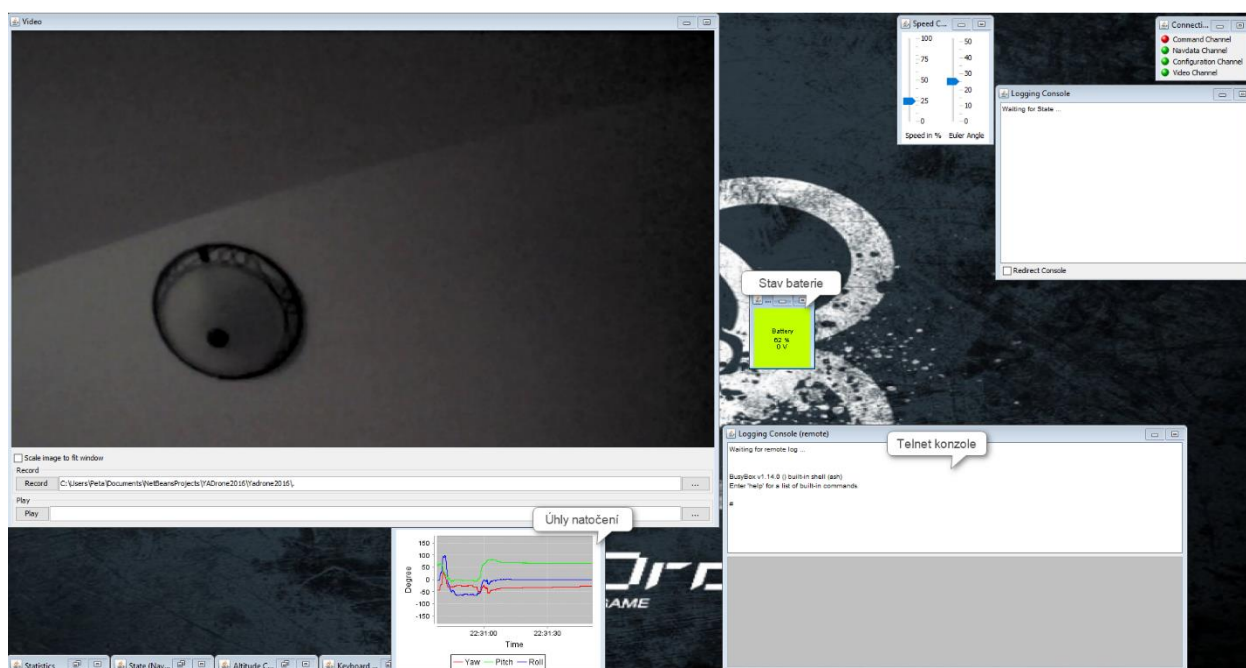
Bohužel program je stále ve fázi beta a obsahuje velké množství chyb a to jak v chybném nastavování, tak v posloupnosti příkazů, kvůli kterému pak dochází k zastavování komunikace či

nemožnosti změny nastavení. Časté je také padání komunikačních i vykreslovacích vláken. Poslední aktualizace 10/2014.

Jelikož tato aplikace má nejvíce hotových funkčních bloků a je open-source, stala se základem pro vývoj nové aplikace CVUTDrone, která byla vytvořena v rámci této práce.

9.2 CVUTDrone

Na obr. 39 je zobrazeno schéma aplikace CVUTDrone, která obstarává jak komunikaci s dronem tak online vizualizuje přijímaná data. Vizualizovaná okna lze libovolně přemísťovat. Je zde video ve formátu 720p, panel pro vykreslování úhlů natočení, aktuální stav baterie, telnet konzole, panel pro nastavení rychlosti či logovací konzole. V aplikaci jsou v základním režimu vytvořeny čtyři komunikační vlákna rozdělena dle jejich použití (nastavovací – pro nastavení dronu, příkazové – pro pohyb, navigační data – pro příjem navigačních dat, video – pro příjem video proudu) připojená pomocí portů 5551-5554. Kromě přenosu videa, které využívá protokol TCP, využívají všechna vlákna protokolu UDP. Díky rozšíření základního režimu o připojení telnet konzole je možné psát linuxové příkazy pro online nastavení systému dronu. Tímto způsobem je automaticky vytvořen další komunikační kanál na portu 5561. V dronu se vytvoří server, který čeká na připojení klienta, ten je po úspěšném připojení schopen přijímat libovolná data. Další krok je zpracovat přijímaná data. Ty se aktuálně ukládají do souboru. Je možné je přesměrovat na sériovou linku pro další zařízení, popřípadě zasílat data opačným směrem.



Obr. 39 – Vizualizace aplikace

Program obsahuje mnoho dalších funkcí, které přímo nebyly obsahem práce, ale byly posouzeny jako vhodné implementovat, či otestovat. Například pohyb dronu po dané (lineární) trajektorii na základě inerciální soustavy. Tyto funkce by bylo možné rozšířit i o složitější příkazy jako elipsy, prostorové elipsy, či libovolné trajektorie.

9.3 Automatické připojení

Jelikož připojení dronu k existující síti (Access pointu) není jednoduché a vyžaduje znalosti linuxových příkazů a telnetu, byl vytvořen program, který je schopen nastavit Wi-Fi na dronu dle požadavků sítě ke které se připojuje, nikoliv pouze vytvořit přístupový bod jak je tomu v defaultním provedení. Dron je tedy schopný se připojit k libovolné síti.

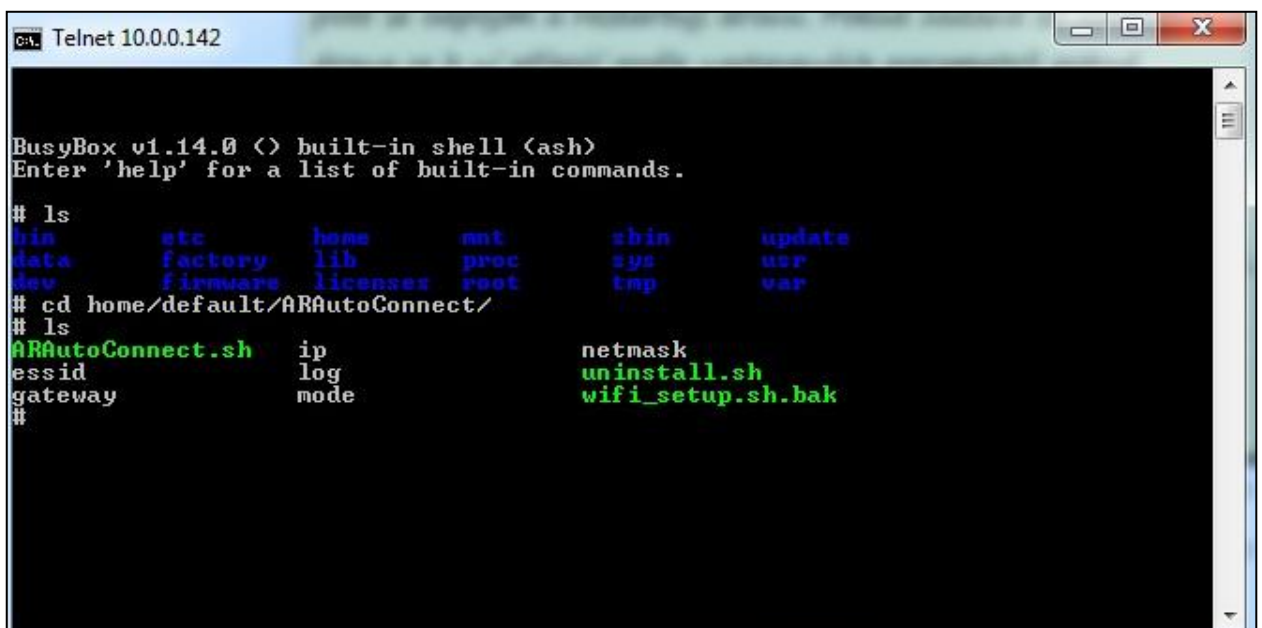
Software Autoconnect vychází z programu *ARAutoconnect*, který je distribuován pod licencí GPL v3, který byl napsán pro verzi AR Drone 1.0. V práci je použita pouze verze dronu AR Drone 2.0 power edition. Bylo nutné provést úpravy jak v části Java kódu tak v části příkazového skriptu. Dále byly přidány položky pro bránu, masku a módy sítě. [9]

Program funguje následujícím způsobem:

1. Do dronu se nahraje několik příkazových skriptů do složky „*video*“ a to z důvodů práv zapisování.
2. Poté se spustí skript *instal.sh*, který je již nakopírovaný v dronu.
3. Přehraje potřebné soubory do složky */home/default/ARAutoconnect*.
4. Vytvoří se záloha souboru *wifi_setup.sh* pojmenovanou *wifi_setup.sh.bak*.
5. Zapiše se do */bin/wifi_setup.sh* příkaz ke spuštění skriptu *ARAutoConnect.sh*.

Po správném nainstalování je struktura složky */home/default/ARAutoconnect* zobrazena na obr. 40.

V případě zavolání odinstalačního skriptu *uninstall*, je zajištěno smazání všech přidávaných souborů a navrácení předchozího nastavení ze zálohy *wifi_setup.sh.bak*.



```
CA: Telnet 10.0.0.142
BusyBox v1.14.0 (<) built-in shell (ash)
Enter 'help' for a list of built-in commands.
# ls
bin          etc          home         mnt          sbin         update
data        factory     lib          proc         sys          usr
dev         firmware   licenses    root         tmp          var
# cd home/default/ARAutoConnect/
# ls
ARAutoConnect.sh  ip          netmask
essid             log         uninstall.sh
gateway          mode       wifi_setup.sh.bak
#
```

Obr. 40 - Nainstalované soubory

Pokud nastavení sítě existuje, dron se k ní pokusí připojit podle nastavených parametrů. V opačném případě program vrátí dron do původního nastavení a vytvoří defaultní síť.

Na obr. 41 je zobrazeno nastavení programu, kde po připojení detekuje, zda je program v dronu již nainstalován. V tom případě je možné upravit nastavené parametry sítě a rovněž možno odinstalovat program. V opačném případě je povolena instalace. Po úspěšném nastavení je nutné dron restartovat.



Connect IP	192.168.1.1
Disconnect	Connection status : UP
Set ESSID	AR
Set Ip	10.0.0.140
Set NetMask	255.255.255.0
Set Gateway	10.0.0.138
Set Mode	Ad-Hoc
Uninstall	Ad-Hoc Infrastructure Master

Obr. 41 - Nastavení AR AutoConnect

10 Závěr

Hlavní cíl práce, tedy návrh a vytvoření komunikačního kanálu pro přenos videa při 720p 30 fps, byl splněn. Dále byly vytvořeny komunikační kanály pro přenos navigačních dat z dronu a příkazy do dronu. Jako další komunikační kanál je možné zasílat obousměrně libovolná data.

Jak je popsáno v kapitole 7, byly navrženy 3 různé komunikační kanály založené na rozdílných standardech přenosu a to LTE, 802.11n či tzv. „MIRUMODU“. Jedna varianta připojení, postavena na standardu 802.11n, byla realizována a otestována, jak je možné se dočíst v kapitole 8. Podařilo se upravit vysílací charakteristiku antény dronu tak, že úroveň přijímaného signálu na pozemní stanici „není závislá“ na kurzu dronu vzhledem k pozemní stanici, což dokazují obr. 32 a 33.

Byl vyvinut software pro pozemní stanici, popsán v kapitole 9.2, který implementuje funkce pro komunikaci s řídicí jednotkou dronu. Program je napsán v jazyce Java a je možné jej libovolně rozšiřovat, jelikož je zde připraven základ pro další komunikaci založenou na protokolech TCP/UDP. Díky implementované telnet konzoli je rovněž možné online zasahovat do systému řídicí jednotky dronu a využít tak veškeré hardwarové možnosti které dron nabízí. V programu jsou popsány veškeré možné příkazy dle „AR Drone developer guide verze SDK 2.0“ [9]. e Dron je schopen zpracovat letové příkazy, změnit mód, upravit maximální rychlosti či změnit kvalitu přenášeného videa. Řízení dronu je prozatím řešeno pomocí klávesnice, ale jsou zde připraveny i příkazy pro řízený let na základě inerciální soustavy např. let po přímce dle dané vzdálenosti. V případě doplnění dronu GPS senzorem by bylo možné provozovat i automatické lety.

Pro rychlejší a automatické navázání komunikace byl vytvořen program AR Autoconnect, popsán v kapitole 9.3, který upraví systémové nastavení síťové komunikace hned během zavádění operačního systému dronu a umožní tak připojení dronu k již existující síti. Tato možnost je důležitá v případě využití již stávající pozemní sítě kompatibilní se standardem 802.11n. Bude-li existovat Wi-Fi síť dána více přístupovými body se stejným nastavením sítě, bude se dron automaticky přepojovat mezi těmito body na základě kvality signálu. Tímto způsobem se lze pohybovat s dronem po celém území pokrytém touto sítí.

11 Přílohy na CD

- 1) SDK ARDrone Developer guide SDK 2.0
- 2) AR Drone Antenna Comparison Tests
- 3) Program AR Autoconnect
- 4) Program CVUTDrone

13 Citace

- [1] SANTORO, Corrado. *Autonomous and Robotic System Laboratory* [online]. 2014, 7-15 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/androflight/arautoconnect>
- [2] RYŠÁNEK, František. *Antény pro WiFi* [online]. In: . 2016, 1. část [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.fccps.cz/magazin/anteny-pro-wifi>
- [3] *Skew Planar Wheel* [online]. Circular Wireless, 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.circular-wireless.com/en/conceptos-sobre-antenas/skew-planar-wheel/>
- [4] KOVÁŘ, Pavel. *Radiové systémy: Šíření radiových vln*. 2013.
- [5] ARYA, LOKESH KUMAR. *Wireless communication: FRESNEL ZONE* [online]. In: . kap. 2.4 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://msk1986.files.wordpress.com/2013/09/wlc-unit2.pdf>
- [6] FLORWICK, Jim, Jim WHITEAKER, Alan Cuellar AMROD a Jake WOODHAMS. *Wireless LAN Design Guide for High Density Client Environments in Higher Education: Design Guide*[online]. In: . 2013, s. 9 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1250-series/design_guide_c07-693245.pdf
- [7] 3NSLAV3. *Drone-forum:External Antenna* [online]. [cit. 12.12.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.drone-forum.com/2012>.
- [8] EIFFL. *AR AutoConnect* [online]. 2011 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/androflight/arautoconnect>
- [9] *AR.Drone Developer Guide: SDK 2.0* [online]. In: PISKORSKI, Stephane, Nicolas BRULEZ, Pierre ELINE a Frederic D'HAeyer. 2012 [cit. 2016-12-12].
- [10] AUWERA, Geert Van der, T. David PRASANTH a Martin N REISSLEI. *Traffic Characteristics of H.264/AVC Variable Bit Rate Video* [online]. , 16-17 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.88.2411&rep=rep1&type=pdf>
- [11] Veřejné širokopásmové mobilní sítě. *Český telekomunikační úřad* [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://lte.ctu.cz/pokryti/>
- [12] WANNSTROM, Jeanette. *LTE-Advanced. 3GPP* [online]. 2013 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>
- [13] *Fresnelovy zony* [online]. In: . VŠB - TU Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky, s. 1 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/sireni_vln/teze/otazka_09.pdf
- [14] LITEPOINT,. *Practical Manufacturing Testing of 802.11 OFDM Wireless Devices* [online]. , 6 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: http://www.litepoint.com/wp-content/uploads/2014/02/Testing-802.11-OFDM-Wireless-Devices_WhitePaper-1.pdf

- [15] TICHÁ, Petra a Michal DLOUHÝ. *Datové formáty videa, jejich specifikace a možnosti využití* [online]. 2014, , Příklady jednotlivých datových toků [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <https://umt.wikispaces.com/Datov%C3%A9+form%C3%A1ty+video,+jejich+specifikace+a+mo%C5%BEnosti+vyu%C5%BEit%C3%AD>