



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## VYUŽITÍ ANEMOMETRU PRO ESTIMACI RYCHLOSTI BEZPILOTNÍHO LETADLA

UTILIZATION OF AN ANEMOMETER FOR ESTIMATING THE SPEED OF AN UNMANNED AIRCRAFT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Martin Blaha**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Petr Gábrlík, Ph.D.**

**BRNO 2025**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Martin Blaha

**ID:** 247340

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2024/25

**NÁZEV TÉMATU:**

## Využití anemometru pro estimaci rychlosti bezpilotního letadla

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je proměřit přesnost a posoudit vhodnost dat z ultrazvukového anemometru s cílem měření rychlosti bezpilotního prostředku.

1. Seznamte se s principem fungování ultrazvukového anemometru a problematikou měření rychlosti na bezpilotních prostředcích.
2. Předložený anemometr ve spolupráci s vedoucím integrujte na bezpilotní prostředek a vytvořte software pro záznam dat.
3. Navrhněte metodiku pro sběr letových dat s cílem komplexního posouzení kvality dat.
4. Vytvořte datasey z reálného létání zahrnující mimo jiné i GNSS data sloužící jako reference.
5. Proveďte podrobné vyhodnocení přesnosti měření rychlosti letu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

QUAN, Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Fourth edition. Singapore: Springer Singapore, 2017. ISBN 978-981-10-3382-7.

**Termín zadání:** 10.2.2025

**Termín odevzdání:** 28.5.2025

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Gábrlík, Ph.D.

**Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je posoudit vhodnost dat z ultrazvukového anemometru pro měření rychlosti bezpilotních prostředků. V úvodní části jsou shrnuty aktuálně používané metody měření rychlosti a popsán princip fungování ultrazvukového anemometru. Následuje část věnovaná implementaci anemometru na kvadrokoptéru. V rámci práce byly testovány dva modely: Calypso MINI a Calypso ULP. Bylo zjištěno, že anemometr MINI nemá dostatečnou vzorkovací frekvenci, proto se další analýza zaměřuje především na model ULP. V další části jsou prezentována a vyhodnocena naměřená data. Na základě těchto dat se ukazuje, že anemometr může sloužit jako prostředek k odhadu rychlosti dronu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Ultrazvukový anemometr, GNSS, Chyba měření, Kvadrokoptéra, Senzor Calypso

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is to assess the suitability of data from an ultrasonic anemometer for measuring the speed of unmanned aerial vehicles. The introductory part summarizes the currently used methods for speed measurement and describes the operating principle of the ultrasonic anemometer. This is followed by a section dedicated to the implementation of the anemometer on a quadcopter. Within the scope of this work, two models were tested: Calypso MINI and Calypso ULP. It was found that the MINI anemometer does not have a sufficient sampling frequency; therefore, further analysis focuses mainly on the ULP model. The subsequent section presents and evaluates the measured data. Based on these data, it appears that the anemometer can serve as a means to estimate the drone's speed.

## **KEYWORDS**

Ultrasonic anemometer, GNSS, Measurement error, Quadcopter, Calypso sensor

BLAHA, Martin. *Využití anemometru pro estimaci rychlosti bezpilotního letadla*. Bachelářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2025. Vedoucí práce: Ing. Petr Gábrlík, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Martin Blaha  
**VUT ID autora:** 247340  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2024/25  
**Téma závěrečné práce:** Využití anemometru pro estimaci rychlosti bezpilotního letadla

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

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

Brno 28.5.2025

.....

podpis autora\*

---

\* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

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

Brno 28.5.2025

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Teoretický přehled</b>	<b>12</b>
1.1 Anemometr	12
1.2 Ultrazvukový anemometr	12
1.2.1 Měření doby letu ultrazvukového signálu [1]	12
1.3 Anemometry založené na principu akustické rezonance	14
1.4 Měření rychlosti na bezpilotních prostředcích	14
1.4.1 Global navigation satellite system - GNSS	14
1.4.2 Inertial measurement unit - IMU	15
1.4.3 Optické senzory	16
1.4.4 Pitotova trubice	16
1.4.5 Lidar	17
1.4.6 Fúze senzorů	17
1.5 Souřadnicové systémy dronu	18
1.5.1 Aircraft-Body coordinate frame	18
1.5.2 Earth-Fixed coordinate frame	19
1.5.3 Převod mezi local frame a body frame pomocí kvaternionů	19
1.5.4 Polární a kartézské souřadnice	20
1.6 Chyba anemometru umístěném na dronu	20
1.6.1 Chyba náklonu	20
1.6.2 Chyba indukovaného proudění vzduchu	21
1.6.3 Doporučení z odborné literatury	21
<b>2 Integrace anemometru na dron</b>	<b>22</b>
2.1 Využitý dron	22
2.1.1 Integrace Ultrasonic Portable Mini wind meter	22
2.1.2 Integrace Ultra-Low-Power Ultrasonic wind meter	23
<b>3 Naměřená data</b>	<b>26</b>
3.1 Naměřená data - Ultrasonic Portable Mini wind meter	26
3.1.1 Letová trajektorie	26
3.1.2 Vyhodnocení dat	27
3.2 Naměřená data - Ultra-Low-Power Ultrasonic wind meter	31
3.2.1 Letová trajektorie číslo 1	31
3.2.2 Letová trajektorie číslo 2	34
3.2.3 Letová trajektorie číslo 3	38

3.2.4	Letová trajektorie číslo 4 . . . . .	41
3.3	Směr budoucího výzkumu . . . . .	42
3.3.1	Možnosti budoucího zpracování dat pro estimaci rychlosti . . .	42
3.3.2	Nevyřešené problémy . . . . .	43
	<b>Závěr</b>	<b>44</b>
	<b>Literatura</b>	<b>45</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Změřená data</b>	<b>49</b>
A.1	CALYPSO MINI . . . . .	49
A.1.1	Trajektorie 1 - stejná velikost čtverců . . . . .	49
A.2	CALYPSO ULP . . . . .	49
A.2.1	Trajektorie 1 - stejná velikost čtverců . . . . .	49
A.2.2	Trajektorie 2A - různá velikost čtverců . . . . .	50
A.2.3	Trajektorie 2B - různá velikost čtverců . . . . .	51
A.2.4	Trajektorie 3A - úsečky osa Y . . . . .	53
A.2.5	Trajektorie 3B - úsečky osa X . . . . .	54
<b>B</b>	<b>Detail uchycení anemometru</b>	<b>56</b>
B.1	Calypso MINI . . . . .	56
B.2	Calypso ULP . . . . .	57
<b>C</b>	<b>Obsah elektronické přílohy</b>	<b>59</b>

# Seznam obrázků

1.1	Uspořádání os snímače ultrazvukového anemometru. Převzato z [1]	14
2.1	Dron s calypso MINI	23
2.2	Dron s calypso ULP	23
2.3	Komunikační model systému	24
3.1	Absolutní rychlost v čase	28
3.2	Chyba měření v závislosti na rychlosti	29
3.3	Chyba měření v závislosti na náklonu dronu	30
3.4	Závislost větru změřeného anemometrem na úhlu natočení dronu	30
3.5	Závislost rychlosti na směru větru změřený anemometrem	30
3.6	Rychlost v ose X v čase	32
3.7	Chyba měření v závislosti na rychlosti	33
3.8	Chyba měření v závislosti na náklonu dronu	33
3.9	Závislost větru změřeného anemometrem na úhlu natočení dronu	34
3.10	Závislost rychlosti na směru větru změřený anemometrem	34
3.11	Rychlost v ose X v čase	36
3.12	Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu	37
3.13	Chyba měření v závislosti na náklonu dronu	37
3.14	Rychlost v ose X v čase	39
3.15	Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu	40
3.16	Chyba měření v závislosti na náklonu dronu	40
3.17	Závislost větru změřeného anemometrem na úhlu natočení dronu	41
3.18	Závislost rychlosti na směru větru změřený anemometrem	41
3.19	Závislost rychlosti na směru větru změřeném anemometrem v statické pozici	42
A.1	Rychlost v ose X v čase	49
A.2	Absolutní rychlost v čase	49
A.3	Rychlost v ose X v čase	50
A.4	Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu	50
A.5	Chyba měření v závislosti na náklonu dronu	51
A.6	Rychlost v ose X v čase	51
A.7	Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu	52
A.8	Chyba měření v závislosti na náklonu dronu	52
A.9	Rychlost v ose Y v čase	53
A.10	Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu	53
A.11	Chyba měření v závislosti na náklonu dronu	54
A.12	Rychlost v ose X v čase	54
A.13	Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu	55

A.14	Chyba měření v závislosti na náklonu dronu . . . . .	55
B.1	Detail uchycení karbonové tyče k dronu . . . . .	56
B.2	Detail uchycení anemometru ke karbonové tyči . . . . .	56
B.3	Detail uchycení karbonové tyče k dronu . . . . .	57
B.4	Detail uchycení anemometru ke karbonové tyči . . . . .	57
B.5	Detail uchycení podpěr . . . . .	58
B.6	Detail uchycení podpěr . . . . .	58

# Úvod

Tato práce se zaměřuje na problematiku měření rychlosti bezpilotních prostředků, zejména kvadrokoptér. V posledních letech došlo k velkému rozvoji využívání bezpilotních prostředků (dronů) v širokém spektru aplikací, od zemědělství, přes průmyslové inspekce a měření, až po monitorování veřejných akcí.

I přes širokou škálu aplikací bezpilotních prostředků zůstává měření jejich rychlosti stále velmi problematické. Jedním z nejčastěji využívaných způsobů měření rychlosti je kombinace GNSS (Global Navigation Satellite System) a IMU (Inertial Measurement Unit). Tato kombinace umožňuje měření rychlosti s vysokou přesností.

Problém však nastává v prostředí, kde je signál GNSS buď zcela blokován, nebo jeho kvalita nedostačuje pro spolehlivé měření. V těchto situacích je nutné využívat alternativní metody měření rychlosti, jako jsou kamery nebo lidary. Tyto technologie však často trpí nevýhodami spojenými s podmínkami prostředí, jako je například špatná viditelnost nebo odrazy světla. U prostředků s jasně definovaným směrem letu, jako jsou UAV s pevnými křídly, je možnost použít Pitotovu trubici. Tento přístup však není vhodný pro drony, které jsou charakteristické svou schopností manévrovat ve všech směrech.

Vzhledem k těmto omezením zatím neexistuje levná a efektivní alternativa k měření rychlosti pomocí GNSS. Díky rozvoji malých a lehkých ultrazvukových anemometrů se však otevírá možnost využití těchto zařízení pro měření rychlosti dronů. Přestože v současnosti existuje řada studií, které se zabývají měřením větru pomocí ultrazvukového anemometru umístěného na kvadrokoptéře, není známa žádná studie, jež by hodnotila přesnost a vhodnost dat z těchto senzorů za účelem měření rychlosti bezpilotního prostředku. Touto problematikou se zabývá právě tato práce.

V úvodní části této práce je detailně popsán princip fungování ultrazvukového anemometru. Následující kapitola se věnuje přehledu využívaných metod měření rychlosti bezpilotních prostředků. Třetí část práce se zaměřuje na praktickou implementaci anemometru společnosti Calypso na kvadrokoptéru DJI M100, která byla zvolena jako experimentální platforma. V další části jsou prezentována naměřená data a získané výsledky provedených měření. Závěrečná kapitola navrhuje možné směry dalšího výzkumu.

# 1 Teoretický přehled

## 1.1 Anemometr

Anemometr je zařízení určené k měření rychlosti a směru větru. Existuje mnoho typů anemometrů, které se liší principem fungování. Mezi nejčastěji používané patří mechanické anemometry, které převádějí kinetickou energii větru na pohyb lopatek, jenž je následně měřen. Dalšími známými typy jsou termické anemometry, využívající změny teploty, a aerodynamické anemometry, které pracují na principu změny tlaku při proudění vzduchu.

Podle počtu složek větru, které jsou schopny měřit, rozlišujeme tři základní typy: 1D, 2D a 3D anemometry. 1D anemometry měří pouze jednu složku větru. 2D anemometry zaznamenávají dvě složky, díky čemuž lze určit jak rychlost, tak směr větru v rovině. 3D anemometry měří všechny tři složky větru a umožňují tak komplexní analýzu proudění vzduchu v prostoru. Jedním z moderních typů je ultrazvukový anemometr, který bude podrobněji popsán v následující kapitole.

## 1.2 Ultrazvukový anemometr

Ultrazvukový anemometr typicky měří dobu, kterou potřebuje ultrazvukový signál k překonání vzdálenosti mezi dvěma piezoelektrickými měniči (vysílačem a přijímačem). Tento čas se mění v závislosti na směru a rychlosti měřeného větru. Díky své nízké hmotnosti a konstrukci bez pohyblivých částí, které by mohly způsobovat vibrace, je vhodný k měření rychlosti větru na bezpilotních prostředcích. Následující kapitola se věnuje nejrozšířenějšímu principu měření rychlosti větru pomocí ultrazvukového anemometru, konkrétně metodě založené na měření doby letu ultrazvukového signálu.

### 1.2.1 Měření doby letu ultrazvukového signálu [1]

Ultrazvukový signál je vysílačem vyslán směrem k přijímači. Signál musí urazit známou vzdálenost  $s$ . Při známé rychlosti zvuku ve vzduchu je znám i čas  $t$ , za který tento signál musí dorazit k přijímači. Tento interval se bude měnit v závislosti na rychlosti a směru větru. To celé je definováno vztahem:

$$t_{\text{flight AB}} = \frac{d}{s_s + s_{sy}} \quad (1.1)$$

Kde:

- $t_{\text{flight AB}}$  je doba letu signálu mezi vysílačem (A) a přijímačem (B) [s]

- $d$  je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem [m]
- $s_s$  je rychlost zvuku ve vzduchu [m/s]
- $s_{sy}$  je rychlost větru směrem od bodu A k bodu B [m/s]

Protože rychlost zvuku ve vzduchu je závislá především na jeho teplotě, je třeba vzít v úvahu rovnici, která tuto závislost vyjadřuje:

$$s_s = 331.4 + 0.62T_a \quad (1.2)$$

Kde:

- 331.4 je rychlost zvuku ve vzduchu při 0 °C [m/s]
- $s_s$  je rychlost zvuku ve vzduchu [m/s]
- $T_a$  je teplota [°C]

Druhou a vhodnější možností pro eliminaci vlivu teploty a jiných nechtěných vlivů prostředí je měření doby letu v obou směrech každé osy. Pro měření doby letu signálu od bodu B k bodu A platí vztah:

$$t_{\text{flight BA}} = \frac{d}{s_s - s_{sy}} \quad (1.3)$$

Po detailním pohledu na rovnici 1.1 a rovnici 1.3 lze konstatovat, že znaménko ( $s_{sy}$ ) se mění v závislosti na pohybu větru - kladné při pohybu vzduchu po směru signálu, záporné při pohybu proti směru signálu. Po spojení a následném zjednodušení rovnic dostáváme rovnici, vyjadřující rychlost větru v závislosti na změřených časech:

$$s_y = \frac{d}{2} * \left( \frac{1}{t_{\text{flight AB}}} - \frac{1}{t_{\text{flight BA}}} \right) \quad (1.4)$$

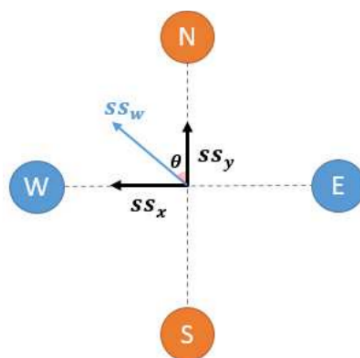
Vzhledem k tomu, že většina aplikací potřebuje měřit rychlost větru minimálně ve 2D rovině, je třeba umístit dva páry měničů orientovaných ortogonálně. Jeden pár bude měřit rychlost větru mezi severem a jihem (NORTH TO SOUTH) druhý mezi východem a západem (WEST TO EAST) - viz. obr. 1.1. Z této orientace už jde rychlost a směr větru vůči severu vypočítat podle následujících vzorců:

$$ss_w = \sqrt{ss_x^2 + ss_y^2} \quad (1.5)$$

$$\theta = \arctan \left( \frac{ss_y}{ss_x} \right) \quad (1.6)$$

Kde:

- $ss_w$  je celková rychlost větru [m/s]
- $ss_x, ss_y$  je rychlost větru v jednotlivých osách [m/s]
- $\theta$  je směr větru [°]



Obr. 1.1: Uspořádání os snímače ultrazvukového anemometru. Převzato z [1]

### 1.3 Anemometry založené na principu akustické rezonance

Kromě anemometrů založených na měření doby letu ultrazvukového pulzu existují také anemometry využívající akustickou rezonanci v dutině – tzv. rezonanční anemometry. V dutině je zabudováno několik měničů, které vytvářejí stojatou vlnu. Při průchodu větru dutinou dochází k posunu fáze této vlny. Měřením fázového posunu na jednotlivých měničích a matematickým zpracováním těchto dat je sensor schopen měřit horizontální rychlost a směr větru. Jedním z problémů tohoto typu senzoru je nižší přesnost měření ve srovnání s ostatními typy anemometrů. Přesto je v mnoha aplikacích využíván díky své dlouhé životnosti a schopnosti fungovat bez potřeby následné recalibrace po instalaci.[2][3]

### 1.4 Měření rychlosti na bezpilotních prostředcích

Měření rychlosti je jedním ze základních parametrů pro bezpečný pohyb dronu. V závislosti na používané technologii je rychlost dronu měřena buď vůči zemi(ground speed) nebo vůči vzduchu(air speed). V následující kapitole budou rozebrány nejběžnější principy a senzory používané pro měření rychlosti dronu.

#### 1.4.1 Global navigation satellite system - GNSS

GNSS je souhrnné označení pro systémy využívající satelity k přesnému určování polohy. Od roku 2024 fungují čtyři globální navigační systémy: americký GPS (Global Positioning System), ruský GLONASS (Global Navigation Satellite System), čínský BeiDou a evropský systém Galileo. Tyto systémy využívají satelity, které obíhají přibližně 20 000 km nad povrchem Země. Každý satelit má přesný čas,

který je generován pomocí vysoce přesných atomových hodin. Tento čas je pravidelně synchronizován s ostatními satelity i referenční stanicí na zemi. Vzhledem k tomu, že rychlost radiových vln se nemění, je doba letu signálu mezi satelitem a GPS přijímačem přímo úměrná vzdálenosti satelitu a přijímače. Každý satelit vysílá údaje o své dráze (poloze) a čase, kdy byl signál vyslán. Na základě těchto dat alespoň ze čtyř satelitů je schopen přijímač spočítat svoji polohu. Přesnost určení polohy je závislá na počtu přijímaných satelitů. Výpočty zahrnují určování vzdálenosti od jednotlivých satelitů a následnou trilateraci, která umožňuje přesné určení pozice, včetně korekce časové odchylky přijímače.[4]

## 1.4.2 Inertial measurement unit - IMU

IMU je pro dron kriticky důležité zařízení. Umožňuje měření zrychlení, orientace a rotace objektu díky kombinaci tří senzorů: akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. V IMU jsou obvykle umístěny tři akcelerometry, tři gyroskopy a tři magnetometry, přičemž každý je orientován na jednu z os kartézského souřadnicového systému (X, Y, Z). Pomocí dat z těchto senzorů řídicí jednotka dronu upravuje hodnotu otáček motoru, aby zajistila stabilitu dronu. Zároveň data z těchto senzorů umožňují spočítat polohu, rychlost a orientaci dronu vůči počátečnímu bodu měření (Inerciální souřadnicový systém). Po sjednocení souřadnicových rámců se tato data často kombinují s informacemi z dalších senzorů rychlosti, například GPS, lidarů nebo optických senzorů.[5]

### Akcelerometr

Senzor měřící zrychlení, jak lineární, tak úhlové. Z těchto dat lze integrací v čase určit rychlost a následně polohu v prostoru.[6]

### Gyroskop

Senzor pro měření orientace a úhlové rychlosti v jednotlivých osách. Pomocí integrace těchto dat lze vypočítat úhlový náklon objektu vůči povrchu Země. Hlavním problémem gyroskopů je drift, který se díky integraci v čase zvyšuje.[6]

### Magnetometr

Senzor měřící zemské magnetické pole, který umožňuje IMU eliminovat drift gyroskopu a tím zlepšit jeho stabilitu. Je však nutné provést kalibraci přímo na dronu, aby se kompenzovalo statické magnetické rušení, které by mohlo způsobovat chyby.[7]

### 1.4.3 Optické senzory

Optické senzory jsou využívány u bezpilotních prostředků pro navigaci a měření rychlosti, zejména v prostředí, kde není k dispozici stabilní GNSS signál. Tato metoda je založena na datech získaných z kamery, umístěné na spodní straně bezpilotního prostředku. Ze získaného obrazu jsou analyzovány změny v pozici pixelů mezi po sobě jdoucími snímky. Na základě vlastností kamery (ohniskové vzdálenosti) a výšky dronu je možné určit vztah mezi pozicí pixelů na jednotlivých snímcích. Tento vztah pak pomáhá při analýze pohybu objektů v záběru a tím i při výpočtu rychlosti pohybu v horizontální rovině.

Velkou nevýhodou těchto metod je, že jejich přesnost může být ovlivněna několika faktory, jako je kvalita obrazu nebo stabilita kamery. Kvalita obrazu bývá často narušena rychlostí letu. Další komplikací může být také snímání povrch. Pokud kamera zachytí homogenní prostředí s nízkým kontrastem, například vodní hladinu nebo jednolitou podlahu, snižuje se tím schopnost systému rozpoznat změny a správně vyhodnotit pohyb. Pro analýzu pohybu pixelů v obraze se používají různé metody, mezi nejznámější patří optický tok a template matching.[8][9]

### 1.4.4 Pitotova trubice

Pitotova trubice je zařízení, které měří airspeed na základě principu Bernullioho rovnice. Tato rovnice vychází ze zákona zachování energie. Pitotova trubice se umístí do místa, kde nebude ovlivněna aerodynamickými vlastnostmi letounu nebo dronu ve směru letu, tak aby mohl vzduch proudit do trubice. Jelikož vzduch z trubice nemůže uniknout, vznikne uvnitř trubice tzv. Pitotův tlak, který je měřen. Z tohoto tlaku a statického tlaku vzduchu je vypočtena rychlost podle vzorce:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_t - p_s)}{\rho}} \quad (1.7)$$

Kde:

- $u$  je rychlost [m/s]
- $p_t$  je Pitotův tlak [Pa]
- $p_s$  je statický tlak - tlak vzduchu, když není v pohybu [Pa]
- $\rho$  je hustota vzduchu [ $kg/m^3$ ]

Tato rovnice platí pouze za předpokladu, že je tekutina nestlačitelná. Vzhledem k tomu, že při běžných letových rychlostech dronu je účinek stlačitelnosti vzduchu zanedbatelný, lze i vzduch považovat za nestlačitelný. Předností této metody je její přesnost, naopak velkou nevýhodou je měření rychlosti pouze v jednom směru, proto je tento systém použitelný pouze u dronů s jasně definovaným směrem letu.[10]

### 1.4.5 Lidar

Jedná se o spíše doplňkový způsob měření rychlosti. Lidar využívá odrazu laserových paprsků k určení vzdálenosti k jednotlivým objektům. Jeho princip spočívá v měření doby letu laserového paprsku od vyslání až po jeho návrat po odrazu od objektu. Na základě změřené doby provádí výpočet vzdálenosti, ze které vytváří virtuálně mapu pomocí algoritmů SLAM. Jelikož je dron schopný zjistit svou polohu ve vytvořené mapě, může na základě změn v jeho poloze mezi jednotlivými snímky dat vypočítat i rychlost pohybu.

Jednou z hlavních výhod použití Lidaru je jeho schopnost efektivně pracovat i ve špatných světelných podmínkách, kde optické senzory mohou mít problémy s dostatečným osvětlením. Na druhou stranu jeho účinnost závisí na dostatečném odrazu laserových paprsků od objektů v jeho okolí.

V otevřených prostorech, kde chybí povrchy vhodné pro odraz laseru, může být Lidar zcela nepoužitelný. Proto je výhodné Lidar kombinovat s jinými měřicími metodami. Jedním z příkladů může být GNSS systém, který výborně funguje v otevřeném prostoru. Nicméně v husté městské zástavbě vykazuje GNSS systém velké chyby. V těchto případech může Lidar výrazně přispět k přesnějšímu měření polohy a rychlosti dronu.[11]

### 1.4.6 Fúze senzorů

Jak již bylo zmíněno, pro dosažení co nejpřesnějších odhadů polohy a rychlosti se data z různých senzorů často kombinují pomocí pokročilých algoritmů fúze dat, mezi které patří různé varianty Kalmanových filtrů. V oblasti bezpilotních prostředků je rozšířený Kalmanův filtr (EKF) nejčastěji používanou metodou. Princip tohoto filtru je popsán v následující kapitole.

#### Extended kalman filter - EKF

EKF se používá především v případech, kdy model systému není lineární, protože standardní Kalmanův filtr předpokládá lineární vztahy mezi proměnnými. EKF tuto omezenost překonává tím, že nelineární funkce přibližuje pomocí Taylorovy řady a následně zpracovává tyto lineární aproximace. Tento přístup umožňuje efektivní a robustní fúzi dat i v případech, kdy jsou modely a měření výrazně nelineární, což je typické právě u dynamiky bezpilotních prostředků.[12]

Tento algoritmus pracuje na tzv. zpožděném "časovém horizontu fúze", což znamená, že zohledňuje různá časová zpoždění měření od jednotlivých senzorů vůči IMU. To je důležité, protože senzory obvykle mají rozdílné frekvence a doby odezvy.

Aby byl filtr schopen správně kombinovat data z různých senzorů, jsou měření uložena do vyrovnávací paměti typu FIFO, odkud jsou pak ve správný čas vyzvednuta a použita k výpočtu odhadu pozice, rychlosti a dalších letových parametrů. Tento proces umožňuje kombinovat data z různých senzorů, což zajišťuje vysoce přesné a stabilní odhady, i v přítomnosti šumu a dalších měřicích chyb.

EKF funguje v různých provozních režimech, které závisí na dostupnosti konkrétních senzorů. Po spuštění filtr nejprve zkontroluje, které senzory jsou dostupné, a provede počáteční zarovnání – například korekci náklonu, natočení a výšky. Poté začne kontinuálně odhadovat orientaci (rotaci), vertikální rychlost, výšku a kompenzovat bias v datech z IMU. Mezi základní senzory patří IMU pro měření zrychlení a úhlových rychlostí, magnetometr sloužící k určení směru vůči zemskému magnetickému poli a barometr pro měření výšky. Jakmile jsou tyto senzory k dispozici, filtr poskytuje základní, ale spolehlivé odhady. S připojením dalších senzorů, jako je GNSS nebo lidar, může EKF odhadovat další parametry a zvyšovat přesnost a stabilitu výsledků.

Pokud je k dispozici více IMU, magnetometrů a dostatečný výpočetní výkon, lze spustit více instancí EKF, přičemž každá instance používá jinou kombinaci senzorů. Tím je možné detekovat a izolovat problémy, jako jsou změny v biasu IMU nebo zadržovaná data. Tento přístup vede k lepší stabilitě a přesnosti odhadů, díky nezávislé kontrole různých sensorových kombinací.[13]

## 1.5 Souřadnicové systémy dronu

Za účelem porovnání dat z anemometru a dat z dronu je nutné sjednotit používané souřadnicové systémy. Základní souřadnicové systémy, které se u dronů používají, jsou Aircraft-Body Coordinate Frame (body frame) a Earth-Fixed Coordinate Frame (local frame).

Anemometr umístěný na dronu z principu zaznamenává data v body frame. Naproti tomu řídicí jednotka dronu všechny relevantní vektorové veličiny zaznamenává v local frame. Další komplikací představuje rozdílný způsob vyjádření dat. Zatímco anemometr zaznamenává rychlost větru v polárním souřadnicovém systému (směr a velikost), dron ukládá data v kartézském souřadnicovém systému ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

V následujících částech jsou jednotlivé souřadnicové systémy detailně rozebrány a popsány způsoby jejich převodu.

### 1.5.1 Aircraft-Body coordinate frame

Počátek tohoto kartézského souřadnicového systému je umístěn v těžišti kvadrokoptéry. Osa  $X$  směřuje dopředu ve směru pohybu dronu, osa  $Z$  směřuje dolů kolmo

k rovině vrtulí a osa  $Y$  je definována jako vektor kolmý na obě předchozí osy, určený pomocí pravidla pravé ruky.[14]

## 1.5.2 Earth-Fixed coordinate frame

Tento souřadnicový systém je vztažen ke konkrétnímu bodu na zemském povrchu – v případě dronu je to nejčastěji bod vzletu. Osa  $X$  směřuje k severu, osa  $Y$  směřuje k východu a osa  $Z$  směřuje do středu Země (tedy dolů).[14]

## 1.5.3 Převod mezi local frame a body frame pomocí kvaternionů

Aby bylo možné převádět informace o pohybu dronu mezi různými souřadnicovými systémy, je potřeba mít nástroj, který efektivně popisuje orientaci dronu v prostoru. Řídící jednotka dronu k tomu využívá kvaterniony, které popisují orientaci dronu (body frame) vůči lokálnímu souřadnicovému systému (local frame).

Kvaternion je čtyřprvkový vektor, jehož struktura umožňuje efektivní reprezentaci rotací ve 3D prostoru bez problémů s gimbal lockem, který by mohl nastat při použití Eulerových úhlů. Tento kvaternion má tvar:

$$q = a + bi + cj + dk \quad (1.8)$$

kde  $a$  je skalární část kvaternionu a složky  $b, c, d$  jsou koeficienty, které násobí jednotlivé báze vektory  $i, j$  a  $k$ , jež odpovídají osám  $x, y, z$  v prostoru. Pro rotaci vektorů mezi těmito souřadnicovými systémy platí vztah:

$$s' = Q_R \cdot s \quad (1.9)$$

Kde

- $s'$  je vektor v body frame
- $Q_R$  je rotační matice odvozená z kvaternionu
- $s$  je vektor v souřadnicovém systému local frame

Rotační matice, která se používá pro rotaci mezi souřadnicovými systémy, je definována takto:

$$Q_R = \begin{bmatrix} 1 - 2c^2 - 2d^2 & 2(bc + ad) & 2(bd - ac) \\ 2(bc + ad) & 1 - 2b^2 - 2d^2 & 2(cd + ab) \\ 2(bd + ac) & 2(cd - ab) & 1 - 2b^2 - 2c^2 \end{bmatrix}$$

[15][16]

## 1.5.4 Polární a kartézské souřadnice

Polární souřadnicový systém využívá pro popis bodu v 2D prostoru vzdálenost ( $r$ ) a úhel ( $\varphi$ ) od referenčního směru. Naopak kartézský souřadnicový systém určuje bod prostřednictvím jeho horizontální ( $x$ ) a vertikální ( $y$ ) složky vzhledem k počátku souřadnic.[17] Z důvodu efektivnější porovnatelnosti dat je potřeba provést konverzi polárních souřadnic do souřadnic kartézských dle následujících vzorců:

$$x = r \cdot \cos(\varphi) \quad (1.10)$$

$$y = r \cdot \sin(\varphi) \quad (1.11)$$

## 1.6 Chyba anemometru umístěném na dronu

U anemometru umístěného na dronu mohou vznikat chyby především dvěma hlavními způsoby. Prvním je odchylka způsobená náklonem dronu a tedy i samotného anemometru. Druhým pak chyba vyplývající z indukovaného proudění vzduchu, které vytvářejí rotující vrtule dronu. Cílem správného umístění senzoru je proto minimalizovat vliv tohoto indukovaného proudění. Zároveň je však nutné umístit anemometr co nejbližší k těžišti dronu, aby byla zachována jeho stabilita během letu.

### 1.6.1 Chyba náklonu

Při letu dronu určitou rychlostí vpřed dochází k jeho náklonu, jehož velikost je závislá právě na rychlosti letu. U běžných kvadrokoptér se během ustáleného horizontálního letu náklon běžně pohybuje do  $8^\circ$ . Při manévrech, jako je prudké zrychlení nebo zpomalení, však může krátkodobě dosáhnout i úhlu přibližně  $35^\circ$ . Pokud je anemometr v průběhu letu nakloněn, dochází ke vzniku chyby v měření rychlosti větru, jejíž velikost závisí na úhlu náklonu. Tato chyba je ovlivněna i mechanickou konstrukcí anemometru, která mění charakter proudění vzduchu kolem senzoru. Z tohoto důvodu je vhodné vycházet z dat získaných pro konkrétní model anemometru, případně pro konstrukčně podobné zařízení. Problémem však zůstává nedostupnost těchto specifických dat pro většinu běžně dostupných typů anemometrů.

Jednou z mála studií zkoumající velikost chyby v závislosti na náklonu anemometru provedl Aman Basawanal (2024)[3], který použil anemometr calypso MINI a měřil vliv náklonu na přesnost anemometru. Tato studie dospěla k závěru, že při náklonu v rozsahu  $\pm 20^\circ$  je vliv této chyby zanedbatelný.

Další relevantní studii provedl Derek Hollenbeck a kol. (2019) [18], kteří použili anemometr FT205, založený na principu akustické rezonance. Tato studie zkoumala

vliv náklonu v rozsahu  $\pm 15^\circ$ , přičemž i zde bylo zjištěno, že odchylky způsobené náklonem jsou v daném rozsahu malé a lze je považovat za zanedbatelné.

Je však třeba zdůraznit, že tato zjištění pocházejí z laboratorního prostředí aerodynamického tunelu a jejich platnost je nutné ověřit i při reálném umístění anemometru na dronu.

## 1.6.2 Chyba indukovaného proudění vzduchu

Proudění vzduchu vyvolané rotujícími vrtulemi vytváří turbulence. Tyto turbulence mohou způsobit nepravidelné a zkreslené proudění vzduchu v okolí měřícího senzoru, což vede k odchylkám ve výsledných datech. Vzhledem k tomu, že velikost a charakter těchto chyb jsou úzce spojeny s aerodynamickými vlastnostmi konkrétního modelu dronu, může se jejich dopad lišit mezi jednotlivými typy zařízení.

## 1.6.3 Doporučení z odborné literatury

Pro stanovení místa umístění anemometru byl využit výzkum od Tianhao Houem a kol. (2023)[19], který provedl simulaci indukovaného vlivu proudění vzduchu v různých vzdálenostech od rotoru dronu. Ze simulace vychází, že nejlepší umístění je ve středu nad rotory dronu. Zároveň lze dojít k závěru, že umístění anemometru alespoň do dvojnásobné vzdálenosti velikosti vrtulí od rotoru dronu výrazně snižuje vliv indukovaného proudění vzduchu.

Další studie, která potvrzuje tezi, že umístění v této vzdálenosti je dostatečné pro minimalizaci vlivu rotoru, je od Budiprasojo a kol. (2021)[20]. Tato studie provádí měření pomocí hot-wire anemometru a quadrocoptery s průměrem vrtulí 20 cm. Studie došla k závěru, že nejvhodnějším místem pro umístění senzoru je nad vrtulí na okrajích dronu nebo ve středu dronu. Pokud je však senzor umístěn ve středu dronu, je třeba dbát na to, že v této oblasti se setkávají proudy ze čtyř vrtulí. To může vytvořit zónu víru, která může snížit přesnost senzoru.

Podobně studie od Wearmouth, C. (2022)[21] použila dron DJI M100 a anemometr Trisonica MINI a zjišťovala, jak umístění anemometru na dronu má vliv na jeho přesnost. Studie prováděla měření horizontální složky indukovaného proudění v různých vzdálenostech nad rotory dronu po dobu 30 vteřin. Z naměřených dat pak byla stanovena průměrná hodnota a směrodatná odchylka, která odráží turbulentní proudění. Ze studie vyplývá, že největší indukovaný proud vzduchu byl na okrajích rotorů. Proudění vzduchu generované rotory se s rostoucí výškou anemometru nad rotory dronu zmenšuje. Studie ukazuje, že turbulentní proudění je výrazně zvýšené do výšky přibližně 30 cm nad rotory. Na základě těchto výsledků autoři doporučují umístit anemometr minimálně 50 cm nad vrtule, aby byl vliv indukovaných proudů na měření co nejmenší.

## 2 Integrace anemometru na dron

Praktická část práce byla rozdělena do dvou experimentálních částí, přičemž v každé fázi byl využit jiný typ anemometru od firmy Calypso, oba založeny na principu time of flight. V první fázi byl použit 2D anemometr Ultrasonic Portable Mini Wind Meter (calypso MINI), který je schopen měřit rychlosti větru od 1 m/s do 25 m/s, přičemž deklarovaná přesnost výrobcem je  $\pm 0.3$  m/s do 10 m/s a 3% pro rychlosti větru nad 10 m/s. Přesnost určování směru větru je  $\pm 1^\circ$  při 10 m/s. Anemometr komunikuje pomocí Bluetooth technologie. Jeho hlavní výhodou je nízká hmotnost (73 g)[22], což se zdálo jako ideální předpoklad pro integraci na bezpilotních prostředcích.

Nicméně na základě provedených testů bylo zřejmé, že použitý anemometr není vzhledem k nízké vzorkovací frekvenci (pouze 1 Hz) vhodný pro sběr dat, která by mohla být v budoucnu využita pro estimaci rychlosti dronu. I přes tento zjevný nedostatek dokázal prokázat potenciál tohoto typu měření, jak popisuje kapitola 3.1.

Ve druhé části experimentu byl využit anemometr Ultra-Low-Power Ultrasonic wind meter (calypso ULP). Jeho hlavní výhodou je desetinásobná měřicí frekvence oproti předchozímu modelu. Dále propojení pomocí UART protokolu. Měřicí rozsah a přesnost deklarovaná výrobcem jsou stejné jako u předchozího modelu. Velkou nevýhodou je relativně vysoká hmotnost (240 g). Oba anemometry mají tvarově podobný design. Testy prováděné tímto anemometrem jsou popisovány v kapitole 3.2.

### 2.1 Využitý dron

Pro integraci anemometru bylo vybráno zařízení quadcopter DJI M100. Jedná se o středně velký dron s rozměry vrtulí 32 cm. Jeho hmotnost je 2355 g a maximální vzletová hmotnost je 3600 g.[23]

Na základě výše zmíněných studií bylo rozhodnuto umístit anemometr přímo do středu 55 cm nad rotory dronu. Je však důležité říct, že většina studií, včetně těch zmíněných, se zaměřuje na měření větru s dronem v tzv. hover pozici - tedy na místě, bez horizontálního pohybu. Vzhledem k tomu, že v této práci probíhají měření za letu, může se vliv indukovaného proudění vzduchu mírně lišit.

#### 2.1.1 Integrace Ultrasonic Portable Mini wind meter

Pro výrobu držáku anemometru byla použita 3D tiskárna, na které byly vytisknuty komponenty pro upevnění 55 cm dlouhé karbonové tyče, na jejímž konci byl umístěn anemometr. Anemometr byl nasměrován tak, aby značka označující  $0^\circ$  směřovala ve směru čelní strany dronu.

Jedním z technických problémů tohoto typu umístění je kmitání karbonové tyče, která je součástí konstrukce držáku anemometru. Toto kmitání vykazuje frekvenci 21 Hz. Tento jev mohl negativně ovlivnit stabilitu a přesnost měření. Fotografie 2.1 zachycuje uchycení anemometru MINI na dronu. Podrobnější snímek držáku karbonové tyče je uveden v příloze B.1.

## Záznam dat

Vzhledem k tomu, že tento typ anemometru přenáší data prostřednictvím technologie Bluetooth, bylo nutné zajistit vhodný způsob jejich záznamu. Za tímto účelem byl na dron připevněn mobilní telefon s aplikací AnemoTracker od firmy CALYPSO INSTRUMENTS. Tato aplikace umožňuje zobrazení a záznam změřených dat ve formátu typu CSV.

Referenční data o rychlosti, která byla měřena pomocí GNSS a zaznamenána v řídicí jednotce dronu, byla získána pomocí nástroje pyulog. Tento nástroj umožňuje přístup k letovým záznamům (logům) a jejich převod do formátu CSV.



Obr. 2.1: Dron s calypso MINI



Obr. 2.2: Dron s calypso ULP

### 2.1.2 Integrace Ultra-Low-Power Ultrasonic wind meter

Prvotní uchycení bylo provedeno obdobným způsobem jako u anemometru MINI. Vzhledem k tomu, že hmotnost tohoto modelu je přibližně třikrát vyšší, došlo ke značnému nárůstu amplitudy kmitů, ačkoli jejich frekvence mírně poklesla (přibližně na 16 Hz). Z tohoto důvodu bylo nutné doplnit konstrukci o dvě "boční" podpěry, které významným způsobem omezily kmitání anemometru při všech režimech letu.

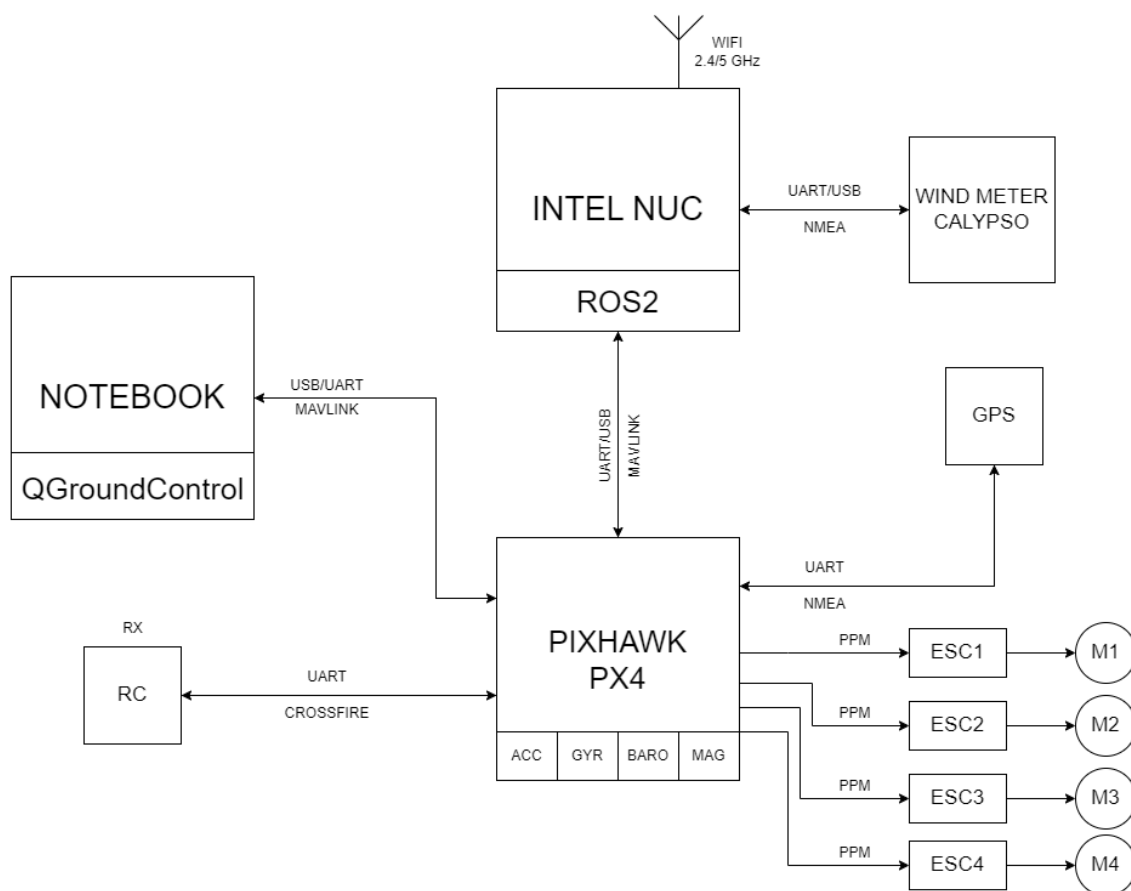
Celkový pohled na umístění anemometru CALYPSO ULP na dronu je zachycen na fotografii 2.2. Detailní snímky uchycení jsou uvedeny v příloze B.2.

## Záznam dat

Další změnou je způsob záznamu dat. Za tímto účelem byl k dronu připevněn kompaktní počítač Intel NUC, na kterém běží systém ROS2(Robot operating system).

Tento open-source middleware umožňuje efektivní správu a integraci různých komponent dronu, včetně senzorů a řídicích systémů. Skládá se z několika klíčových částí: nody, které představují jednotlivé výpočetní procesy; topics, které slouží k asynchronní komunikaci mezi nody, services, které umožňují synchronní komunikaci, a actions pro dlouhotrvající úkoly.

Jak je znázorněno na schématu 2.3, anemometr komunikuje pomocí standardního komunikačního protokolu NMEA 0183, přičemž data jsou přenášena prostřednictvím sériového rozhraní UART. Z tohoto důvodu byl napsán node calypso\_ros\_driver. Tento node asynchronně přijímá zprávu přicházející po sériové lince. Parsuje relevantní části a následně publikuje zprávu WindSpeed, obsahující hlavičku, rychlost



Obr. 2.3: Komunikační model systému

a směr větru, na topic `wind_speed_data`. V konfiguračním souboru je možné nastavit 4 parametry. USBport na který je anemometr připojen. Baudrate, neboli rychlost přenosu dat. Parametr logging, který umožňuje zapnout nebo vypnout záznam dat z anemometru do souboru typu CSV. Posledním konfigurovatelným parametrem je název složky, do které se mají ukládat CSV soubory v případě, že logging je zapnutý.

Také řídicí jednotka dronu je propojena se systémem ROS2 prostřednictvím rozhraní UART/USB, přičemž pro komunikaci je využit protokol MAVLink. Tento protokol zajišťuje přenos telemetrických dat ze senzorů (ACC, GYR, BARO, MAG, GNSS), které byly původně dostupné pouze v řídicí jednotce dronu. Pomocí ROS2 mostu jsou tato data dále publikována jako ROS2 topics, což umožňuje jejich zpracování a záznam v rámci systému ROS2.

Tento způsob integrace, který je naznačen na schématu 2.3, přinesl nejen efektivnější záznam dat ze senzorů, ale také otevřel širší možnosti pro jejich pokročilé zpracování při dalším výzkumu. Nicméně implementace dodatečného hardwaru významně zvýšila celkovou hmotnost konstrukce dronu, která se nyní pohybuje na limitu maximální vzletové hmotnosti.

## 3 Naměřená data

V rámci sběru datasetů byla provedena série letových experimentů. Všechny lety byly realizovány na otevřené ploše v blízkosti Vědeckotechnického parku profesora Lista v Brně. Letová výška byla u všech trajektorií jednotně nastavena na 14 metrů nad zemí. Všechny trajektorie, s výjimkou letů v režimu hover, byly řízeny autopilotem a naprogramovány v softwaru QGroundControl.

### 3.1 Naměřená data - Ultrasonic Portable Mini wind meter

#### 3.1.1 Letová trajektorie

Podle údajů z nejbližší meteorologické stanice (Brno Žabovřesky) byly během letu nárazy větru dosahující maximálně 4 m/s, přičemž průměrná rychlost větru se pohybovala kolem 2 m/s. Směr větru se pohyboval v rozmezí od 60° do 170° (jižní až severovýchodní). Měření byla rozdělena do dvou částí: let ve tvaru čtverce a měření v tzv. hover pozici.

##### Trajektorie ve čtverci

Tato část experimentu zahrnovala let dronu ve tvaru čtverce. Cílem bylo ověřit přesnost měření rychlosti pomocí anemometru při různých rychlostech dronu. Dron letěl po trase čtverce, přičemž jeho čelo bylo vždy nasměřováno vpřed. V každém rohu trajektorie došlo k otočení dronu o 90°, čímž byl zachován konstantní směr letu. Aby bylo možné oddělit jednotlivé strany čtverce, byly v rozích čtverce nastaveny 5 s pauzy. Délka strany čtverce byla 50 m.

Během této části letu bylo dronem zaletěno celkem 5 čtverců, přičemž pro každý čtverec byla nastavena různá rychlost pohybu dronu: 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s a 10 m/s. Po obletění celého čtverce byla nastavena 10 s pauza.

##### Hover pozice

Ve druhé části letu byl dron uveden do tzv. hover pozice, tedy stavu, kdy zůstává nehybně viset ve vzduchu s nulovým horizontálním pohybem. Cílem této části bylo ověřit vliv dronu na anemometr, konkrétně vliv otáčení dronu podél osy Z (YAW úhel) na přesnost měření anemometrem. Měření byla prováděna pootáčením dronu o 30° v ose Z. Celkem tedy bylo provedeno 12 měření, přičemž každé měření trvalo 10 sekund.

### 3.1.2 Vyhodnocení dat

Aby bylo možné porovnávat rychlosti měřené anemometrem s rychlostmi změřenými pomocí GNSS, bylo nutné převést rychlosti z globálního systému souřadnic do lokálního systému souřadnic (body frame) pomocí natočení reprezentovaného kvaterniony.

Vzhledem k tomu, že data o rychlosti a natočení dronu byla zaznamenávána s rozdílnou frekvencí, nebylo možné provést přímo transformaci referenční rychlosti získané z GNSS do lokálního systému souřadnic. Proto byla vytvořena funkce `merge_and_interpolate`, která zajistí časové sladění obou veličin. Tato funkce provede lineární interpolaci dat z tabulky s vyšším počtem vzorků tak, aby každý vzorek z menší tabulky měl odpovídající hodnoty z druhé tabulky. Výsledkem je časově sladěný dataset umožňující převod rychlosti do body frame a její následné porovnání s rychlostí změřenou anemometrem.

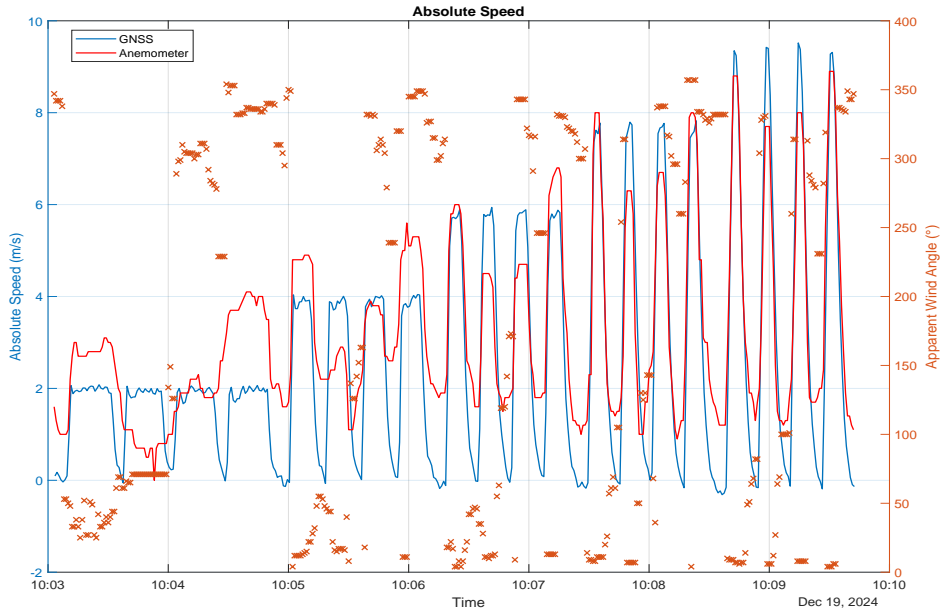
Dalším problémem bylo zpoždění dat z anemometru vůči GNSS datům. Tento posun byl nejspíše způsoben pomalejším výstupem anemometru a nepřesností nastavení času v mobilním telefonu vůči času řídicí jednotky dronu. Pro eliminaci tohoto časového rozdílu byla vytvořena funkce `find_best_aligment`, která pomocí metody nejmenších čtverců hledá časový posun vedoucí k největší možné shodě mezi oběma signály. Výstupem této funkce je hodnota časové korekce, při níž dochází k nejmenšímu rozdílu dat. Na základě této funkce byla data z anemometru posunuta o 3,42 s.

#### Trajektorie ve čtverci

Na grafu 3.1 jsou zobrazená data změřená anemometrem MINI v závislosti na čase, spolu s absolutní rychlostí změřenou pomocí GNSS. Na levé straně je vynesena absolutní rychlost, na pravé straně úhel změřený anemometrem. Z grafu je zřetelně patrná trajektorie letu, přičemž data z anemometru korespondují s daty z referenčního GNSS systému po odečtení/přičtení rychlosti větru. Po zaměření se na časy, kdy nebyl žádný pohyb dronu, lze dojít k závěru, že rychlost větru se v čase téměř neměnila a pohybovala se v rozmezí od 1,5 m/s do 2 m/s. Směr změřeného větru anemometrem byl pro jednotlivé strany čtverce 40°, 130°, 220°, 310°. Na základě těchto údajů lze konstatovat, že při letu první strany čtverce foukal protivítr z pravé strany. U letu druhé strany čtverce foukal vítr zezadu zprava, u třetí zezadu zleva, u čtvrté protivítr zleva.

Další zajímavostí je rozdílná charakteristika letu po větru při rychlostech dronu do 5 m/s, která se liší od ostatních čtverců. Tento rozdíl může být způsoben specifickým vlivem větru, chybou anemometru nebo umístěním anemometru. U dvou následujících čtverců bylo pozorováno mírné podhodnocení rychlostí naměřených anemometrem ve srovnání s referenčními daty GNSS. V poslední straně čtverce,

kde dron dosahoval rychlosti 10 m/s, se toto podhodnocení ještě poměrně výrazně zvýšilo. Otázkou zůstává, zda toto zhoršení není způsobeno pouze omezeným počtem měřících bodů při dané rychlosti (pouze 2–3 hodnoty).



Obr. 3.1: Absolutní rychlost v čase

Vzhledem k tomu, že měření byla prováděna pouze v ose X lokálního souřadného systému a pro srovnání měření nejen absolutní rychlosti, ale i lepšího srovnání úhlu, který anemometr měří, byla pro následující analýzu brána pouze data týkající se této osy. Graf vykreslující rychlosti v ose X v závislosti na čase koresponduje s grafem 3.1 a je možné ho nalézt v příloze A.1.

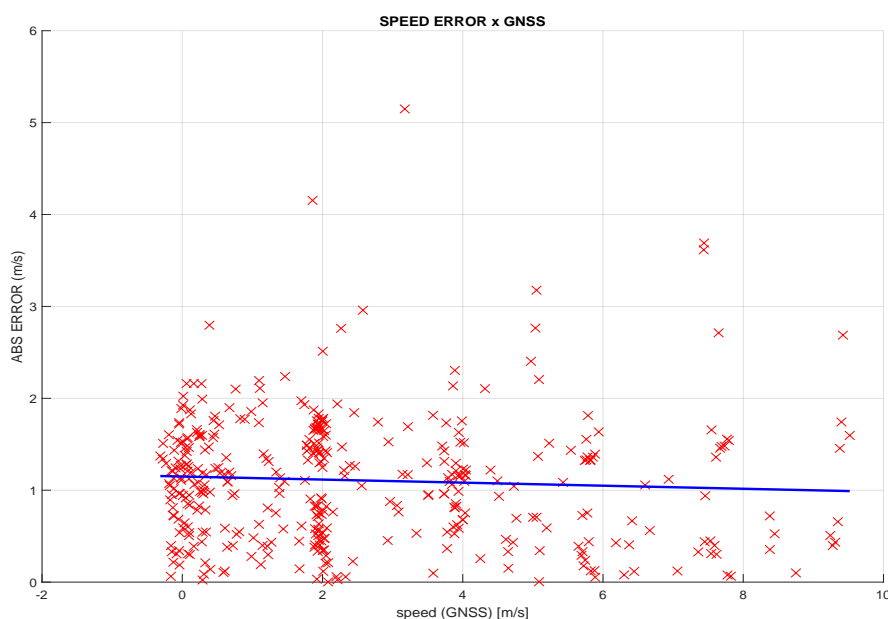
Dalším bodem analýzy byla chyba rychlosti v ose X, definovaná jako absolutní hodnota rozdílu mezi rychlostí naměřenou anemometrem a rychlostí určenou pomocí GNSS, v závislosti na rychlosti letu v ose X měřené pomocí GNSS. Tento vztah byl vykreslen v grafu 3.11 a výsledky ukazují, že po proložení naměřených bodů přímkou se její hodnota pohybuje od 0,95 m/s do 1,15 m/s. Tato hodnota přibližně odpovídá rychlosti větru. Za předpokladu, že je vítr po celou dobu měření konstantní, tedy dojdeme k závěru, že s větší rychlostí dronu dochází k podhodnocení dat o 0,2 m/s oproti menším rychlostem. To by naznačovalo, že rychlost pohybu dronu v takovémto rozsahu nemá významný vliv na přesnost měření.

Přesto zůstává otázkou, zda tato odchylka není ovlivněna nedostatkem dat při vyšších rychlostech. Z tohoto důvodu byly provedeny letové trajektorie popsané v kapitolách 3.2.1 a 3.2.2, jejichž výsledky také naznačují, že rychlosti do 10 m/s nemají

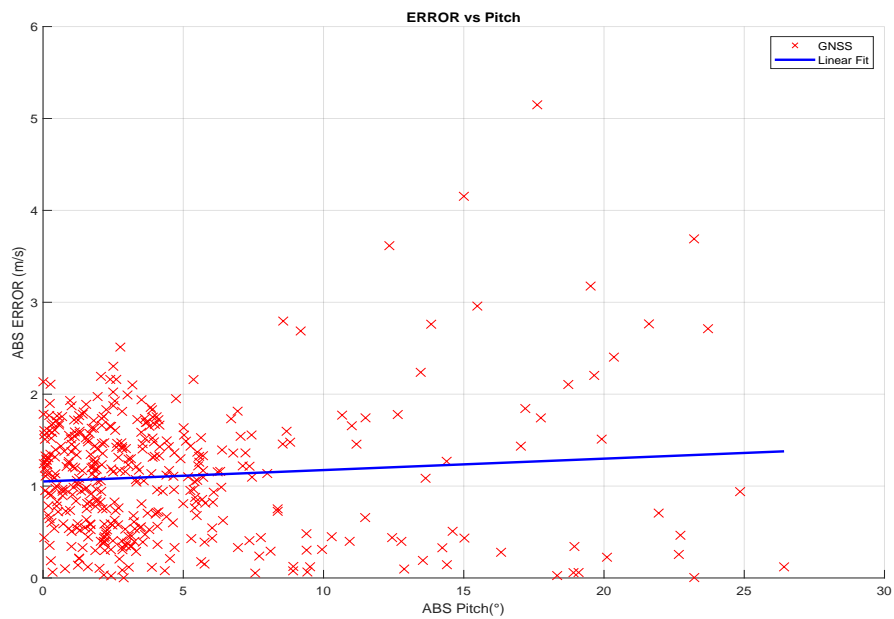
zásadní vliv na přesnost měření anemometru.

Poslední část analýzy se zaměřila na chybu v závislosti na absolutní hodnotě náklonu dronu. Za předpokladu, že chyba měření je stejná pro kladné i záporné hodnoty náklonu, tedy že závisela na velikosti úhlu, nikoliv na jeho směru, lze dojít k závěru, že s rostoucím úhlem náklonu docházelo ke zvýšení chyby měření. Velkým problémem této analýzy je však skutečnost, že není možné trvale udržet konstantní hodnotu náklonu. To způsobuje, že při velkých úhlech, které se vyskytují především při zastavování nebo zrychlování dronu, je k dispozici pouze malý počet vzorků. Výsledný trend tedy nemusí odrážet skutečné chování chyby, ale spíše zkresení způsobené nevyváženým rozložením vzorků.

Při podrobnějším zkoumání běžných pracovních úhlů náklonu dronu v rozmezí  $\pm 8^\circ$  se ukazuje, že chyba měření má zanedbatelný vliv. Tento závěr je však pravděpodobně ovlivněn omezeným množstvím dostupných dat. Navíc se při dalším měření ukázalo, že velikost chyby je kromě jiného silně závislá na časové synchronizaci mezi jednotlivými datovými zdroji. Tato závislost je způsobena především krátkým časovým intervalem, během kterého se dané úhly náklonu dronu vyskytují. Závěry ohledně chyby způsobené náklonem je proto třeba považovat za orientační a zatížené velkou nejistotou.



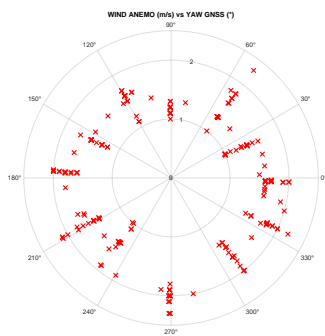
Obr. 3.2: Chyba měření v závislosti na rychlosti



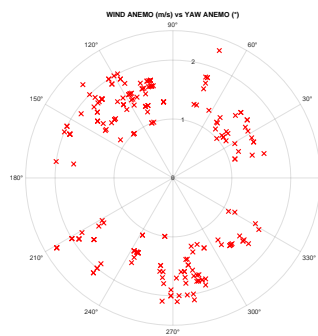
Obr. 3.3: Chyba měření v závislosti na náklonu dronu

### Hover pozice

Polární graf 3.4 zobrazuje naměřené rychlosti větru v závislosti na orientaci dronu. V grafu lze pozorovat kruh, lehce posunutý vůči středu. Naměřené hodnoty se pohybují od 1 m/s do 2,3 m/s.



Obr. 3.4: Závislost větru změřeného anemometrem na úhlu natočení dronu



Obr. 3.5: Závislost rychlosti na směru větru změřený anemometrem

Polární graf 3.5 znázorňuje závislost rychlosti na směru větru zaznamenaném anemometrem. V grafu již nelze jednoznačně identifikovat ucelené skupiny měření podle orientace dronu a zároveň jsou patrné tři výrazné mezery v oblastech  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $180^\circ$ . Tyto mezery mohou indikovat nepřesnosti v určování směru větru, zejména při specifických směrech přicházejícího proudění. Jako možná příčina se nabízí mechanické kmitání karbonové tyče, případně omezená schopnost anemometru spolehlivě detekovat směr proudění z určitého směru. Nelze však zcela vyloučit ani možnost, že se jedná o důsledek reálných změn směru větru během měření.

## 3.2 Naměřená data - Ultra-Low-Power Ultrasonic wind meter

### 3.2.1 Letová trajektorie číslo 1

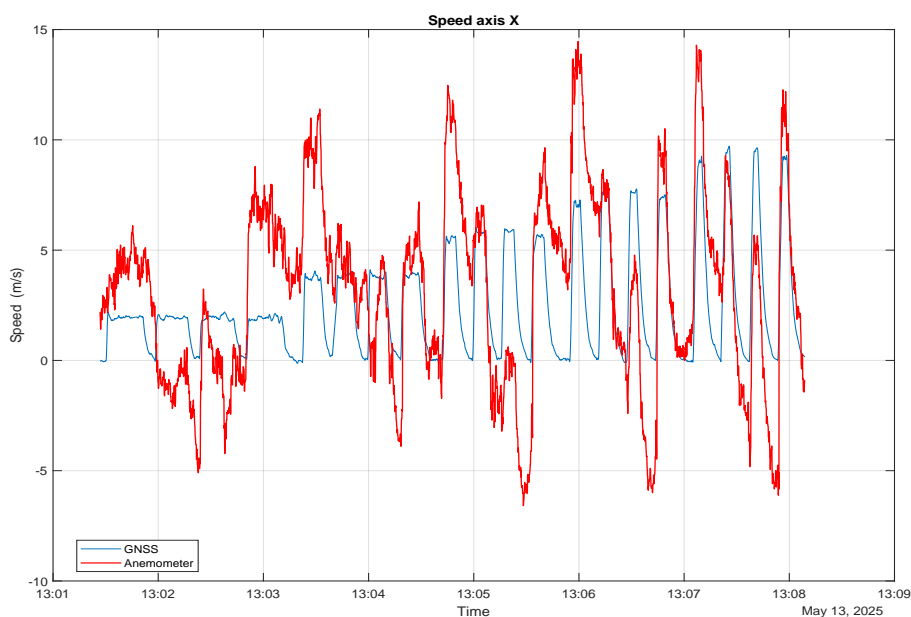
Za účelem porovnání vhodnosti jednotlivých typů anemometrů a mechanických úprav byl proveden shodný testovací let jako pro anemometr calypso MINI. Let byl tedy rozdělen do dvou částí: let ve tvaru čtverce a měření v tzv. hover pozici (viz. kapitola 3.1.1). Při letu panovaly mírně zhoršené povětrnostní podmínky oproti letu s anemometrem calypso MINI. Podle nejbližší meteorologické stanice (Brno Žabovřesky) se maximální nárazy větru pohybovaly do  $7 \text{ m/s}$  s průměrnou hodnotou  $3,5 \text{ m/s}$ . Směr větru se pohyboval v rozmezí od  $45^\circ$  do  $90^\circ$  (severovýchodní až východní).

#### Vyhodnocení dat

Datům z řídicí jednotky a anemometru byl sjednocen referenční rámec. I když je v současnosti možné získávat data z anemometru přímo prostřednictvím systému ROS2, tato možnost v době provedení letu ještě nebyla plně zprovozněna. Z tohoto důvodu měla data odlišný zdroj hodinového signálu — konkrétně data z anemometru mají čas z jednotky Intel NUC, zatímco data z GNSS využívala čas řídicí jednotky dronu. To je pravděpodobně důvodem, proč bylo nutné provést časovou korekci o  $0,75$  sekundy, což představuje zlepšení o  $2,67 \text{ s}$  oproti předchozímu způsobu záznamu dat, kde byl časový posun  $3,42$  sekundy.

#### Naměřená data

Vzhledem k velkému množství dat o změřeném úhlu, která činí graf zobrazující závislost absolutní rychlosti a úhlu v závislosti na čase nepřehledným (tento graf je uveden v příloze A.1.1), je zde zobrazen graf, který zobrazuje závislost rychlosti v ose X na čase.



Obr. 3.6: Rychlost v ose X v čase

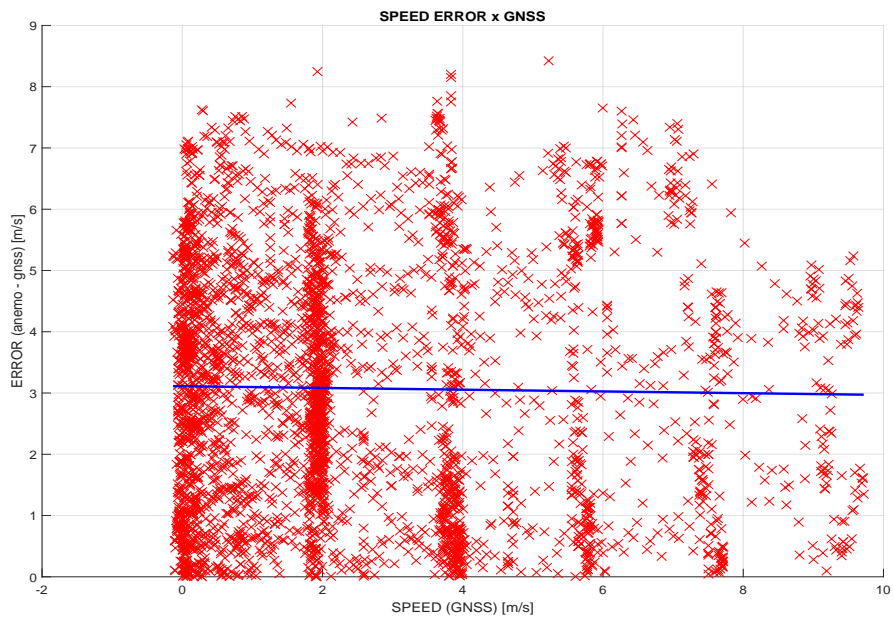
Z grafu 3.6 lze pozorovat obdobné jevy jako u předchozího typu anemometru. Lze zřetelně rozpoznat trajektorii letu. Je viditelný trend, že rychlost větru se přičítala především při letu první strany čtverce a odečítala při letu třetí strany. Dále lze pozorovat zhoršené povětrnostní podmínky, které způsobují, že anemometr vykazuje odchylky v měření rychlosti větru až o  $\pm 7$  m/s oproti hodnotám změřeným pomocí GNSS.

V grafu 3.7 vykreslující chyby v závislosti na letové rychlosti se pozitivně projeví vyšší vzorkovací frekvence anemometru, která umožnila lépe rozlišit jednotlivé rychlostní úseky. Závislost vykazuje podobný trend jako u předchozího anemometru, přičemž lineární proložení dat vede na přímkou se sklonem blízkým nule. To by potvrdilo tezi, že rostoucí rychlost nemá zásadní negativní vliv na přesnost měření.

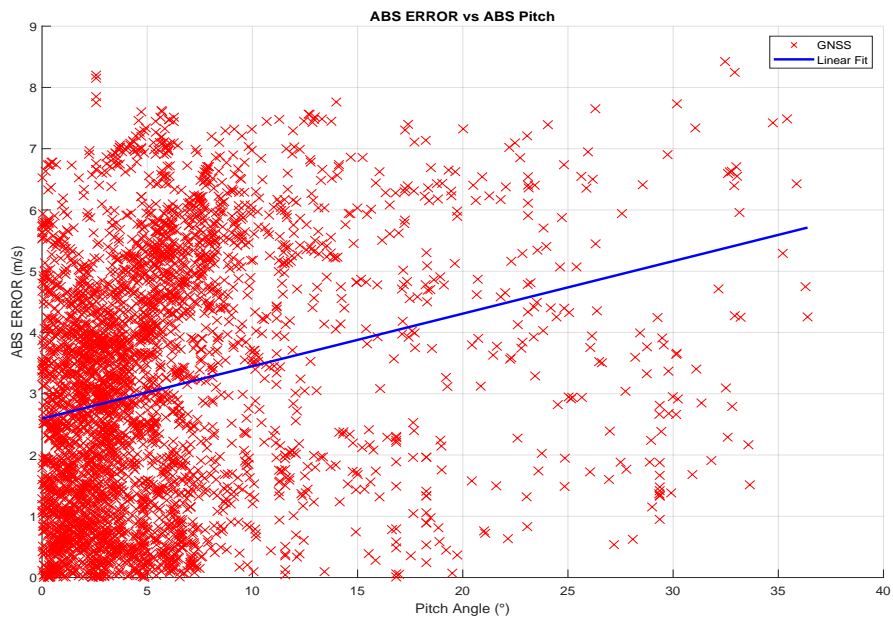
Otázkou však zůstává, zda to není způsobeno pouze rozdílným počtem změřených vzorků pro jednotlivé letové rychlosti. Za účelem ověření této hypotézy byla nalétána trajektorie 3.2.2 a 3.2.3.

Graf 3.8 vykreslující chyby v závislosti na absolutní hodnotě náklonu je patrná podobná závislost jako u předchozího typu anemometru – s rostoucím náklonem roste i chyba měření. Při zaměření se na pracovní oblast náklonu (přibližně  $\pm 8^\circ$ ) však docházíme k závěru, že i v tomto rozsahu chyba s rostoucím úhlem mírně narůstá. To může naznačovat, že vliv náklonu na měření není zcela zanedbatelný ani při běžném provozu. Otázkou zůstává, zda pozorovaný trend není spíše důsledkem

náhodných vnějších jevů, jako jsou poryvy větru nebo jiných nezachycených proměnných, které mohou ovlivnit výsledky měření více než samotná chyba anemometru.



Obr. 3.7: Chyba měření v závislosti na rychlosti

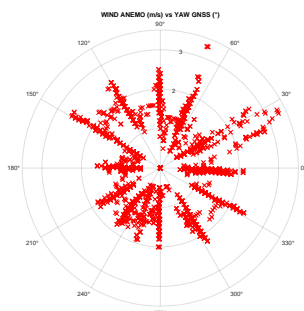


Obr. 3.8: Chyba měření v závislosti na náklonu dronu

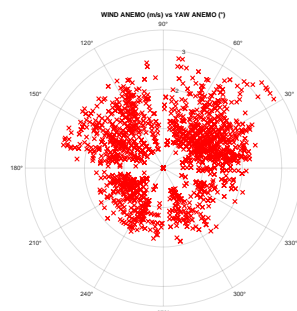
## Naměřená data - Hover pozice

Graf 3.9 znázorňující závislost rychlosti větru změřeného anemometrem na úhlu natočení dronu vypadá obdobně jako u předchozího anemometru, s výjimkou většího počtu vzorků.

Při zpracování dat z této letové trajektorie se u předchozího typu anemometru jako problematické jeví především výpadky měření v úhlech  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $180^\circ$ , které se objevily při vizualizaci závislosti rychlosti změřeného větru na směru detekovaném anemometrem. Na grafu 3.10 již tyto výpadky nejsou tolik výrazné, což podporuje hypotézu, že jejich příčinou mohlo být mechanické kmitání karbonové tyče, na níž byl senzor upevněn.



Obr. 3.9: Závislost větru změřeného anemometrem na úhlu natočení dronu



Obr. 3.10: Závislost rychlosti na směru větru změřený anemometrem

Přes zlepšení výsledků však stále není možné spolehlivě určit směr přicházejícího větru pro jednotlivé měřicí body. V úhlech  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $270^\circ$  se i nadále objevují drobné nepravidelnosti ve formě výpadků, což naopak naznačuje, že anemometr může vykazovat omezenou schopnost detekovat proudění v určitých směrových sektorech.

Zda se jedná o systematickou chybu danou konstrukcí senzoru, či o náhodný jev způsobený podmínkami konkrétního letu, bylo dále ověřováno při letu trajektorie 3.2.4.

### 3.2.2 Letová trajektorie číslo 2

Cílem této trajektorie bylo potvrdit nebo vyvrátit tezi, že rychlost nemá zásadní vliv na přesnost měření anemometru. Čtvercová trajektorie byla upravena tak, aby doba letu po každé její straně zůstala konstantní bez ohledu na rychlost pohybu. Toho bylo dosaženo změnou délky stran čtverce podle aktuální rychlosti – čím vyšší rychlost, tím delší strana. Nejkratší strana čtverce měla délku 16 metrů při rychlosti 2 m/s. Při vyšších rychlostech se délky stran zvětšovaly následovně: pro 4 m/s byla délka 32 metrů, pro 6 m/s 48 metrů, pro 8 m/s 64 metrů a pro 10 m/s 80 metrů.

V každém rohu čtverce dron zastavil na 5 sekund, a po proletění čtverce následovala 10 s pauza. Podle údajů z nejbližší meteorologické stanice (Brno-Žabovřesky)

se maximální nárazy větru pohybovaly do 8 m/s s průměrnou hodnotou 3,5 m/s, přičemž směr větru byl v rozmezí od 270° do 330° (západní až severozápadní). Vzhledem k tomu, že naměřená data byla silně ovlivněna větrnými podmínkami, jsou grafy z tohoto letu k dispozici pouze v příloze A.2.2. Přesto i tato data vykazovala shodu s trendy uvedenými v následující části práce.

Dalším problémem, který nastal během letu, byla malá kapacita baterie, což vedlo k přerušení letu při poslední straně čtverce, kdy dron aktivoval nouzový režim "return to launch" a vrátil se na místo vzletu. Proto byly strany čtverce zkráceny úměrně tak, aby nejdelší strana dosahovala délky 70 metrů. Zároveň byly odstraněny pauzy mezi jednotlivými stranami čtverce a zkráceny pauzy po proletění celého čtverce. To způsobilo, že dron mezi jednotlivými stranami čtverce již nezastavil, ale pouze zpomalil.

Během letu takhle upravené trajektorie panovaly výrazně příznivější povětrnostní podmínky. Podle nejbližší meteorologické stanice (Brno Žabovřesky) se maximální nárazy větru pohybovaly do 4 m/s s průměrnou hodnotou 1,5 m/s. Směr větru se pohyboval v rozmezí od 270° do 360° (západní až severní). Tato trajektorie byla liténa celkem dvakrát - grafy z druhého letu je možno nalézt v příloze A.2.3

## Vyhodnocení dat

Data z řídicí jednotky a anemometru byla sjednocena do společného referenčního rámce. Data z tohoto letu byla získána prostřednictvím systému ROS2, konkrétně pomocí nástroje ros2 bag, který je součástí tohoto systému a který umožňuje nahrávat jednotlivé topiky. Pro tento účel byl využit topic /m10\_01/aircraft/odometry, který poskytuje odometrická data o pohybu dronu. Na tento topic jsou data publikována s frekvencí 50 Hz, což znamená, že jsou zaznamenávána každých 20 milisekund.

Ros2 bag zaznamenává data ve formátu .db3, což je formát SQLite3 databáze, který je optimalizován pro uchovávání topiků. Pro účely další analýzy byla tato data za pomoci python skriptu extrahována a převedena do formátu CSV. I přes to, že data již používají jednotný zdroj času, bylo třeba data z anemometru posunout o 0,32 s. Tento časový posun může být způsoben pomalejším výstupem dat z anemometru nebo latencí při softwarovém zpracování v rámci systému ROS2.

## Naměřená data

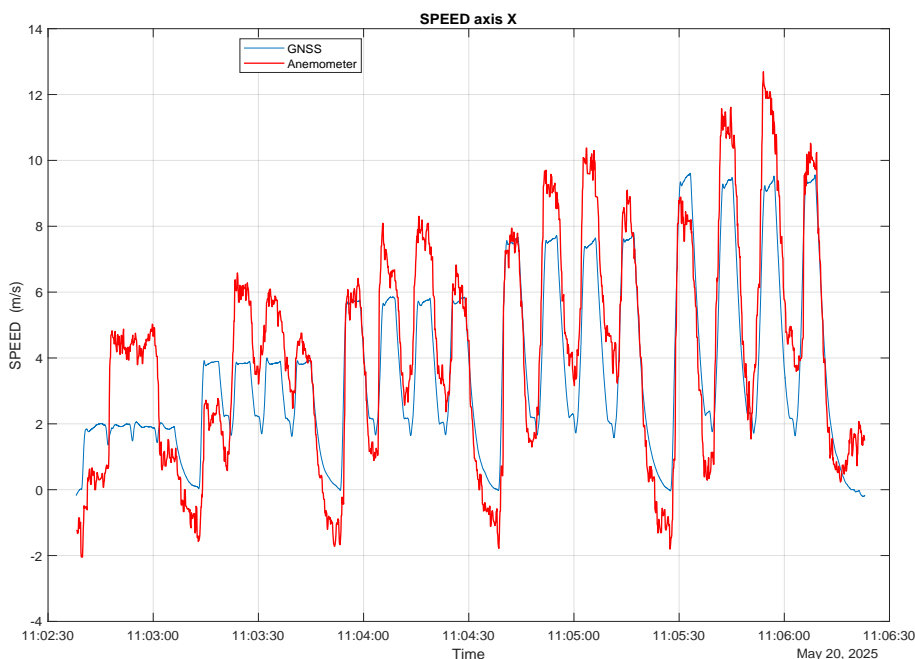
Stejně jako u předchozích typů grafů jsou data vykreslena pouze v ose X lokálního referenčního rámce (body frame). Z grafu je patrný obdobný trend jako u předchozího letu, a to zejména v tom, že data z anemometru poměrně dobře korespondují s rychlostí změřenou pomocí systému GNSS, pokud je zohledněna složka rychlosti

větru v dané ose. Za povšimnutí stojí fakt, že dron při průletu rohem čtverce dosahoval rychlosti přibližně 2 m/s.

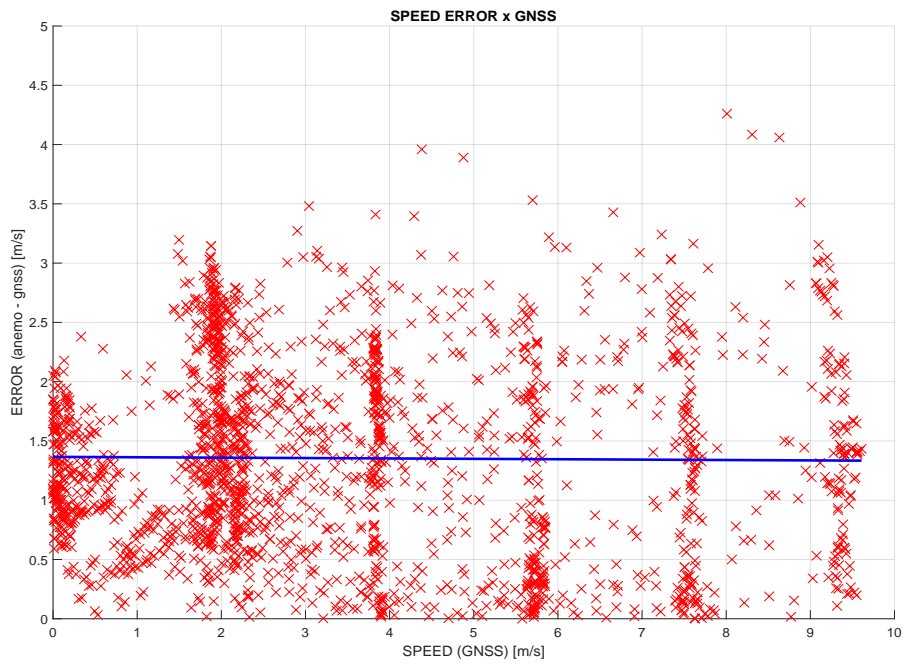
Při detailní analýze všech čtyř stran čtvercové letové trajektorie lze dojít k závěru, že anemometr má tendenci mírně nadhodnocovat skutečnou rychlost proudění, přibližně o 0,4 m/s. Tento jev je patrný za předpokladu, že vítr zůstává během letu celého čtverce konstantní, a může být způsoben zejména vířivými proudy generovanými rotory dronu. Vzhledem k absenci referenčního anemometru však nelze přesný důvod tohoto nadhodnocení jednoznačně určit.

Při znázornění závislosti chyby na rychlosti lze konstatovat, že rychlost ani v tomto případě nemá zásadní vliv na přesnost anemometru, což dokládá téměř vodorovný průběh přímky lineárního proložení v grafu 3.12.

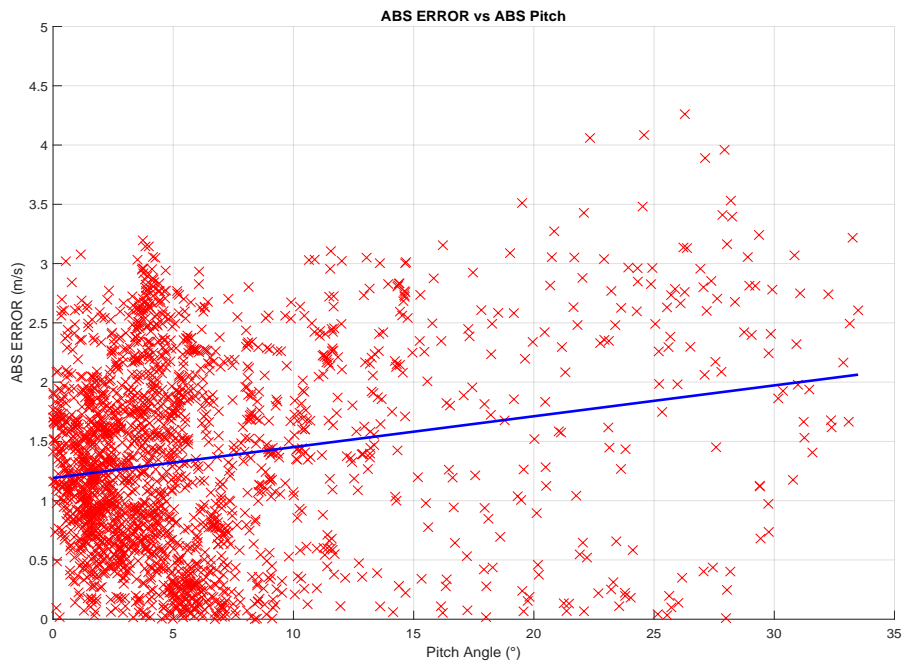
Graf 3.13 ilustruje, že chyba měření roste s narůstajícím náklonem dronu, podobně jako u předchozího měření. V pracovním rozsahu však zůstává relativně konstantní. Ovšem vzhledem k problému s nekonzistentním počtem dat a velkou citlivostí na časový posun mezi daty u tohoto typu vyhodnocení nejde z naměřených výsledků udělat jednoznačné závěry.



Obr. 3.11: Rychlost v ose X v čase



Obr. 3.12: Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu



Obr. 3.13: Chyba měření v závislosti na náklonu dronu

### 3.2.3 Letová trajektorie číslo 3

Trajektorie letu byla změněna z čtvercového tvaru na přímé úsečky. Tento přístup zajišťuje menší časovou vzdálenost mezi okamžikem, kdy se vítr přičítá k rychlosti letu, a kdy se od ní odečítá. Tím se snižuje riziko změny směru nebo rychlosti větru během záznamu jednoho datasetu. Rozložení rychlosti zůstalo zachováno, byla tedy nastavena na 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s a 10 m/s. Délka každé úsečky byla zvolena tak, aby doba letu zůstala ve všech případech konstantní. Pro rychlost 2 m/s byla stanovena délka úsečky na 22 metrů, přičemž délky úseček pro vyšší rychlosti byly upraveny úměrně.

Během letu byl zároveň udržován konstantní úhel natočení (YAW) vůči severu, který byl nastaven na  $107^\circ$ . Tento úhel zajistil, že se dron nejprve pohyboval vpřed a po uletění dané vzdálenosti se začal pohybovat vzad, a to podél své podélné osy (osy X v body frame). Mezi jednotlivými rychlostmi byla nastavena 5 s pauza. Po dokončení jedné trajektorie byl dron otočen o  $90^\circ$  a následně byla celá trajektorie zopakována ve směru druhé osy (osa Y v body frame). Grafy z letu osy Y jsou k dispozici v příloze A.2.4.

Během letu panovaly příznivé povětrnostní podmínky. Podle nejbližší meteorologické stanice (Brno Žabovřesky) se maximální nárazy větru pohybovaly do 4 m/s s průměrnou hodnotou 1,5 m/s. Směr větru se pohyboval v rozmezí od  $270^\circ$  do  $360^\circ$  (západní až severní). Data z řídicí jednotky a anemometru byla opět sloučena do společného referenčního rámce. Záznam byl proveden pomocí nástroje ros2 bag, přičemž pro zajištění časové synchronizace bylo nutné posunout data z anemometru o 0,2 sekundy.

#### Naměřená data

Během letu této trajektorie panovaly zřejmě nejpříznivější povětrnostní podmínky ze všech provedených měření, což se pozitivně projevilo i při porovnání hodnot ground speed (měřená GNSS) a air speed (měřená anemometrem). Z grafu 3.14 je patrné, že rychlost zaznamenaná anemometrem velmi dobře koresponduje s rychlostí určenou z GNSS. Po zohlednění větrné složky (offset způsobený větrem) lze dojít ke stejnému závěru jako u trajektorií ve tvaru čtverce – anemometr nadhodnocuje rychlost přibližně o 0,4 m/s.

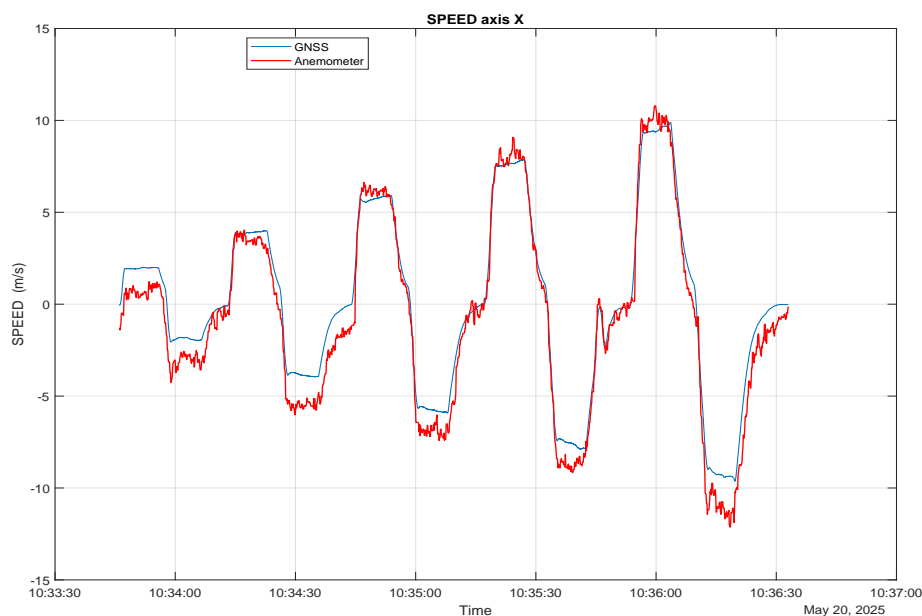
Graf 3.15 zobrazuje hodnotu chyby vynesenu v závislosti na rychlosti. U tohoto grafu má přímka, která byla použita k aproximaci dat, sklon téměř nula, což opět naznačuje, že rychlost nemá významný dopad na výslednou chybu.

V grafu 3.16, který znázorňuje hodnotu chyby v závislosti na úhlu náklonu dronu, je patrné, že lineární proložení dat nevykazuje rostoucí trend s vyšším úhlem, ale

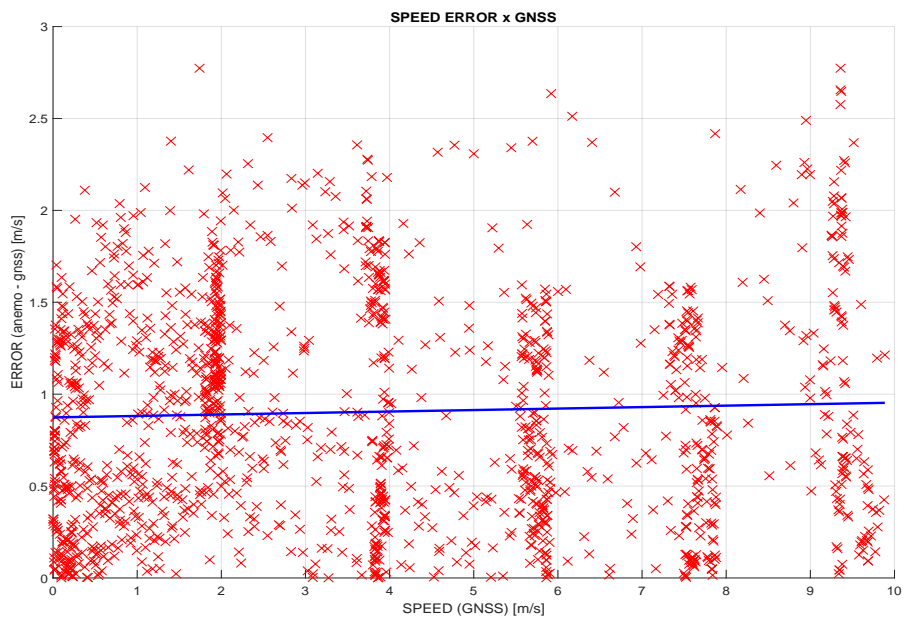
zůstává prakticky konstantní. Tato odchylka oproti závislosti pozorované při předchozích letech je pravděpodobně způsobena vnějšími vlivy ovlivňujícími měření. Vzhledem k problémům, které se při tomto typu vyhodnocení vyskytují, však nelze jednoznačně určit, která závislost odpovídá skutečnosti.

Podle předpokladu se anemometr v ose Y chová obdobně jako v ose X, což potvrzují grafy uvedené v příloze A.2.4. Během měření ve směru druhé osy však došlo k mírnému zesílení větru, což vedlo k celkovému posunutí rychlostí změřených anemometrem směrem dolů a ke zvýšení absolutní chyby měření. Nicméně i zde se potvrzuje, že chyba s rostoucí rychlostí nestoupá.

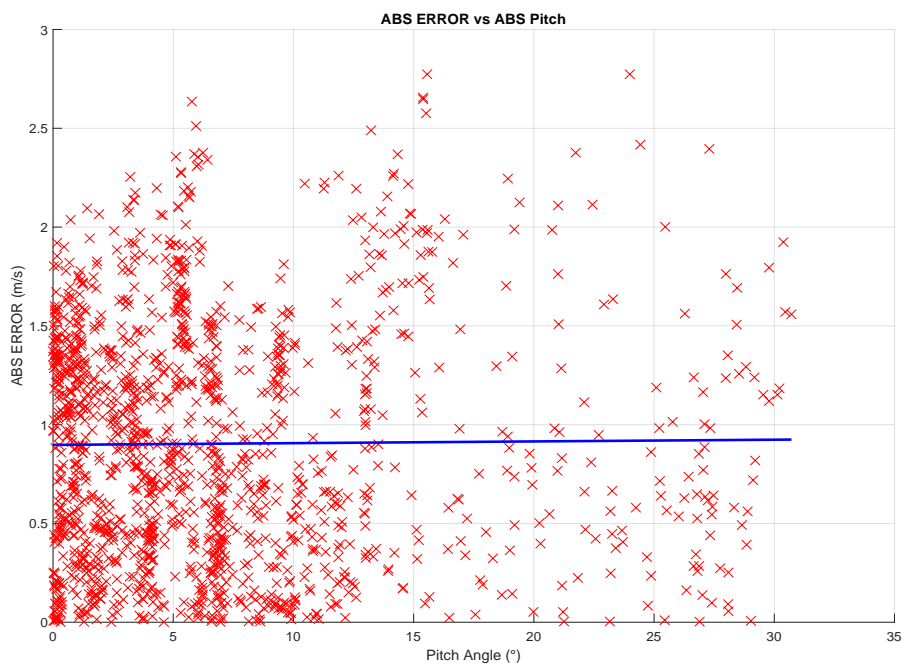
V příloze A.2.5 jsou rovněž uvedeny grafy z letu provedeného za zhoršených povětrnostních podmínek – s maximálními nárazy větru až 9 m/s a průměrnou rychlostí přibližně 3,5 m/s. Grafy z tohoto letu v zásadě potvrzují závislosti popsané v této kapitole.



Obr. 3.14: Rychlost v ose X v čase



Obr. 3.15: Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu



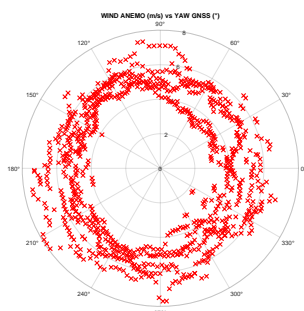
Obr. 3.16: Chyba měření v závislosti na náklonu dronu

### 3.2.4 Letová trajektorie číslo 4

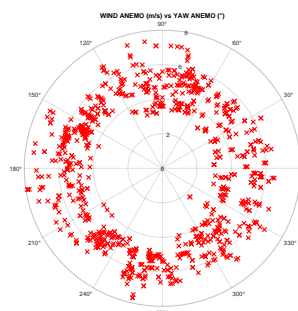
Tato trajektorie měla za úkol ověřit, zda při otáčení dronu kolem osy Z nevzniknou v určitých místech měření "díry". Proto bylo dronem otáčeno konstantní úhlovou rychlostí 20 °/s. Tím by měl být graf wind anemo vs yaw anemo rovnoměrně pokrytý a pokud by anemometr z nějakého směru neměřil dobře, měla by se tam projevit "díra". Podle údajů z nejbližší meteorologické stanice (Brno-Žabovřesky) se maximální nárazy větru pohybovaly do 10 m/s s průměrnou hodnotou 4 m/s, přičemž směr větru byl v rozmezí od 270° do 330° (západní až severozápadní).

#### Naměřená data

Na grafu 3.17 je znázorněn průběh, který by bylo možné očekávat při zcela neměnném směru větru. Naproti tomu graf 3.18 zobrazuje skutečně naměřené hodnoty směru přicházejícího větru. V tomto případě je patrná kruhová struktura s vyšší koncentrací bodů v určitých směrech, což může naznačovat systematické zkreslení měření při specifickém natočení anemometru vůči směru větru. Jednou z možných příčin tohoto jevu je vznik turbulentního proudění v okolí vrtulí dronu a konstrukce držáku anemometru, které může ovlivňovat jak směr, tak intenzitu proudění vzduchu. Další pravděpodobnou příčinou je časová proměnlivost větru, případně snížená schopnost anemometru měřit směr větru v určitých směrech.

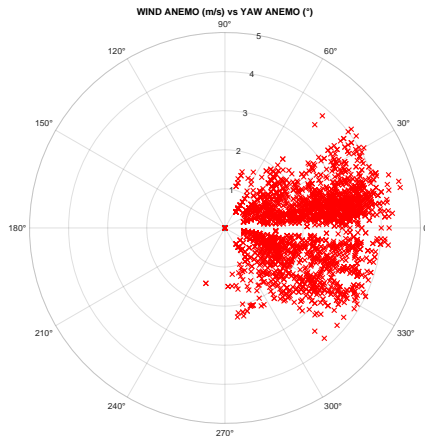


Obr. 3.17: Závislost větru změřeného anemometrem na úhlu natočení dronu



Obr. 3.18: Závislost rychlosti na směru větru změřený anemometrem

Na možnou sníženou schopnost anemometru měřit směr větru v určitých orientacích poukazuje také samostatné měření, při kterém byl dron po dobu pěti minut v klidové poloze na zemi a pouze zaznamenával přicházející vítr. Na výsledném grafu 3.19 je zřetelně patrná oblast bez naměřených hodnot v okolí směru 0°.



Obr. 3.19: Závislost rychlosti na směru větru změřeném anemometrem v statické pozici

### 3.3 Směr budoucího výzkumu

#### 3.3.1 Možnosti budoucího zpracování dat pro estimaci rychlosti

Pro využití anemometru k odhadu rychlosti dronu vůči zemi je nutné vyřešit zásadní problém – anemometr měří tzv. airspeed, tedy rychlost dronu vůči okolnímu vzduchu. Pro většinu letových aplikací, jako je navigace nebo autonomní řízení, je však klíčové znát zejména groundspeed, tedy skutečnou rychlost pohybu vůči zemi. Airspeed tuto informaci sama o sobě neobsahuje, a proto je nezbytné ji vhodným způsobem odhadovat. Tento odhad by mohl být realizován například pomocí algoritmu založeného na Kalmanově filtru nebo neuronové síti, která by kombinovala různá dostupná data – zejména měřené airspeed z anemometru, informace o orientaci a zrychlení z IMU, otáčky motorů a případně další sensorická data běžně dostupná na palubě dronu.

Algoritmus by v reálném čase zpracovával tato data a na základě znalosti aerodynamického modelu dronu by odhadoval rychlost a směr okolního větru. Po převodu všech veličin do společného (globálního) souřadného systému by následně provedl vektorový součet odhadovaného větru a měřené airspeed. Výsledkem by byl odhad groundspeed, tedy rychlosti dronu vůči zemi.

Je však důležité zdůraznit, že výše uvedený princip představuje zjednodušený model a nebere v úvahu celou řadu problémů. Mezi hlavní problémy patří nepřesnosti v aerodynamickém modelu dronu a šum ve vstupních datech ze sensorů, které se promítají do přesnosti odhadu větru a následně i výsledné groundspeed. Lze proto očekávat, že přesnost tohoto řešení bude nižší než u běžně používané kombinace dat

z GNSS a IMU. Přesto by se tento způsob mohl uplatnit zejména v prostředích bez dostupného GNSS signálu.

### 3.3.2 Nevyřešené problémy

Jedním z dosud nevyřešených problémů zůstává nejistota ohledně chování anemometru při vyšších úhlech náklonu dronu během letu. Ačkoli byla během experimentů pozorována tendence ke zvyšování chyby s rostoucím úhlem náklonu, vzhledem k výše zmíněným omezením není možné tuto závislost kvantitativně vyhodnotit. Pro potvrzení této hypotézy by bylo vhodné provést řízené experimentální měření v aerodynamickém tunelu, které by umožnilo přesně určit vztah mezi úhlem náklonu a chybou měření. Pokud by se ukázalo, že tato chyba je statisticky významná – jak naznačují provedené lety – bylo by vhodné její vliv zohlednit u vývoje algoritmu převádějícího airspeed na groundspeed.

Další tezí, která by si zasloužila hlubší analýzu, je snížená schopnost anemometru spolehlivě určovat směr proudění vzduchu zejména při některých směrech proudění. Tuto tezi se v této práci nepodařilo plně ověřit, ale její potvrzení nebo vyvrácení by mohlo mít zásadní dopad na spolehlivost systémů využívajících anemometr pro odhad vektoru rychlosti. I v tomto případě by testování v aerodynamickém tunelu umožnilo přesné zmapování těchto omezení.

Dalším problémem, se kterým se tato práce potýkala, byla absence přesné znalosti skutečného směru a rychlosti proudícího větru během letových testů. Tato neznalost zásadně omezuje možnosti ověření správnosti měření z anemometru umístěném na dronu, protože bez znalosti přesných větrných podmínek nelze objektivně posoudit jeho přesnost. V rámci budoucího výzkumu by proto bylo vhodné doplnit experimentální měření o referenční stacionární anemometr umístěný v blízkosti letového prostoru. Díky tomu by bylo možné alespoň částečně eliminovat vliv větru a výsledky z testovacích letů by byly o něco více vypovídající.

# Závěr

Cílem této práce bylo posoudit vhodnost dat z ultrazvukového anemometru pro estimaci rychlosti dronu.

V první části byl vysvětlen princip ultrazvukového anemometru a byl vytvořen přehled aktuálně používaných senzorů pro měření rychlosti bezpilotních prostředků.

Ve druhé části se práce zaměřuje na implementaci umístění anemometru na dronu. V rámci experimentu byly odzkoušeny dva typy anemometru - Calypso MINI a Calypso ULP, rozdíl mezi jednotlivými modely je především váha, vzorkovací frekvence a způsob komunikace.

Bylo rozhodnuto umístit anemometr 55 cm nad rotory do středu dronu. Uchycení anemometru bylo pevně spojeno s dronem pomocí plastových držáků vytisknutých na 3D tiskárně. Záznam dat probíhal v závislosti na použitém typu anemometru. U modelu Calypso MINI byla k přenosu dat využita technologie Bluetooth a data byla zaznamenávána prostřednictvím mobilního telefonu. U modelu Calypso ULP byl použit sériový protokol UART a data byla zaznamenávána pomocí kompaktního počítače Intel NUC se systémem ROS2.

Další část pojednává o testovacích letech. Ze změřených dat byla zjištěna nevhodnost anemometru MINI pro měření rychlosti, zejména kvůli jeho nízké vzorkovací frekvenci - pouze 1 Hz.

Proto se práce zaměřila především na anemometr Calypso ULP s vzorkovací frekvencí 10 Hz. U tohoto anemometru se podařilo prokázat potenciál pro měření rychlosti dronu. V kapitole 3.2 jsou podrobně rozebrány jednotlivé letové trajektorie, které byly během experimentu provedeny. Z těchto letů lze pozorovat, že data změřená anemometrem poměrně dobře korespondují s referenčními GNSS daty po započtení rychlosti větru. To naznačuje značný potenciál tohoto typu měření pro odhad rychlosti, jak je rozebráno v kapitole 3.3.1.

Dalším zjištěním této práce je, že velikost chyby měření anemometru nevykazuje v analyzovaném rozsahu rychlostí (do 10 m/s) jednoznačnou závislost mezi chybou anemometru a rychlostí pohybu dronu. V rámci práce byla rovněž zkoumána možná souvislost mezi chybou měření a úhlem náklonu dronu. Na základě dostupných dat lze pozorovat trend, kdy se s rostoucím úhlem náklonu zvyšuje i velikost chyby. Vzhledem k omezenému množství měřených dat při vyšších úhlech náklonu a absenci možností, jak tyto data získat, však nebylo možné tuto hypotézu jednoznačně potvrdit ani vyvrátit.

V elektronické příloze práce je k dispozici ROS2 node určený pro zpracování dat z anemometru a jejich publikování na příslušný topic. Součástí přílohy jsou rovněž letové trajektorie, datasety z provedených letů a MATLAB skripty, které sloužily k následné analýze a zpracování dat.

# Literatura

- [1] FERNANDES, D. – GOMES, L. – COSTA, A. *Wind speed and direction measurement based on time of flight ultrasonic anemometer*. In 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 1417–1422. Edinburgh, UK: IEEE, 2017. doi:10.1109/ISIE.2017.8001453.
- [2] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Anemometer* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2024. URL: <<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Anemometer&oldid=1261888814>>. [Online; Accessed: 2024-18-12].
- [3] BASAWANAL, A. *Development and Qualification of a Drone-Based Anemometry Platform for Air Risk Assessment in Urban Environments*. Dizertační práce, Carleton University, 2024. URL: <<https://repository.library.carleton.ca/files/vq27zp658>>.
- [4] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Satellite navigation* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2024. URL: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Satellite\\_navigation&oldid=1264497627](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Satellite_navigation&oldid=1264497627)>. [Online; Accessed: 2024-17-12].
- [5] STENLEY, M. *What is IMU on a Drone?* [[online]], 2025. URL: <<https://nexttools.net/what-is-imu-on-a-drone/>>. Accessed: 2024-15-12.
- [6] ČERVENKA, O. *Systém řízení letových charakteristik autonomního dronu*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií, 2016. URL: <[https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=158438](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=158438)>.
- [7] JOUAV. *Inertial Measurement Unit (IMU)*. [[online]], 2025. URL: <<https://www.jouav.com/blog/inertial-measurement-unit.html>>. Accessed: 2024-15-12.
- [8] GONG, Y. – LIU, X. *Flight state recognition for UAV optical flow velocity measurement*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2561(1):012025, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2561/1/012025. URL: <<https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2561/1/012025>>.
- [9] CHMIELEWSKI, P. – SIBILSKI, K. *Ground Speed Optical Estimator for Miniature UAV*. *Sensors*, 21(8), 2021. ISSN 1424-8220. URL: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2754>>.
- [10] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Pitot tube* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2024. URL: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pitot\\_tube&oldid=1247310257](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pitot_tube&oldid=1247310257)>. [Online; accessed 2024-16-12].

- [11] SUZUKI, S. *Integrated Navigation for Autonomous Drone in GPS and GPS-Denied Environments*. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 30:373–379, 2018. doi:10.20965/jrm.2018.p0373.
- [12] MALLMA VELIZ, A. C. *Development of sensor fusion algorithms for vehicle velocity estimation*. Independent thesis, advanced level (master’s degree), Umeå University, Faculty of Science and Technology, Department of Computing Science, 2024. URL: <<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-225457>>. Accessed from: 2024-26-12.
- [13] PX4. *Using the ECL EKF*. URL: <[https://docs.px4.io/main/en/advanced\\_config/tuning\\_the\\_ecl\\_ekf.html](https://docs.px4.io/main/en/advanced_config/tuning_the_ecl_ekf.html)>. Accessed: 2024-27-12.
- [14] VRBA, J. *Sledování trajektorie dronem*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta fakulta aplikovaných věd, 2023. URL: <[https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/55041/1/BP\\_VRBA\\_FINAL.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/55041/1/BP_VRBA_FINAL.pdf)>.
- [15] CHAPALA, S. R. – PIRATI, G. S. – NELAKUDITI, U. R. *Determination of coordinate transformations in UAVS*. In 2016 Second International Conference on Cognitive Computing and Information Processing (CCIP). 2016. doi:10.1109/CCIP.2016.7802861.
- [16] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Quaternions and spatial rotation — Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2024. URL: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quaternions\\_and\\_spatial\\_rotation](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quaternions_and_spatial_rotation)>. [Online; accessed 2024-23.12.].
- [17] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Polar coordinate system — Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2024. URL: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polar\\_coordinate\\_system](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polar_coordinate_system)>. [Online; accessed 4-January-2025].
- [18] HOLLENBECK, D. – OYAMA, M. – GARCIA, A. – CHEN, Y. *Pitch and Roll Effects of On-board Wind Measurements Using sUAS*. In 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 1249–1254. 2019. doi:10.1109/ICUAS.2019.8797707.
- [19] HOU, T. – XING, H. – GU, W. – LIANG, X. – LI, H. – ZHANG, H. *Wind Pressure Orthogonal Decomposition Anemometer: A Wind Measurement Device for Multi-Rotor UAVs*. *Drones*, 7(6), 2023. ISSN 2504-446X. doi:10.3390/drones7060366. URL: <<https://www.mdpi.com/2504-446X/7/6/366>>.
- [20] BUDIPRASOJO, A. – RUDIYANTO, B. – HARIONO, B. – SEETAWAN, T. *Problems and Integrating Procedure of Quadcopter with Anemometer for Collect*

*Wind Velocity Data*. E3S Web of Conferences, 190:00003, 2020. doi:10.1051/e3sconf/202019000003.

- [21] WEARMOUTH, C. *Flying Anemometers: Performance Assessment of a Miniaturized Sonic Anemometer for Measuring Wind from a Drone*. Master's thesis, University of Calgary, Calgary, Canada, 2022. URL: <<https://prism.ucalgary.ca>>. Master's thesis.
- [22] INSTRUMENTS, C. *Ultrasonic Portable Mini Wind Meter*, 2024. URL: <<https://calypsoinstruments.com/shop/product/ultrasonic-portable-mini-wind-meter-221>>. Accessed: 2024-28-12.
- [23] DJI. *Matrice 100*. [<https://www.dji.com/cz/support/product/matrice100>]. Accessed: 2025-01-04.

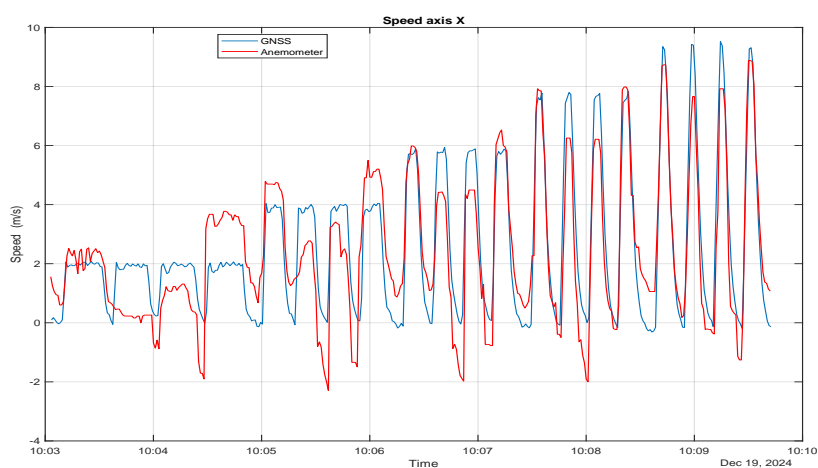
# Seznam příloh

<b>A</b>	<b>Změřená data</b>	<b>49</b>
A.1	CALYPSO MINI . . . . .	49
A.1.1	Trajektorie 1 - stejná velikost čtverců . . . . .	49
A.2	CALYPSO ULP . . . . .	49
A.2.1	Trajektorie 1 - stejná velikost čtverců . . . . .	49
A.2.2	Trajektorie 2A - různá velikost čtverců . . . . .	50
A.2.3	Trajektorie 2B - různá velikost čtverců . . . . .	51
A.2.4	Trajektorie 3A - úsečky osa Y . . . . .	53
A.2.5	Trajektorie 3B - úsečky osa X . . . . .	54
<b>B</b>	<b>Detail uchycení anemometru</b>	<b>56</b>
B.1	Calypso MINI . . . . .	56
B.2	Calypso ULP . . . . .	57
<b>C</b>	<b>Obsah elektronické přílohy</b>	<b>59</b>

# A Změřená data

## A.1 CALYPSO MINI

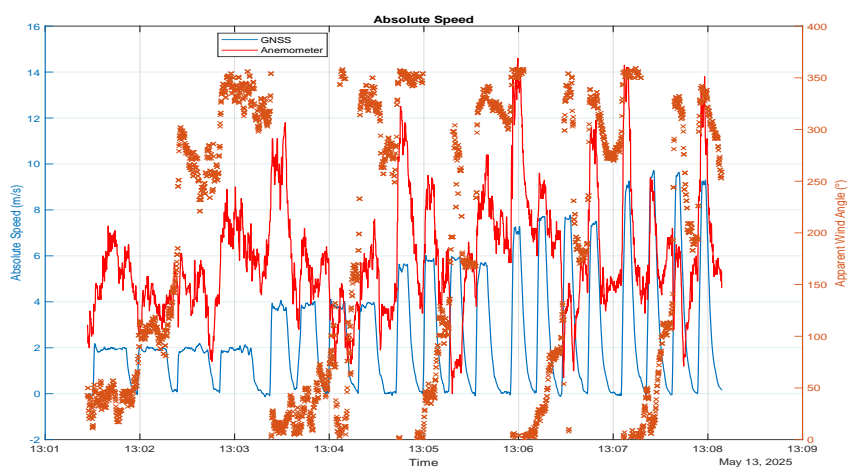
### A.1.1 Trajektorie 1 - stejná velikost čtverců



Obr. A.1: Rychlost v ose X v čase

## A.2 CALYPSO ULP

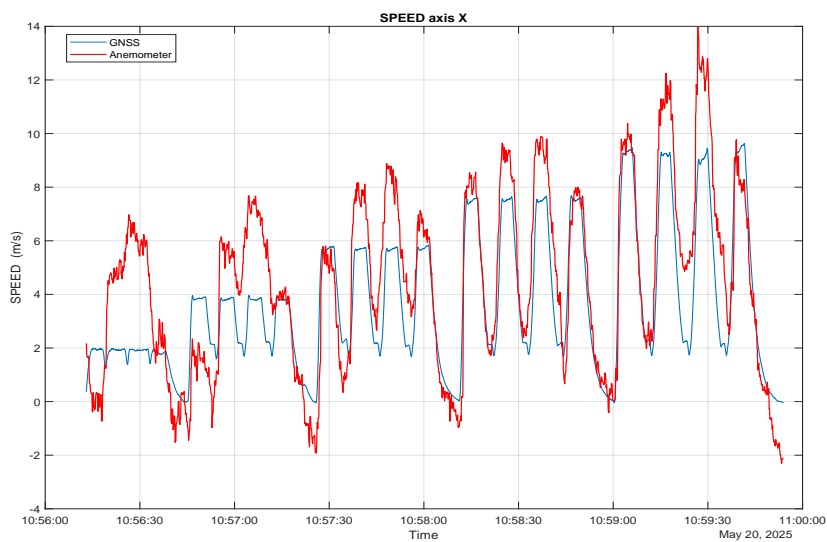
### A.2.1 Trajektorie 1 - stejná velikost čtverců



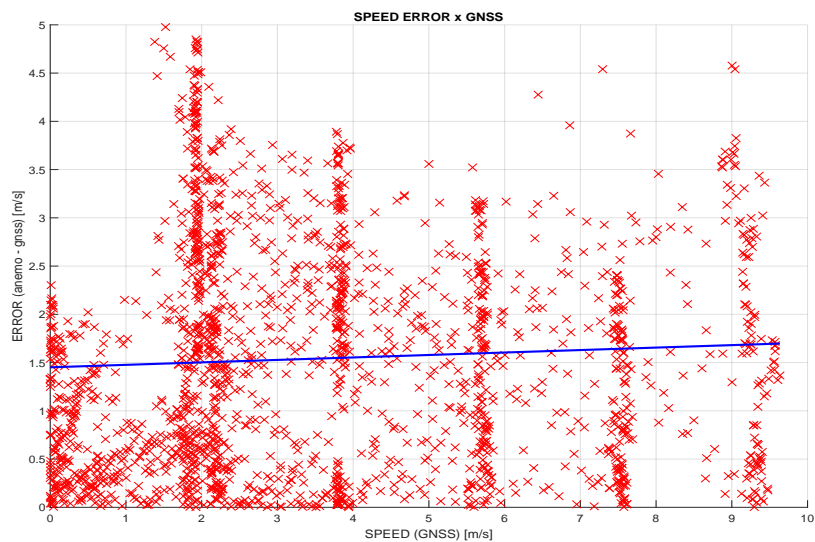
Obr. A.2: Absolutní rychlost v čase

## A.2.2 Trajektorie 2A - různá velikost čtverců

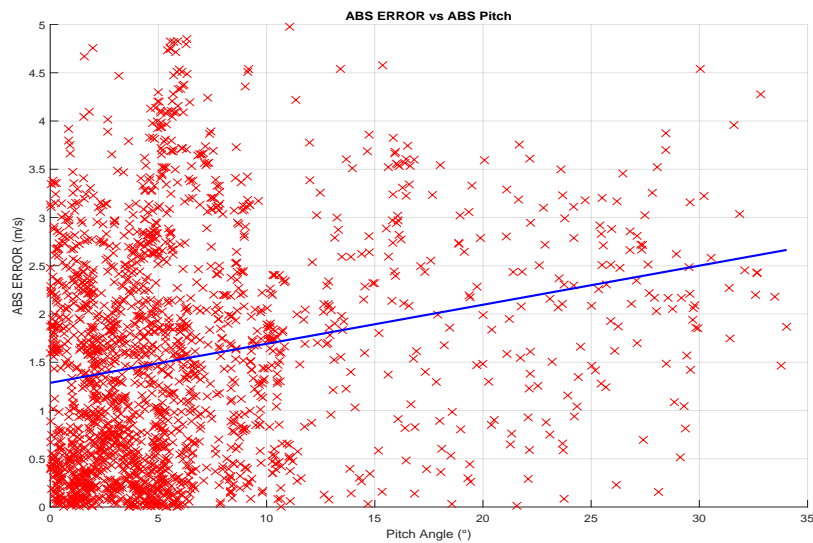
- Průměrná rychlost větru: 1,5 m/s
- Maximální náraz větru: 4 m/s.



Obr. A.3: Rychlost v ose X v čase



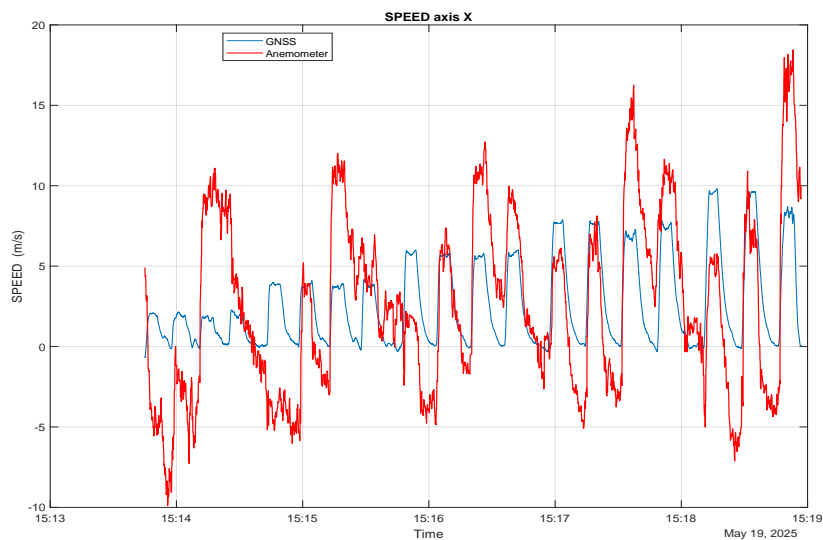
Obr. A.4: Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu



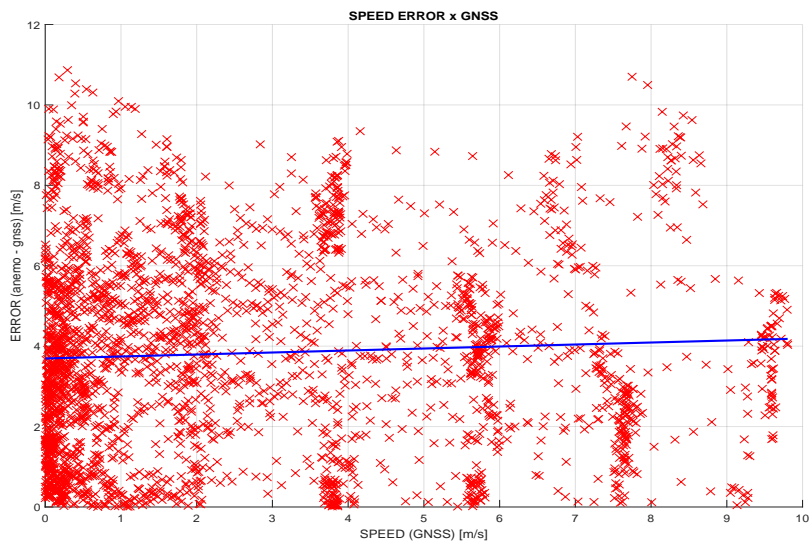
Obr. A.5: Chyba měření v závislosti na náklonu dronu

### A.2.3 Trajektorie 2B - různá velikost čtverců

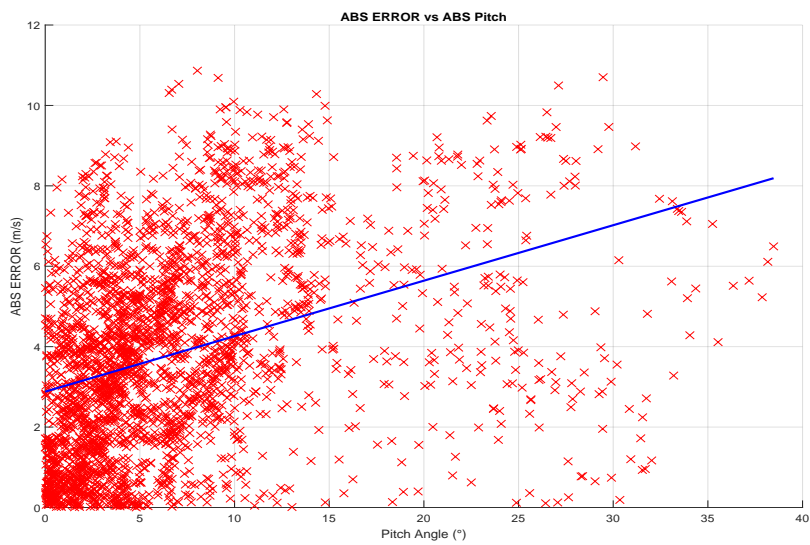
- Průměrná rychlost větru: 3.5 m/s
- Maximální náraz větru: 8 m/s.



Obr. A.6: Rychlost v ose X v čase



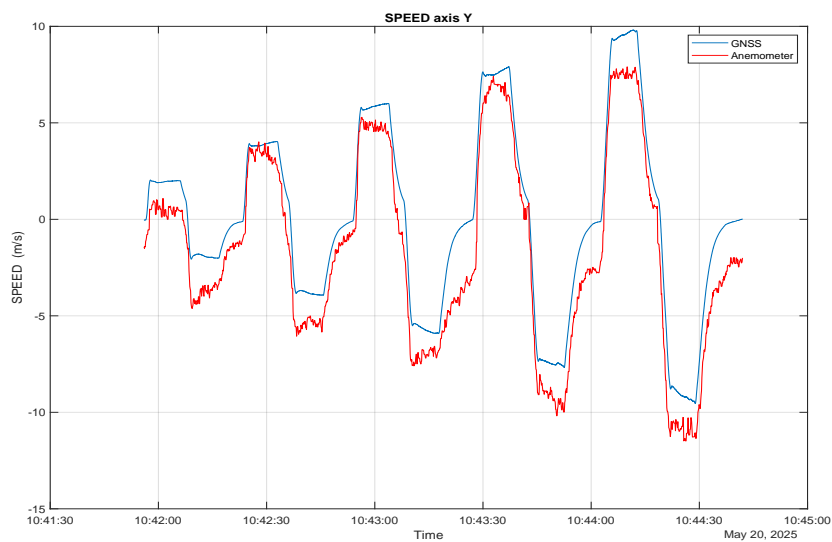
Obr. A.7: Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu



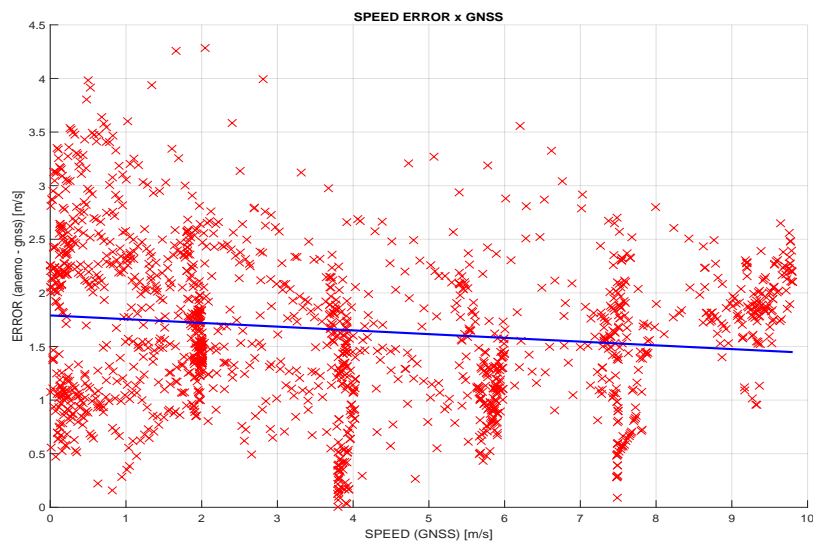
Obr. A.8: Chyba měření v závislosti na náklonu dronu

## A.2.4 Trajektorie 3A - úsečky osa Y

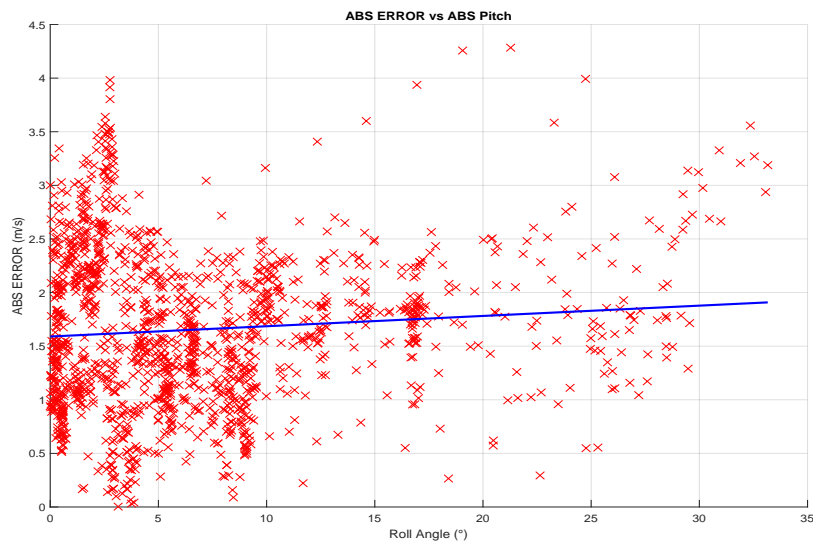
- Průměrná rychlost větru: 1.5 m/s
- Maximální náraz větru: 4 m/s.



Obr. A.9: Rychlost v ose Y v čase



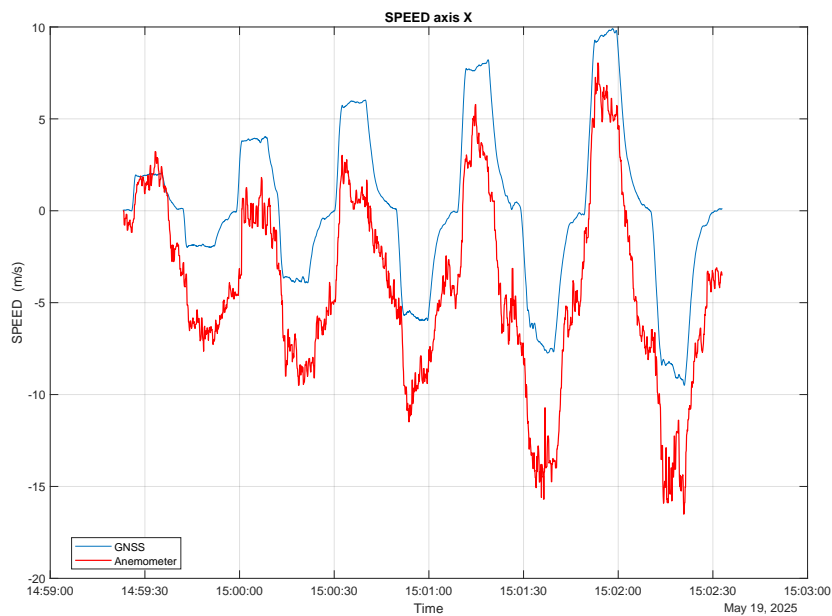
Obr. A.10: Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu



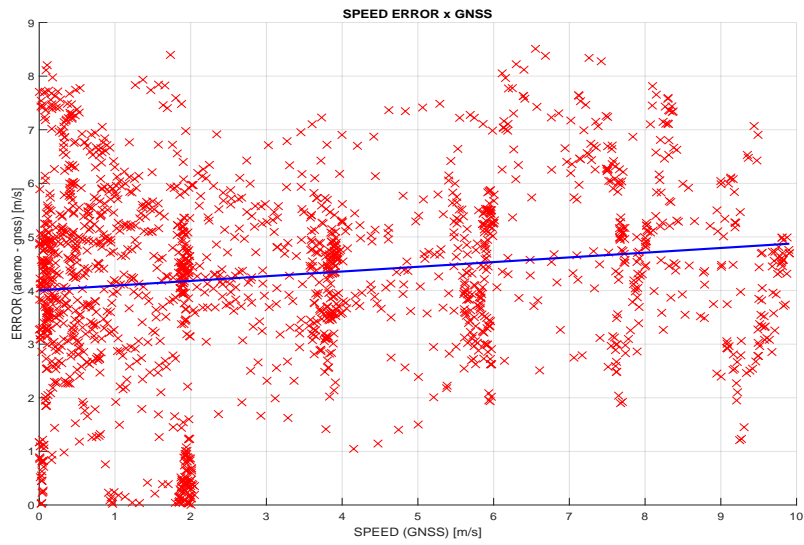
Obr. A.11: Chyba měření v závislosti na náklonu dronu

### A.2.5 Trajektorie 3B - úsečky osa X

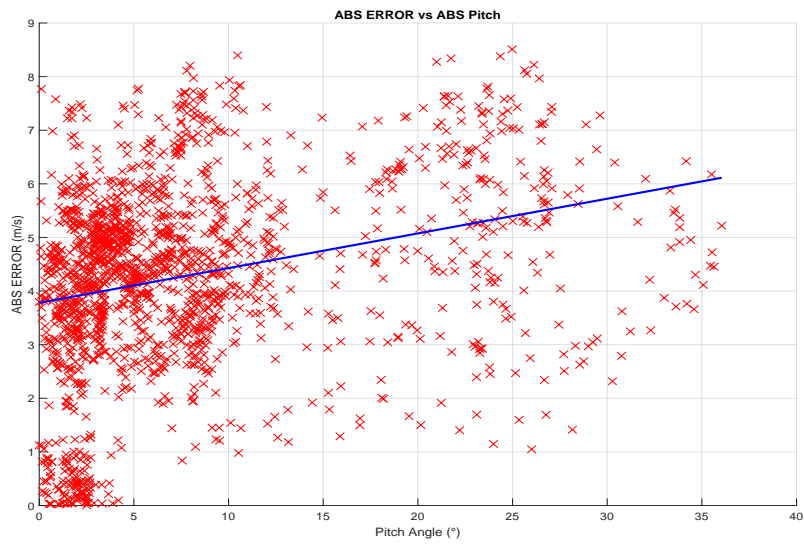
- Průměrná rychlost větru: 3,5 m/s
- Maximální náraz větru: 8 m/s.



Obr. A.12: Rychlost v ose X v čase



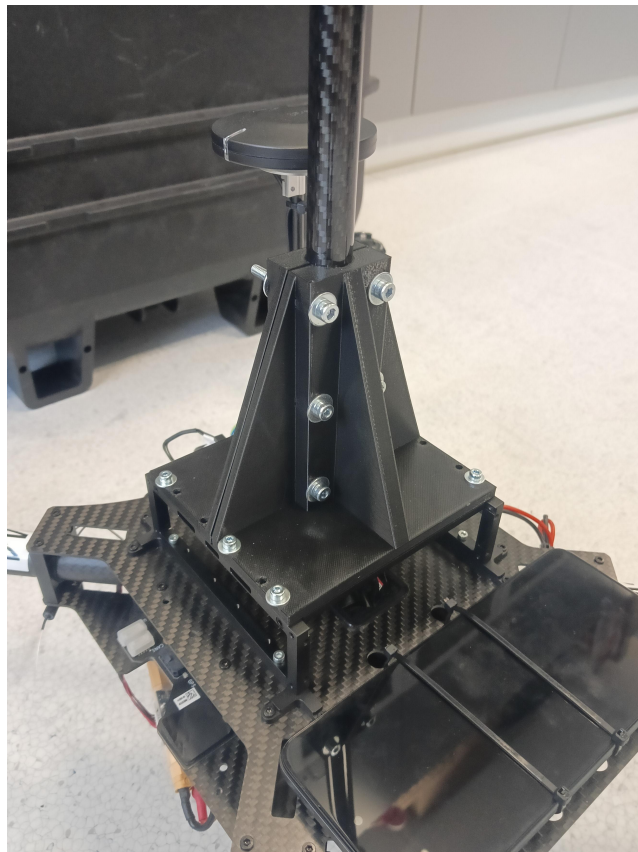
Obr. A.13: Chyba měření v závislosti na rychlosti dronu



Obr. A.14: Chyba měření v závislosti na náklonu dronu

## B Detail uchycení anemometru

### B.1 Calypso MINI



Obr. B.1: Detail uchycení karbonové tyče k dronu



Obr. B.2: Detail uchycení anemometru ke karbonové tyči

## B.2 Calypso ULP



Obr. B.3: Detail uchycení karbonové tyče k dronu



Obr. B.4: Detail uchycení anemometru ke karbonové tyči



Obr. B.5: Detail uchycení podpěr



Obr. B.6: Detail uchycení podpěr

## C Obsah elektronické přílohy

Elektronická příloha této práce obsahuje datasey získané během letových měření a související soubory, které slouží k vizualizaci a analýze těchto dat. Veškeré skripty a funkce byly vytvořeny v prostředí MATLAB verze R2023b.

Součástí přílohy je rovněž ROS 2 balíček „calypso\_ros\_driver“, který implementuje uzel (node) pro ROS 2. Tento balíček zajišťoval komunikaci mezi ultrazvukovým anemometrem a počítačem Intel NUC.

247340.....	Kořenový adresář
├── CALYPSO MINI.....	Kořenový adresář calypso MINI
│   ├── let_19_12_2024.....	Kořenový adresář
│   │   ├── anemo_log.....	Datasey z řídicí jednotky
│   │   ├── px4_log.....	Datasey z anemometru
│   │   ├── missions.....	Letová trajektorie
│   │   ├── weather.jpg.....	Počasí na stanici Brno-Žabovřesky
│   │   ├── processing.m.....	Matlab soubor pro zpracování dat
│   │   ├── find_best_aligment.m.....	Funkce pro hledání časového posunu dat
│   │   └── merge_and_interpolate.m.....	Funkce pro sjednocení frekvence dat
└── CALYPSO ULP.....	Kořenový adresář CALYPSO ULP
├── Let_13_05_2025.....	Dataset z letové trajektorie 1
│   ├── calypso_log.....	Datasey z anemometru
│   ├── px4_log.....	Datasey z řídicí jednotky
│   ├── missions.....	Letová trajektorie
│   ├── weather.jpeg.....	Počasí na stanici Brno-Žabovřesky
│   ├── processing_squares.m.....	Matlab soubor pro zpracování dat - čtverce
│   ├── processing_hover360.m.....	Matlab soubor pro zpracování dat - hover
│   ├── find_best_aligment.m.....	Funkce pro hledání časového posunu dat
│   └── merge_and_interpolate.m.....	Funkce pro sjednocení frekvence dat
├── Let_19_05_2025.....	Kořenový adresář
│   ├── calypso_log.....	Datasey z anemometru
│   ├── px4_log.....	Datasey z řídicí jednotky
│   ├── missions.....	Letová trajektorie
│   ├── rosbag.....	Dataset pořízený nástrojem rosbag
│   ├── weather.jpeg.....	Počasí na stanici Brno-Žabovřesky
│   ├── processing_squaresX.m.....	Matlab soubor pro zpracování dat - čtverce
│   ├── processing_linesX.m.....	Matlab soubor pro zpracování dat - úsečky
│   ├── processing_hover.m.....	Matlab soubor pro zpracování dat - hover
│   ├── find_best_aligment.m.....	Funkce pro hledání časového posunu dat
│   └── merge_and_interpolate.m.....	Funkce pro sjednocení frekvence dat
├── Let_20_05_2025.....	Kořenový adresář
│   ├── calypso_log.....	Datasey z anemometru
│   ├── px4_log.....	Datasey z řídicí jednotky
│   ├── missions.....	Letová trajektorie
│   ├── rosbag.....	Dataset pořízený nástrojem rosbag
└── weather.jpeg.....	Počasí na stanici Brno-Žabovřesky

```

├── processing_squaresX.m .....Matlab soubor pro zpracování dat - čtverce
├── processing_squares.m ....Matlab soubor pro zpracování dat - čtverce 2
├── processing_linesX.m .....Matlab soubor pro zpracování dat - úsečky
├── processing_linesY.m .....Matlab soubor pro zpracování dat - úsečky
├── find_best_aligment.m .....Funkce pro hledání časového posunu dat
├── merge_and_interpolate.m ..... Funkce pro sjednocení frekvence dat
├── calypso_ros_driver ..... Kořenový adresář
├── ├── calypso_ros_driver ..... ROS2 package pro příjem a dekódování dat
├── ├── calypso_ros_driver_msgs ..... ROS2 packages pro definici vlastních zpráv
├── ├── README.md .....Návod k použití
├── └── 247340.pdf ..... Text práce

```