



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

VÝŠKOVÁ STABILIZACE QUADROTORU

ALTITUDE CONTROL OF QUADROTOR UAV

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Hamáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Gábrlík

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Vojtěch Hamáček

ID: 159649

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Výšková stabilizace quadrotoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a implementovat dálkové řízení a stabilizaci výšky letu vlastního quadrotoru.

1. Navrhněte a realizujte dálkové řízení umožňující řídit rotační pohyby ve všech osách a celkový tah motorů.
2. Proveďte rešerši týkající se měření výšky letu a zvolte vhodné snímače.
3. Realizujte filtraci a fúzi dat ze snímačů tak, aby byla vhodná pro regulaci.
4. Vytvořte matematický model pro chování quadrotoru ve svislé ose.
5. Navrhněte regulátor letové výšky a implementujte jej.
6. Ověřte funkčnost stabilizace letové výšky dle pokynů vedoucího.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ŠOLC, František. Modelling and Control of a Quadcopter. Advances in Military Technology. 2010, 5(2), 29-38. ISSN 1802- 2308.
- [2] BOUABDALLAH, Samir. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. Lausanne, EPFL, 2007. Disertace. École polytechnique fédérale de Lausanne.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Petr Gábrlík

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

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 bakalářské práce je navrhnout a implementovat dálkové řízení a stabilizaci letové výšky vlastního quadrotoru. Práce se nejprve zabývá realizací dálkového řízení quadrotoru. Následně stručným shrnutím snímačů letové výšky a možných způsobů jejich vyhodnocení. Dále je uvedena praktická realizace vyhodnocení letové výšky a poté následuje stručné shrnutí možností stabilizace letové výšky a implementace reálného regulátoru s následným otestováním v reálných podmínkách. Závěr práce obsahuje shrnutí řešené problematiky a dosažené výsledky při reálném testování.

Klíčová slova

Quadrotor, řízení letu, barometr, akcelerometr, ultrazvuk, měření výšky, fúze snímačů, MATLAB, simulace, automatické řízení

Abstract

The aim of the bachelor thesis is to design and implement remote control and stabilization of altitude of own quadrotor. The work is first focused to realization of the quadrotor remote control. Subsequently, a brief summary of flight height sensors and possible ways to evaluate them. The practical implementation of the altitude evaluation is presented, followed by a brief summary of the possibilities of stabilization of the altitude and the implementation of the real controller, followed by real testing. The conclusion of the thesis contains a summary of the problem solved and the results achieved in real test.

Keywords

Quadrotor, flight control, barometer, accelerometer, ultrasound, altitude measurement, sensor fusion, MATLAB, simulation, automatic control

Bibliografická citace:

HAMÁČEK, V. *Výšková stabilizace quadrotoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Gábrlík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Výšková stabilizace quadrotoru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 21. května 2018

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Gábrlíkovi, za konzultace, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 21. května 2018

.....
podpis autora

Obsah

1	ÚVOD.....	12
2	MATEMATICKÝ POPIS QUADROTORU.....	13
2.1	Souřadné systémy	13
2.2	Rotační pohyb v ose X a Y	14
2.3	Rotační pohyb v ose Z	15
2.4	Lineární pohyb v ose X a Y	15
2.5	Lineární pohyb v ose Z	16
3	DÁLKOVÉ ŘÍZENÍ QUADROTORU.....	17
3.1	Hardwarová realizace	18
3.2	Softwarová realizace	19
4	SNÍMAČE VÝŠKY.....	21
4.1	Ultrazvukový snímač	21
4.2	Barometr	21
4.3	Akcelerometr	22
4.4	GNSS	23
4.4.1	GPS, GLONASS a další	23
4.4.2	EGNOS a Galileo.....	23
5	MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT.....	24
5.1	Základní digitální FIR a IIR filtry.....	24
5.1.1	FIR filtr	24
5.1.2	IIR filtr	25
5.2	Předzpracování a filtrace dat barometru	25
5.2.1	Nastavení interního průměrování barometru	27
5.2.2	Filtrace dat barometru	28
5.3	Předzpracování a filtrace dat ultrazvuku	31
5.4	Fúze akcelerometru a barometru.....	33
5.4.1	Fúze v oblasti zrychlení	35
5.4.2	Fúze v oblasti rychlosti	35
5.4.3	Fúze v oblasti výšky	36

5.5	Zpřesnění fúze snímačů pro výšku do 2 m	37
6	REGULACE	40
6.1	Teoretický úvod	40
6.1.1	Struktury regulátorů	40
6.1.2	ITAE kritérium	41
6.2	Návrh regulátoru rychlostní smyčky	42
6.3	Návrh regulátoru výškové smyčky	45
7	IMPLEMENTACE A TESTOVÁNÍ	46
7.1	Implementace do quadrotoru	46
7.2	Testování	47
8	ZÁVĚR	49

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Sestavená kvadrokoptéra.....	12
Obrázek 2.1: Fyzikální model quadrotoru. Zdroj: [3].....	13
Obrázek 3.1: Vysílač CADET 6 PRO s vyznačenými ovládacími prvky jednotlivých kanálů.....	17
Obrázek 3.2: Princip dekódování PPM signálu na PWM signál. Zdroj [6].....	18
Obrázek 3.3: Blokové schéma zapojení elektroniky kvadrokoptéry	19
Obrázek 3.4: Principiální znázornění vývojového diagramu dekódování RC přijímače	20
Obrázek 5.1: DPS opatřená houbičkou okolo barometru LPS25H	26
Obrázek 5.2: Quadrotor s krytem zamezujícím ovlivňování barometru turbulentním prouděním vzduchu z vrtulí	26
Obrázek 5.3: Srovnání vlivu počtu průměrovaných vzorků barometru na šum	28
Obrázek 5.4: Srovnání signálu šumu z barometru po průchodu filtry.....	29
Obrázek 5.5: Histogram hustoty pravděpodobnosti V_i výskytu hodnoty výšky h_i v šumu barometru	30
Obrázek 5.6: Filtrace signálu barometru (výškový skok 2 m v čase 83 až 109 s)....	31
Obrázek 5.7: Simulační schéma filtrace barometru pro následnou fúzi dat	31
Obrázek 5.8: Filtrace skoků a přeslechů ultrazvukového snímače	32
Obrázek 5.9: Kompenzace driftu ultrazvukového snímače	33
Obrázek 5.10: Filtrace dat ultrazvuku.....	33
Obrázek 5.11: Schéma fúzního filtru akcelerometru a barometru	34
Obrázek 5.12: Fúzované zrychlení a rychlost (zrychlení z důvodu srovnání integrováno na rychlost)	36
Obrázek 5.13: Fúze akcelerometru a barometru v oblasti výšky.....	36
Obrázek 5.14: Srovnání výšky z barometru a výšky po fúzi s akcelerometrem.....	37
Obrázek 5.15: Simulační schéma připojující ultrazvuk k fúznímu filtru rychlosti a výšky	37
Obrázek 5.16: Zpřesnění fúzované rychlosti ultrazvukem	38
Obrázek 5.17: Zpřesnění fúzované výšky ultrazvukem.....	39

Obrázek 6.1: Schéma regulačního obvodu s pomocnou regulovanou veličinou. Zdroj [21].....	40
Obrázek 6.2: Hodnota ITAE kritéria. Zdroj [21].....	42
Obrázek 6.3: Simulační schéma ITAE kritéria	42
Obrázek 6.4: Simulační schéma regulační smyčky rychlosti s P regulátorem	43
Obrázek 6.5: Odezva rychlostní soustavy na jednotkový skok ($K_R = 7,65 [-]$)	44
Obrázek 6.6: Závislost ITAE kritéria na zesílení P regulátoru	44
Obrázek 6.7: Simulační schéma regulační smyčky výšky s PI regulátorem	45
Obrázek 6.8: Odezva výškové soustavy na skok ($K_R = 1.0 [-]$, $r_i = 0,3 [-]$)	45
Obrázek 7.1: Testovací konstrukce.....	47
Obrázek 7.2: Záznam regulace výšky při reálném letu quadrotoru	48

Seznam tabulek

Tabulka 5.1: srovnání testovaných filtrů barometru	30
Tabulka 7.1: výsledné nastavení koeficientů jednotlivých IIR a komplementárních filtrů	46
Tabulka 7.2: srovnání nastavení regulátorů ITAE kritériem a odladěných regulátorů během testování	46

1 ÚVOD

Quadrotor neboli kvadrokoptéra je čtyřvrtulové bezpilotní létající zařízení, anglicky Unmanned Aerial Vehicle (UAV). V současné době dochází k velké oblibě těchto zařízení jak mezi odborníky, tak i mezi širokou veřejností. Často nachází uplatnění při monitoringu větších území, mapování terénu, pátrání po osobách a také při natáčení filmů. Aktuálně se také několik různých doručovatelských firem snaží o jejich využití v oblasti autonomní letecké dopravy zboží k zákazníkům.

Samotná kvadrokoptéra je při letu velmi nestabilní a vyžaduje alespoň základní regulaci rotačních pohybů, která zajistí schopnost zařízení udržovat vodorovnou polohu se zemí a umožní obsluze řídit její náklony okolo jednotlivých os a tím vybudit pohyby do stran a řídit let. Nicméně, pokud chceme dosáhnout lepší letové ovladatelnosti, tak je zapotřebí zajistit samotnou stabilizaci lineárních pohybů.

Tato práce se zabývá realizací dálkového řízení a stabilizací lineárního pohybu v ose Z. Přesněji zvolením vhodných senzorů pro měření letové výšky a předzpracováním dat pro její stabilizaci. Následně se zaměřuje na využití získaných dat o výšce letu, se kterými pracuje navržený regulátor výšky. Během řešení se volně vychází z práce [12]. Projekt se také částečně zaměřuje na drobné mechanické úpravy nutné pro správné fungování barometru. Dále je kladen důraz především na bezpečnost při reálném testování a z toho důvodu byla postavena testovací konstrukce pro rychlé, bezpečné a snadné testování.

Práce je založena na kvadrokoptéře vlastního návrhu a realizace (viz obrázek 1.1), která má zprovozněnou regulaci rotačních pohybů (podrobněji [1]), ale chybí jí možnost dálkového řízení a výšková stabilizace. Kvadrokoptéra je založena na pohonném systému od společnosti DJI a je osazena deskou, která obsahuje napájecí obvody, senzory a mikrokontrolér, který zajišťuje její stabilizaci. Nad touto hlavní deskou se nachází minipočítač Raspberry Pi 2 model B, který prozatím slouží pouze k vyčítání diagnostických dat, která zasílá přes WiFi do počítače obsluhy.

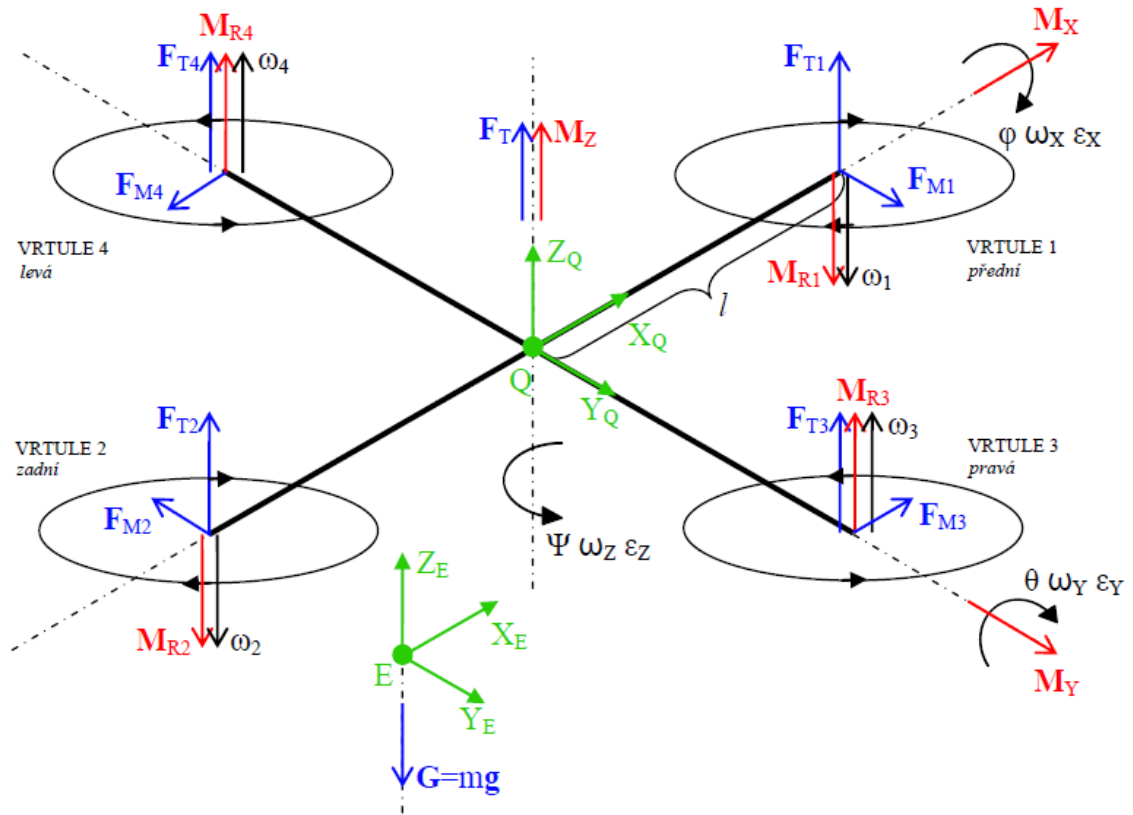


Obrázek 1.1: Sestavená kvadrokoptéra

2 MATEMATICKÝ POPIS QUADROTORU

Kapitola se věnuje základnímu matematickému popisu chování quadrotoru se šesti stupni volnosti. Tři pro lineární a tři pro rotační pohyby v osách X , Y a Z . Vzhledem k totožnému chování v ose X a Y , jsou tyto pohyby popsány ve společných podkapitolách, zatímco pro osu Z jsou z důvodu odlišností vyčleněny vlastní podkapitoly. Řízení libovolného pohybu stroje je docíleno změnou otáček, a tedy tahu jednotlivých motorů.

Obrázek 2.1 zobrazuje fyzikální model quadrotoru, kde souřadný systém Q je pevně spojen se středem zařízení a souřadný systém E je spojen se Zemí. Každý motor vyvíjí tahovou sílu F_T a reakční moment M_R působící v ose Z_Q . Naopak v ose Z_E se vyskytuje tíhové působení Země ve smyslu působení kolmo k zemi. [3]



Obrázek 2.1: Fyzikální model quadrotoru. Zdroj: [3]

2.1 Souřadné systémy

V případě různého natočení souřadných systémů Q a E vůči sobě je nutné nejprve přepočíst síly působící na zařízení do inerciálního souřadného systému Země E [12]. To je vhodné například pro odstranění vlivu gravitace, která se v závislosti na rotaci kopteru vůči zemi rozkládá do všech os souřadného systému Q . Vzhledem k tomu, že je akcelerometr pevně svázan se vtažným systémem zařízení, tak dochází ke snímání tohoto rozkladu tíhového zrychlení do všech os. S využitím matice rotace R (2.1) dojde k rotaci systému do vztažného systému Země, kde se gravitační působení projeví pouze v ose Z_E

a je možné jej snadno odečíst, to je výhodné především pro další zpracování. Obdobně se přepočte známý tah motorů v ose Z_Q , kdy pro určení lineárního pohybu vůči zemi je potřeba přepočítat tah do souřadného systému Země.

$$R = \begin{bmatrix} C_\Psi C_\theta & C_\Psi S_\theta S_\varphi - S_\Psi C_\varphi & C_\Psi S_\theta C_\varphi + S_\Psi S_\varphi \\ C_\Psi C_\theta & S_\Psi S_\theta S_\varphi + C_\Psi C_\varphi & S_\Psi S_\theta C_\varphi - C_\Psi S_\varphi \\ -S_\theta & C_\theta S_\varphi & C_\theta C_\varphi \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

S – funkce sinus

C – funkce cosinus

φ – náklon okolo osy X [$^\circ$]

θ – náklon okolo osy Y [$^\circ$]

Ψ – náklon okolo osy Z [$^\circ$]

2.2 Rotační pohyb v ose X a Y

Náklon do stran v osách X a Y je vytvářen změnou tahu motorů v ose kolmé na ovládanou osu (2.2) (2.3). Zároveň musí být zajištěno vykompenzování reakčních momentů dvojic motorů, aby se zabránilo nechtěné rotaci v ose Z (2.4). To lze prakticky zajistit zvýšením otáček jednoho motoru dané dvojice a úměrným snížením otáček druhého motoru. Tím je zajištěno natočení okolo požadované osy a zároveň je splněna podmínka (2.4). Výsledné zrychlení, rychlost a polohu pro danou osu lze poté vypočíst podle rovnic (2.5) a (2.6).

$$M_X = (-F_{T3} + F_{T4}) \cdot l \quad (2.2)$$

$$M_Y = (-F_{T1} + F_{T3}) \cdot l \quad (2.3)$$

M_X, M_Y – moment síly v ose X a Y [Nm]

F_{T1} až F_{T4} – tah jednotlivých motorů [N]

l – délka ramene s motorem [m]

$$M_{R3} + M_{R4} - M_{R1} - M_{R2} = 0 \quad (2.4)$$

$M_{R1}, M_{R2}, M_{R3}, M_{R4}$ – reakční momenty motorů [Nm]

$$\frac{M_X}{J_X} = \varepsilon_X = \frac{d\omega_X}{dt} = \frac{d^2\varphi}{d^2t} \quad (2.5)$$

$$\frac{M_Y}{J_Y} = \varepsilon_Y = \frac{d\omega_Y}{dt} = \frac{d^2\theta}{d^2t} \quad (2.6)$$

J_X, J_Z – moment setrvačnosti v osách X a Y [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

$\varepsilon_X, \varepsilon_Y$ – úhlové zrychlení v osách X a Y [$^\circ\cdot\text{s}^{-2}$]

ω_X, ω_Y – úhlová rychlost v osách X a Y [$^\circ\cdot\text{s}^{-1}$]

φ, θ – úhel natočení okolo os X a Y [$^\circ$]

2.3 Rotační pohyb v ose Z

Rotace v ose Z určuje natočení přední strany quadrotoru v požadovaném směru v rovině se zemí. Na motory s vrtulemi působí v protisměru jejich rotace reakční síly, které stroji udělují reakční moment (2.7). Tento moment je zodpovědný za rotaci v ose Z . Díky tomu, že jsou dvě vrtule pravotočivé a dvě levotočivé, je možné regulací otáček dvojic vrtulí rotujících ve stejném směru nastavovat požadovaný reakční moment. Ze znalosti reakčního momentu a momentu setrvačnosti v ose Z , lze vypočítat úhlovou rychlost a úhlové natočení obdobně jako v (2.5).

$$M_Z = (-F_{M1} - F_{M2} + F_{M3} + F_{M4}) \cdot l \quad (2.7)$$

2.4 Lineární pohyb v ose X a Y

Lineárního pohybu kvadrokoptéry v ose X a Y je docíleno jejím vychýlením z vodorovné polohy vůči zemi v těchto osách, kdy dojde k rozložení tahové síly F_T z osy Z i do druhé kolmé osy k ose otáčení (2.8) (2.9). Zrychlení, rychlost a poloha se potom vypočte podle vztahů (2.10) a (2.11).

$$F_X = F_T \cdot \sin \theta \quad (2.8)$$

$$F_Y = F_T \cdot \sin \varphi \quad (2.9)$$

F_X, F_Y – výsledná síla v ose X a Y [N]

φ, θ – Náklon v ose X, Y [$^\circ$]

$$\frac{F_X}{m} = a_X = \frac{dv_X}{dt} = \frac{d^2X}{dt^2} \quad (2.10)$$

$$\frac{F_Y}{m} = a_Y = \frac{dv_Y}{dt} = \frac{d^2Y}{dt^2} \quad (2.11)$$

a_X, a_Y – zrychlení v osách X a Y [ms^{-2}]

v_X, v_Y – rychlost v osách X a Y [ms^{-1}]

X, Y – uražená dráha v osách X a Y [m]

2.5 Lineární pohyb v ose Z

Pohybu v ose Z je dosaženo pomocí změny celkového tahu motorů quadrotoru, který se určí jako součet sil motorů, které působí v ose Z . Od této síly je zapotřebí odečíst vliv tíhové síly G (2.12), která působí proti směru působení sil motorů a umožňuje quadrotoru klesání. To je výhodné zejména proto, že motory jsou schopné působit silou pouze v jednom směru a to kolmo směrem od země (uvažujeme-li quadrotor ve vodorovné poloze vůči zemi). Velikost působící tíhové síly G je přímo úměrná hmotnosti quadrotoru m a při jejím vykompenzování a překonání tahem motorů dochází ke vzletu. Výsledná působící síla se tedy vypočte podle vztahu (2.13).

$$G = m \cdot g \quad (2.12)$$

G – tíhová síla [N]

m – hmotnost quadrotoru [kg]

g – tíhové zrychlení [ms^{-2}]

$$F_T = F_{M1} + F_{M2} + F_{M3} + F_{M4} - G \quad (2.13)$$

F_T – celková síla působící na quadrotor v ose Z [N]

F_{M1} až F_{M4} – tahové síly jednotlivých motorů [N]

Následně je možné přepočítat působící sílu F_T při hmotnosti m na zrychlení a_Z , rychlost v_Z a polohu h v ose Z obdobně jako v (2.10).

3 DÁLKOVÉ ŘÍZENÍ QUADROTORU

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, kvadrokoptéra zatím nemá implementované dálkové řízení. Jediný způsob, který poskytuje dostatečný komfort pro obsluhu a přesnost řízení, je modelářská RC souprava, která byla zvolena pro svoji jednoduchou implementaci do zařízení a nízkou pořizovací cenu. Alternativou by bylo řízení pomocí PC např. přes WiFi, ale tato řešení jsou většinou drahá a mnohem náročnější na implementaci. Dalším problémem je také nutnost neustálé přítomnosti relativně rozměrného a těžkého přenosného počítače. To je možné vyřešit řízením pomocí chytrého mobilního telefonu nebo tabletu, který zvolil například i výrobce populárních dronů Parrot [2]. Nicméně, takové řešení je opět velmi drahé, náročné na naprogramování mobilní aplikace a na celkovou implementaci.

V tomto případě byla vybrána 6 kanálová modelářská RC souprava CADET 6 PRO (viz obrázek 3.1), operující v rádiovém pásmu 2,4 GHz. Vysílač disponuje dvěma proporcionálními pákovými ovladači, každý se dvěma kanály pro řízení letu. Dále jedním třípolohovým a jedním dvoupolohovým přepínačem pro další doplňkové funkce. Výrobce deklaruje reálný dosah vysílače až 800 m na přímou viditelnost.



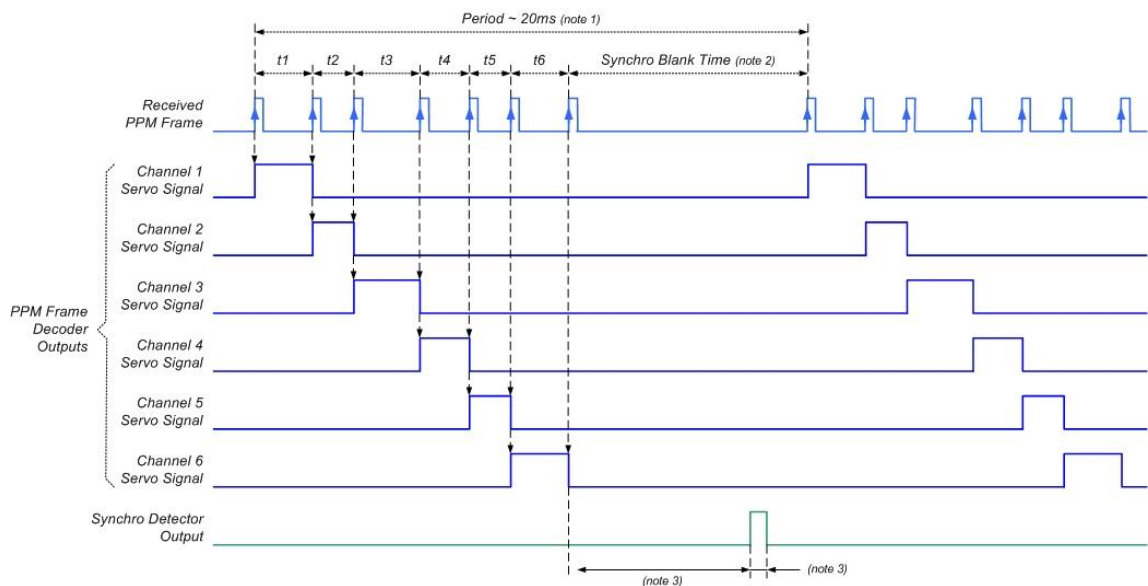
Obrázek 3.1: Vysílač CADET 6 PRO s vyznačenými ovládacími prvky jednotlivých kanálů

3.1 Hardwarová realizace

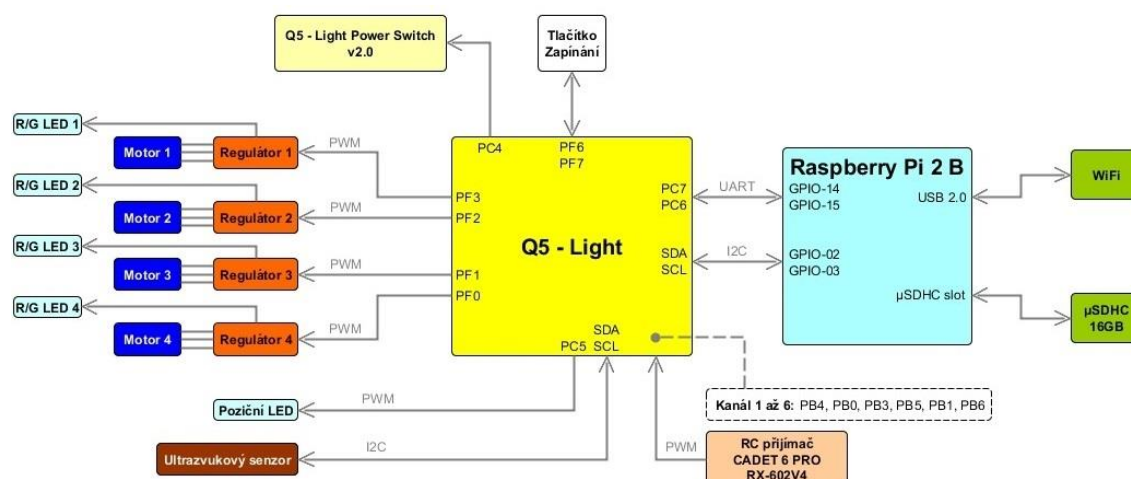
Při prvním pohledu na obrázek 3.3 je vidět, že oproti původní verzi quadrotoru [1] došlo k přidání modulu přijímače RC soupravy CADET 6 PRO k hlavní řídicí desce Q5 - Light. Výstup každého kanálu přijímače byl připojen na jeden vstupní pin portu B mikrokontroléru. K tomu bylo přistoupeno z toho důvodu, že se nepodařilo identifikovat výstupní PPM signál [3] přijímače, který není výrobcem přímo vyveden na žádný výstupní pin přijímače. Nicméně, samotná komunikace RC soupravy probíhá pomocí PPM signálu, který je mnohem výhodnější k vyhodnocování mikrokontrolérem.

PPM (pulzně-polohová modulace) je sériový signál, který v sobě nese informaci o PWM signálech na jednotlivých výstupech přijímače, které odpovídají daným kanálům (viz obrázek 3.2). První náběžná hrana signálu značí počátek pulzu prvního kanálu (počátek přenášeného datového rámce) a každá následující náběžná hrana indikuje konec onoho pulzu a zároveň počátek pulzu následujícího na dalším kanálu. Takto je přenesena informace o všech kanálech a za poslední náběžnou hranou PPM signálu (za koncem datového rámce), se nachází synchronizační mezera, trvající po zbývající dobu do 20ms obnovovací periody signálu. Z principu tedy vyplývá, že doba trvání datového rámce přímo odpovídá součtu délek přenášených PWM pulzů. K jeho detekci je zapotřebí pouze jeden vstupní pin mikrokontroléru namísto šesti různých při detekci již demodulovaných PWM signálů.

PWM (pulzně-šířková modulace) signály na jednotlivých kanálech odpovídají výchylce páček na vysílači. Platí, že nejmenší výchylce odpovídá PWM pulz o délce $\approx 1,0 \text{ ms}$, střední výchylce $\approx 1,5 \text{ ms}$ a maximální výchylce $\approx 2,0 \text{ ms}$. Informace je tedy přenášena jako šířka vysoké úrovně ku nízké úrovni signálu. Opakovací kmitočet je zpravidla 50 Hz . Tyto signály jsou vyvedeny z přijímače paralelně a pro vyhodnocení jednotlivých PWM signálů, je tedy zapotřebí obsadit celkem šest pinů mikrokontroléru.



Obrázek 3.2: Princip dekódování PPM signálu na PWM signál. Zdroj [6]



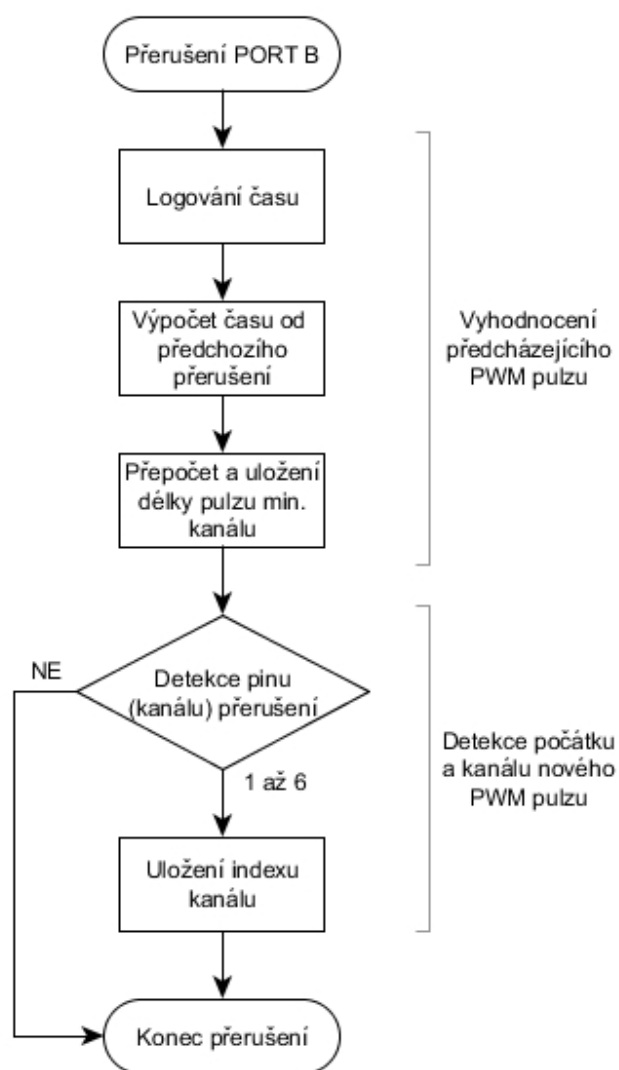
Obrázek 3.3: Blokové schéma zapojení elektroniky kvadrokoptéry

3.2 Softwarová realizace

Detekce délky PWM pulzu na jednotlivých kanálech (pinech mikrokontroléru) byla realizována pomocí vyvolání externího přerušení na portu B s nástupnou hranou signálu na jakémkoliv pinu portu. Jakmile dojde k detekci náběžné hrany, vypočte se rozdíl času mezi minulým a nynějším vyvoláním přerušení a tento výsledný čas odpovídá délce PWM pulzu na předchozím pinu. Následně je tento čas po přepočtu uložen jako výsledná hodnota v rozsahu -600 až 600 [-] (0 odpovídá střední výchylce, tedy pulzu délky $1,5$ ms). Poté se testuje, který kanál vyvolal aktuální přerušení a jeho index se opět uloží. Viz obrázek 3.4.

Programem byl také definován účel jednotlivých ovládacích prvků vysílače. Páčka 2. kanálu slouží k řízení letu ve směru osy X a páčka 4. kanálu k řízení letu v ose Y (resp. k řízení náklonu v osách X a Y). Celkový tah motorů se nastavuje pomocí páčky 3. kanálu a páčkou 1. kanálu se nastavuje směr natočení okolo osy Z . Přepínače pro kanály 5 a 6 jsou doplňkové. 5. kanál aktuálně zapíná a vypíná napájení motorů a 6. kanál přepíná funkci poziční LED mezi režimy svítí – nesvítí – záblesky.

Dále byl nakonfigurován samotný přijímač tak, že pokud dojde ke ztrátě signálu z vysílače, automaticky sníží střihu PWM signálů, což je vyhodnoceno řídicí jednotkou tak, že sníží požadovanou letovou výšku postupně na 0 m a umožní postupné přistání quadrotoru. V tomto případě se jedná o bezpečnostní opatření.



Obrázek 3.4: Principiální znázornění vývojového diagramu dekódování RC přijímače

4 SNÍMAČE VÝŠKY

V současné době je na trhu dostupných mnoho různých typů snímačů, které umožňují měření letové výšky. Nicméně, v oblasti quadrotorů a příbuzných zařízení jsou na tyto snímače kladeny velké nároky na vysokou přesnost, nízkou hmotnost a nízkou cenu.

V následujících podkapitolách je uveden stručný přehled několika různých snímačů, které lze použít pro měření letové výšky zařízení. U senzorů, které byly použity k vypracování této práce je uveden konkrétní typ a některé základní parametry.

4.1 Ultrazvukový snímač

Jedná se o snímač absolutní vzdálenosti od překážky, který funguje na principu vysílání ultrazvukových impulzů (typicky okolo 40 kHz) a následného měření doby, za jakou detekuje jeho odraz od překážky. Signál v tomto případě musí urazit dvojnásobnou vzdálenost od vysílače k překážce a zpět. Jedná se o velmi přesný snímač, ale vzhledem k rychlosti šíření ultrazvuku ve vzduchu a k náchylnosti snímače k přeslechům, ho nelze použít s vyšším obnovovacím kmitočtem měření, který se pohybuje nejvýše v řádu desítek Hz. Změřená hodnota je dále zatížena chybou způsobenou především vlivem teploty vzduchu, která výrazně ovlivňuje rychlost šíření ultrazvukových vln. Vliv této chyby je možné eliminovat, a pokud známe teplotu, tak můžeme vypočítat rychlost šíření ultrazvuku c podle vztahu (4.1). a výsledná vzdálenost l od překážky se určí podle (4.2).

$$c = 331,57 + 0,607 \cdot t_v \quad (4.1)$$

c – výsledná rychlost zvuku ve vzduchu [ms^{-1}]

t_v – teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

$$l = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (4.2)$$

l – vzdálenost snímače a překážky [m]

Δt – doba od vyslání signálu do jeho přijetí [s]

Pro tuto aplikaci byl zvolen modul ultrazvukového senzoru SRF10 s maximálním dosahem 8 m, nastavitelným zesílením přijímače a s digitálním výstupem na sériovou sběrnici I2C. Snímač vrací již vypočtenou vzdálenost (resp. výšku) od překážky [7].

4.2 Barometr

Je většinou konstruován s využitím piezorezistivního jevu polovodičového krystalu křemíku. Dosahují mnohonásobně vyšší citlivosti jak kovové tenzometry. Vlivem mechanického namáhání krystalové struktury křemíku působícím tlakem dochází k deformaci mřížky a ke změně rezistivity křemíkového krystalu vlivem změny

pohyblivosti nosičů náboje. Tyto snímače jsou díky své velikosti v MEMS provedení vhodné pro měření barometrického tlaku přímo na desce plošných spojů. Barometrické měření výšky je silně ovlivněno vzdušnými proudy a driftem tlaku během dne. Pro tyto snímače je typický vysoký výstupní šum. Jedná se o relativní snímač nadmořské výšky, kterou je možné určit podle vztahu (4.3). [9]

$$h = 44330 \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5,255}} \right) \quad (4.3)$$

***h** – vypočtená výška [m]*

***p** – aktuální tlak [Pa]*

***p₀** – tlak ve výchozí výšce [Pa]*

K měření barometrického tlaku byl zvolen integrovaný snímač LPS25H od společnosti STMicroelectronics [8]. Senzor má zabudovanou kvadratickou teplotní kompenzaci a nabízí možnost interního průměrování 8 až 512 vzorků na jedno měření. Dále je možné aplikovat na takto naměřená data posuvný FIFO registr, který zajišťuje výpočet plovoucího průměru 2 až 32 měření. Při použití interního průměru 512 vzorků na jedno měření a plovoucího průměru 32 měření lze dosáhnout redukce šumu až na 1 Pa RMS. Výstupní tlak je reprezentován jako 24bitové číslo. Ke komunikaci lze volit mezi sériovým rozhraním I2C a SPI.

4.3 Akcelerometr

Akcelerometr slouží k měření lineárního zrychlení. Většinou je realizován jako kapacitní diferenciální snímač, který je připojen na dvě pevné elektrody a na třetí pohyblivou, která je umístěna mezi nimi. Tím vznikne diferenciální zapojení kondenzátoru pro dané měření. Pokročilejší integrované obvody obsahují akcelerometr pro každou měřenou osu X, Y a Z.

Takovýto senzor dosahuje vysoké přesnosti v oblasti krátkodobého měření zrychlení, ale z dlouhodobého hlediska je velmi závislý na teplotě a na dalších rušivých jevech. Proto není možné získávat rychlost nebo dokonce polohu prostou integrací podle času pouze z něj, protože dochází i k integraci příliš velké chyby, která toto použití naprosto znemožňuje. Jistou možností je odstranění takto vzniklého driftu fúzí s daty z jiného snímače.

Pro měření zrychlení quadrotoru byl zvolen integrovaný snímač akcelerometru, gyroskopu a magnetometru LSM9DS1 od STMicroelectronics [10]. Jedná se o 3osý akcelerometr s nastavitelným rozsahem měřeného zrychlení ± 2 , ± 4 , ± 8 a ± 16 g a maximálním měřicím kmitočtem až 952 Hz. Výstupní data jsou reprezentována jako 16bit hodnota a ke komunikaci lze vybírat mezi sériovým rozhraním I2C a SPI.

4.4 GNSS

GNSS je anglickou zkratkou pro „Globální družicový navigační systém“. Navigační systémy pracují na principu výpočtu polohy pasivního přijímače pomocí signálů z navigačních družic. K určení polohy je zapotřebí signálu z minimálně čtyř družic, které vysílají informace o své poloze a vysoce přesný čas, který zajišťují pomocí extrémně přesných atomových hodin. První tři družice slouží pro výpočet polohy a čtvrtá pro určení přesného času. Poloha je vypočtena z rozdílů zpoždění příchozích signálů z družic, které jsou opatřeny časovými razítky, a zároveň je známá poloha vysílajících družic. Díky znalosti rychlosti šíření signálu prostorem lze vypočítat přesnou polohu. V praxi je tato metoda zatížena různými chybami, například chybou výpočtu času, chybou atomových hodin družic, ionosférickými poruchami atd. Z těchto a dalších důvodů je pro přesné určení polohy potřeba přijímat signál od většího počtu družic.

4.4.1 GPS, GLONASS a další

Historicky všechny navigační systémy spadaly pod armády různých států a není garantována jejich neustálá dostupnost pro civilní použití. [5]

Nejznámější je GPS, který je provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických. I přes postupné zvyšování přesnosti GPS je běžně dosažitelná přesnost v řádu několika metrů a není proto samostatně příliš vhodný pro použití určování výšky.

O něco méně známý je GLONASS, který je provozovaný ruskou armádou a dále potom několik spíše regionálních navigačních systémů. Například BeiDou provozovaný Čínou.

4.4.2 EGNOS a Galileo

EGNOS (Evropská „podpůrná“ geostacionární navigační služba) slouží jako doplňující služba k GPS na území Evropy, která zajišťuje korekce k GPS signálu a tím částečně zpřesňuje určení polohy.

Galileo je další projekt Evropské unie, následovník projektu EGNOS a přímá konkurence GPS. Jedná se o civilní projekt Evropské unie s administrativním sídlem v České Republice [4]. Galileo má sestávat z celkem 30 družic, přičemž 3 z nich mají být záložní. Aktuálně je na oběžné dráze Země vyneseno 18 těchto družic a zbývajících 12 má být vyneseno do roku 2020, kdy má systém dosáhnout plné operační schopnosti. Výsledná chyba určení polohy by měla být menší jak 1 m a mělo by být možné určovat polohu i uvnitř budov. Systém je také schopen pracovat paralelně s GPS a přijímače tak mohou využívat přesnějšího určení polohy pomocí obou navigačních systémů.

V době psaní této práce došlo ke spuštění systému pro veřejnost v testovacím režimu a je již možné jeho využívání. Pokud bude systém v plné funkčnosti skutečně dosahovat deklarované přesnosti, potom bude možné jeho použití společně s jinými senzory pro detekci polohy quadrotoru.

5 MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

Nejtěžnější částí této práce je samotné měření a zpracování dat z dostupných snímačů letové výšky. Tato kapitola je částečně inspirovaná prací [12], ve které se autor pokoušel o fúzi dat senzoru akcelerometru, barometru a ultrazvuku s využitím zjednodušené formy Kalmanova filtru. Nicméně, tato práce se zaměřuje především na využití principu uvedeném v práci [11], která využívá pro krátkodobé měření stability akcelerometru. Pro odstranění jeho dlouhodobého driftu, který se projevuje především integrací na rychlost a na polohu, je využito barometru, který je stabilní z dlouhodobého hlediska. Pro zpřesnění nízkých letových výšek do 2 m je využíván také ultrazvukový snímač.

Zpracování dat a ladění jednotlivých filtrů bylo řešeno v prostředí MATLAB a Simulink [15] s následnou implementací do quadrotoru v jazyce C. Většina simulací je založena na reálně naměřených datech.

5.1 Základní digitální FIR a IIR filtry

K filtraci dat byly zvažovány a testovány dva nejjednodušší typy FIR (Finite Impulse Response) a IIR (Infinite Impulse Response) číslicových filtrů. V následujících podkapitolách jsou popsány konkrétní použité filtry.

5.1.1 FIR filtr

Jedná se o filtr, jehož odezva se na skok vstupní veličiny ustálí v konečném čase. Nejjednodušším zástupcem těchto filtrů je klouzavý průměr (5.1). Časová konstanta se vypočte podle vztahu (5.2) a mezní frekvence dle (5.3). Tento typ filtru je díky absenci zpětné vazby vždy strukturálně stabilní. V reálných aplikacích dosahuje vysokých řádů a je velmi náročný na paměťové a výpočetní prostředky z důvodu uchovávání $N+1$ prvků a provádění N součtů v každé iteraci [13].

$$y_i = \sum_{j=0}^{N-1} x_{i+j} \quad (5.1)$$

y – výstupní hodnota filtru [-]

x – filtrovaná data [-]

N – počet průměrovaných hodnot [-]

i – číslo iterace výpočtu filtru [-]

$$\tau = \Delta_T \cdot N \quad (5.2)$$

Δ_T – vzorkovací perioda signálu [s]

τ – časová konstanta filtru [s]

$$f_m = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (5.3)$$

f_m – mezní kmitočet filtru [Hz]

5.1.2 IIR filtr

Na rozdíl od FIR filtrů se odezva na skok vstupní veličiny tohoto typu filtru ustálí v nekonečném čase. Jedná se o filtr s vnitřní zpětnou vazbou a póly jeho přenosu se pohybují v blízkosti jednotkové kružnice. Díky tomu je možné, aby se stal nestabilním. Oproti FIR filtru s obdobnou strmostí dosahuje mnohonásobně nižšího řádu přenosu, výrazně menšího zpoždění signálu a menších nároků na potřebnou paměť. Podrobněji o něm pojednává práce [14].

V této práci bylo využito jeho nejjednodušší podoby - diskrétního setrvačného članku 1. řádu, který je obdobou analogové RC dolní propusti. Matematicky se jedná o exponenciální klouzavý průměr (5.4). Váha jednotlivých vzorků v čase exponenciálně klesá. Časová konstanta filtru τ se určí podle rovnice (5.5) a mezní frekvence f_m podle rovnice (5.3) resp. (5.6).

$$y_n = \alpha x + (1 - \alpha)y_{n-1} \quad (5.4)$$

y_n – výstupní hodnota filtru [-]

x – filtrovaná data [-]

y_{n-1} – předchozí výstupní hodnota filtru [-]

α – koeficient filtru [-]

$$\tau = \Delta_T \cdot \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) \quad (5.5)$$

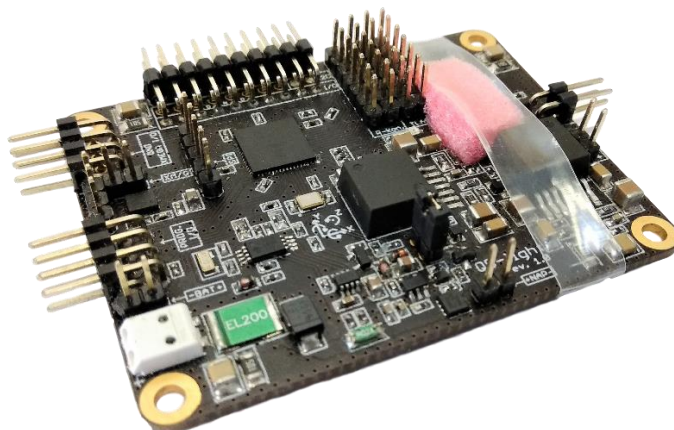
$$f_m = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)2\pi\Delta_T} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (5.6)$$

5.2 Předzpracování a filtrace dat barometru

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.2, piezorezistivní MEMS snímače barometrického tlaku, resp. nadmořské výšky, trpí výrazným šumem měřené veličiny a v krátkodobém horizontu zlomku sekund až sekund jej nelze prakticky použít. Avšak z dlouhodobějšího hlediska v řádu minut až desítek minut se jedná o velmi přesný a stabilní senzor. V případě delšího měření se začne projevovat drift barometrického tlaku v závislosti na počasí, teplotě a fázi denního a ročního cyklu. Jeho velikost se může pohybovat v řádu desítek až stovek Pa.

Během prvních reálných testů barometru LPS25H bylo zjištěno, že je viditelně ovlivňován prouděním vzduchu v místnosti, u kterého docházelo po přepočtu tlaku na

nadmořskou výšku (4.3) k driftu v řádu jednotek metrů. Dále byla vypočtená výška výrazně ovlivňována občasnými výraznými zákřivy o velikosti desítek až stovek metrů. Systematickým testováním bylo zjištěno, že se jedná o vliv turbulentního proudění vzduchu od rotujících vrtulí. Deska plošných spojů (obrázek 5.1) byla tedy upravena tak, že byla na senzor barometru umístěna porézní houbička, která zajišťuje tlumení prudkých tlakových změn. Toto řešení se ukázalo jako nedostatečné a v řádu desítek sekund se opět projevoval vliv turbulentního proudění vzduchu. Quadrotor byl proto opatřen provizorním krytem (obrázek 5.2), který tento vliv odstraňuje. Kryt je vyroben z pěnového polystyrenu a do budoucna bude zároveň poskytovat ochranu řídicí elektronice quadrotoru.



Obrázek 5.1: DPS opatřená houbičkou okolo barometru LPS25H



Obrázek 5.2: Quadrotor s krytem zamezujícím ovlivňování barometru turbulentním prouděním vzduchu z vrtulí

Měřená data jsou přepočtena z nadmořské výšky na výšku oproti referenčnímu bodu, kterým je startovní výška quadrotoru. Toho je docíleno zprůměrováním prvních 10 s záznamu a tento průměr je následně odečítán od dalších měření jako offset.

5.2.1 Nastavení interního průměrování barometru

Barometr disponuje možností nastavení interního průměrování 8 až 512 vzorků na jedno měření. Maximální perioda měření se řídí vztahem (5.7). Perioda je tedy přímo úměrně závislá na počtu průměrovaných vzorků tlaku a teploty na jedno měření. K tomuto času je ještě zapotřebí připočíst čas režie 975 μs , která je potřebná k internímu zpracování naměřených vzorků. [9]

$$T_c = 62 \cdot (P_{AVG} + T_{AVG}) + 975 \quad (5.7)$$

T_c – výsledný čas konverze jednoho měření senzoru LPS25H [μs]

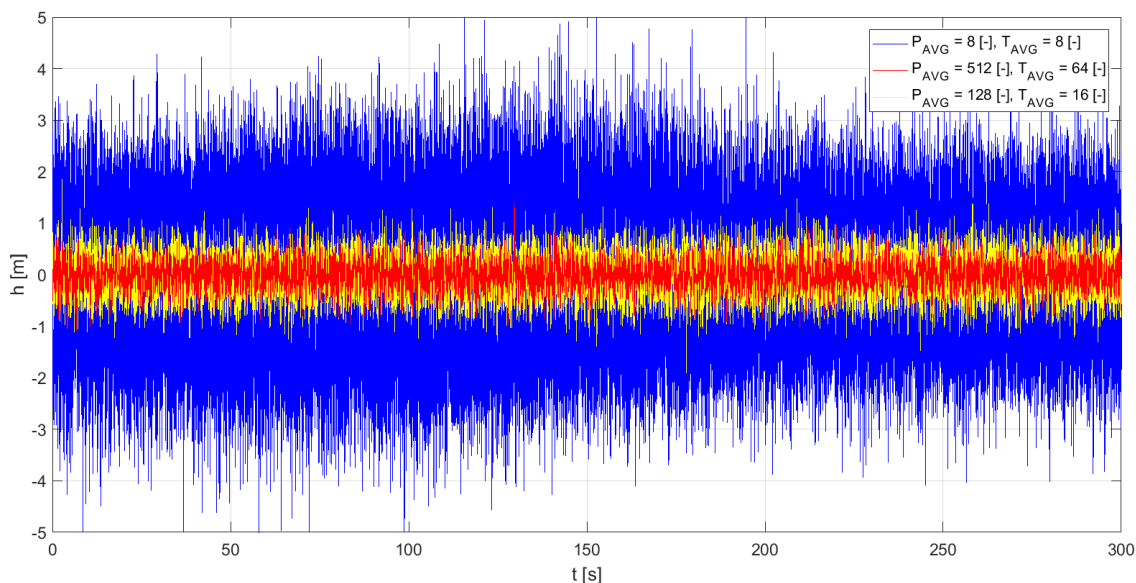
P_{AVG} – počet průměrovaných vzorků tlaku [-]

T_{AVG} – počet průměrovaných vzorků teploty [-]

K účelům přesného určení výšky je vyžadováno měření, které není zatížené bílým šumem a zároveň dosahuje vysokého kmitočtu měření. Tyto dva požadavky si vzájemně odporují a je tedy zapotřebí najít mezi nimi kompromis. Pokud je zvoleno měření s interním průměrem 8 vzorků teploty i tlaku, výsledná amplituda šumu přepočtené výšky se pohybuje okolo $\approx 3 m$ a kmitočet měření $T_c \approx 500 Hz$. Přítomnost režie zpracování jednotlivých měření způsobí, že na každou sekundu kontinuálního měření připadne $\approx 500 ms$, kdy snímač nevzorkuje nové hodnoty tlaku. Naopak použití interního průměru 512 vzorků tlaku a 64 vzorků teploty, způsobí pokles amplitudy šumu na $\approx 0,6 m$ a zároveň pokles frekvence měření na $T_c \approx 27 Hz$. V tomto případě režie zpracování měření na každou sekundu poklesne na pouhých $\approx 27 ms$ a měřená data jsou tedy za stejný časový úsek tvořena mnohem vyšším počtem zprůměrovaných hodnot a jsou lépe filtrovaná.

Jako kompromis mezi úrovní šumu a kmitočtem měření byl zvolen interní průměr 128 vzorků tlaku a 16 vzorků teploty, což umožňuje získávat data ze snímače o frekvenci až 101 Hz, která jsou zatížena šumem s amplitudou $\approx 1 m$.

Srovnání kvality filtrace šumu ukazuje obrázek 5.3. Jedná se o reálně naměřená data barometrického tlaku přepočteného na výšku. Pro grafické srovnání byly použitím horní propusti odfiltrovány nízkofrekvenční poruchy vznikající vlivem proudění vzduchu i požadovaný měřený signál. Pomineme-li aditivní šum, signál by se měl za běžných okolností vlivem letu výrazně měnit v řádu sekund a více. Mezní kmitočet horní propusti byl proto nastaven na hodnotu $f_m = 0.56 Hz$.



Obrázek 5.3: Srovnání vlivu počtu průměrovaných vzorků barometru na šum

5.2.2 Filtrace dat barometru

Další ladění filtrace dat barometru se věnuje kvalitě filtrace signálu pomocí FIFO registru senzoru (klouzavý průměr (5.1)), dále označováno jako $filtr_{2A}$. Druhým srovnávaným filtrem je $filtr_{2B}$, což je externí exponenciální klouzavý průměr (5.4). Zpracovávaný signál označovaný jako $filtr_1$ je výstupní signál barometru, který byl nastaven v předcházející kapitole 5.2.1. Hlavním cílem je ideálně odfiltrovat veškerý šum barometru, který má vysokofrekvenční charakter a dosahuje přibližné amplitudy 1 m , ale zároveň zachovat informaci o změně výšky barometru, která má oproti šumu nízkofrekvenční charakter. Budoucí fúze dat barometru s dalšími snímači a následné využití takto naměřených dat k regulačním účelům vyžaduje, aby filtr dosahoval co nejvyšší rychlosti a nezpůsoboval velké zpoždění signálu. Je proto nutné najít opět kompromis mezi kvalitou filtrace a přípustným zpožděním signálu.

Pro účely ladění byla opět odfiltrována nízkofrekvenční složka signálu horní propustí s mezním kmitočtem $f_m = 0,56\text{ Hz}$. Kmitočet hlavní smyčky programu byl zvolen 350 Hz a měření barometru jsou prováděna s periodou $11,4\text{ ms}$.

$Filtr_{2A}$ je schopen průměrovat $x = \{2; 4; 8; 16; 32\}$ měření. V případě snahy filtrovat aditivní šum o kmitočtu vyšším jak $0,56\text{ Hz}$, je potřeba průměrovat více jak 32 měření (5.3). Proto bylo zvoleno použití $filtru_{2B}$, který umožňuje libovolně jemné ladění mezního kmitočtu (5.6) a $filtr_{2A}$ s průměrováním 32 měření byl použit pouze pro srovnání. Pro koeficient $filtru_{2B}$ byla vypočtena hodnota $\alpha = 0.01 [-]$.

Srovnání kvality filtrace zobrazuje obrázek 5.4, kde lze vidět, že se napohled amplituda šumu snížila z $\approx 1\text{ m}$ na $\approx 0.2\text{ m}$ u obou použitých filtrů. Pro přesnější určení útlumu signálu v dB byla pomocí programu MATLAB detekována obálka signálů, resp. amplitudy a podle (5.8) byl vypočten průměrný útlum signálů B_{2A} a B_{2B} . Dále byly

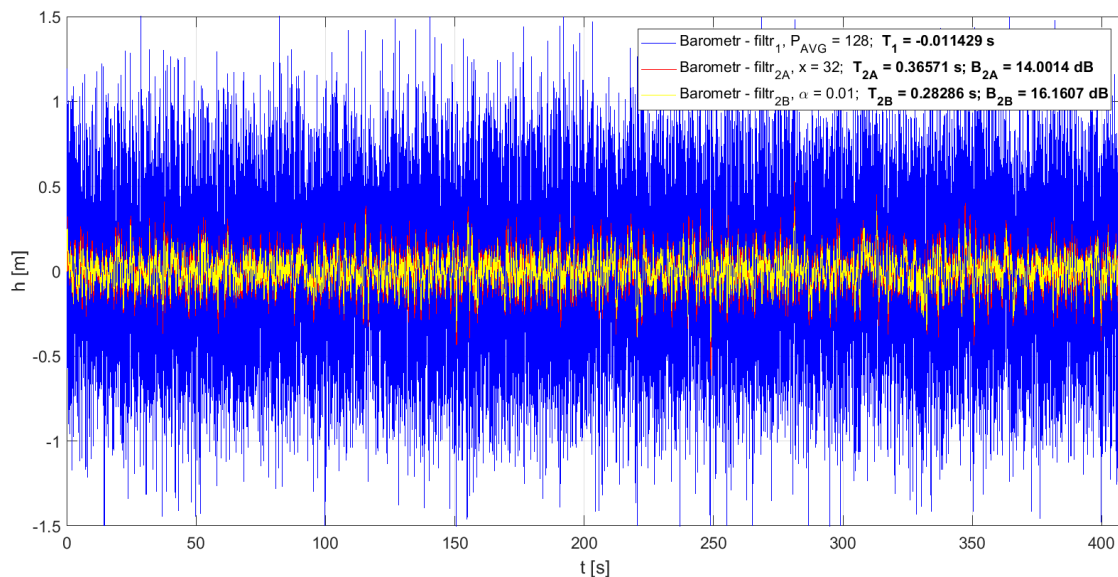
vypočteny časové konstanty filtrů T_{2A} a T_{2B} a odpovídající mezní kmitočty f_{m2A} a f_{m2B} (viz tabulka 5.1).

$$B = 20 \cdot \log \left(\frac{y}{x} \right) \quad (5.8)$$

B – útlum signálu [dB]

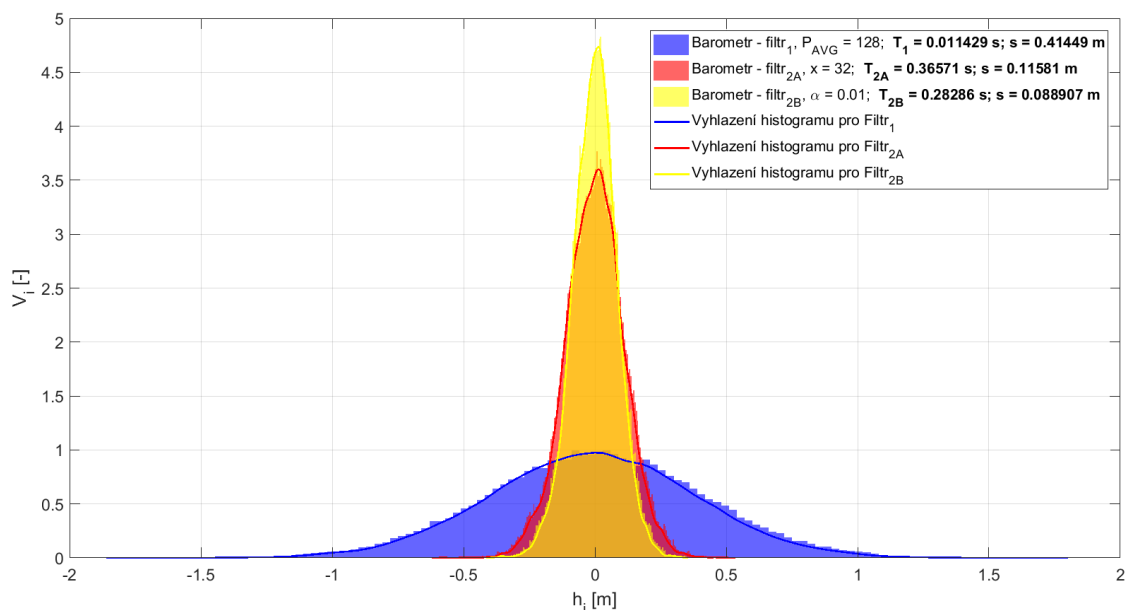
x – signál před filtrací [m]

y – filtrovaný signál [m]



Obrázek 5.4: Srovnání signálu šumu z barometru po průchodu filtry

Další možností srovnání kvality filtrace je za pomoci histogramu hustoty pravděpodobnosti amplitudy signálu (obrázek 5.5). Lze vidět, že se podle předpokladu jedná o Gaussovo rozložení šumu. S pomocí určené výběrové směrodatné odchylky s lze určit rozptýlení signálu okolo střední hodnoty, kterou je výška 0 m . Z grafu lze rozeznat výrazné snížení rozptylu šumu a hustoty pravděpodobnosti výskytu konkrétní hodnoty v šumu. V ideálním případě při kompletním odstranění šumu by měl vzniknout pouze jediný pruh v bodě $h_i = 0 \text{ m}$. Teoretický základ a výpočet hustoty pravděpodobnosti a výběrové směrodatné odchylky je uveden v [18] a [19].



Obrázek 5.5: Histogram hustoty pravděpodobnosti V_i výskytu hodnoty výšky h_i v šumu barometru

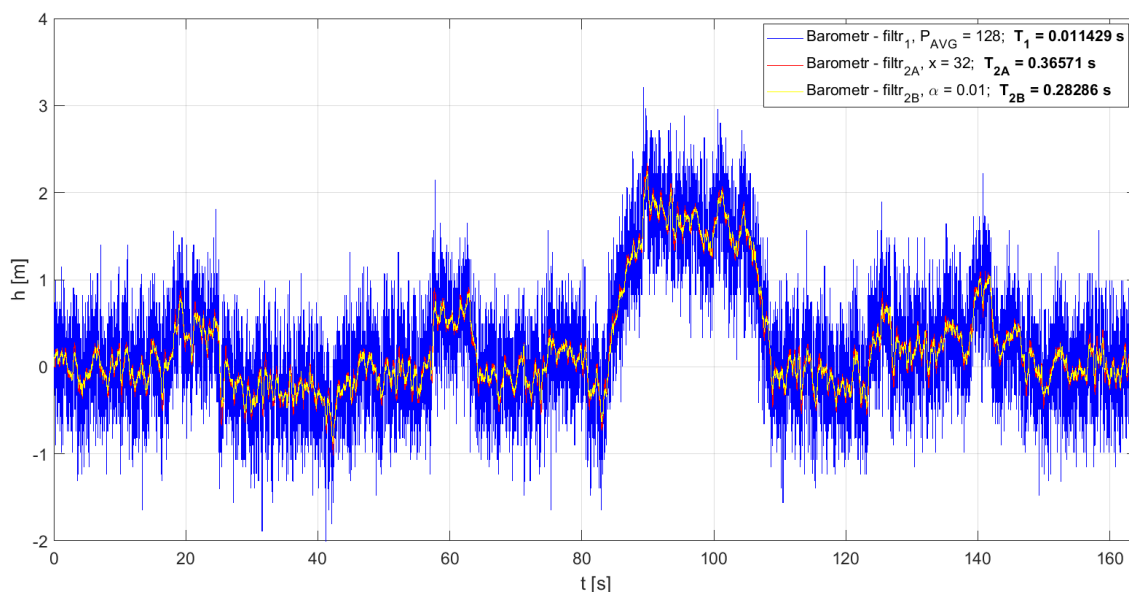
Tabulka 5.1: srovnání testovaných filtrů barometru

	T [ms]	f_m [Hz]	s [mm]	B [dB]
Filtr_{2A}	365,7	1,20	116,58	14,0
Filtr_{2B}	282,9	0,56	88,90	16,2

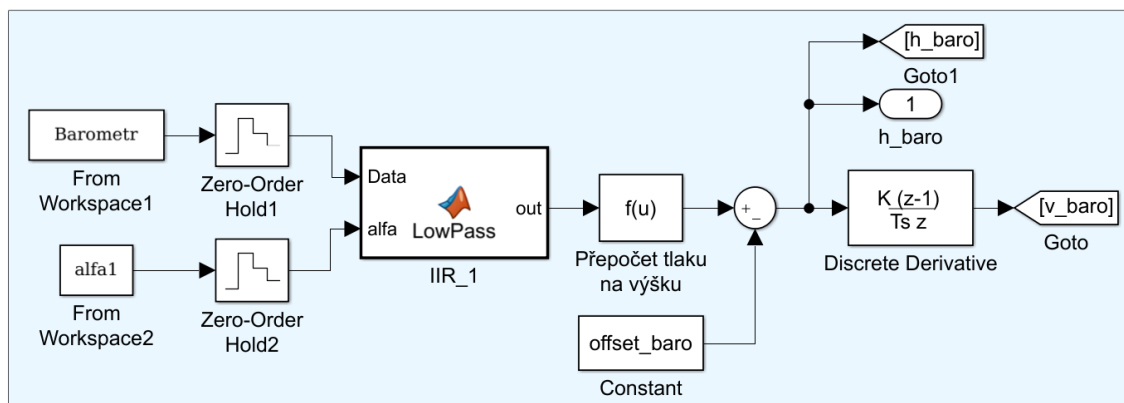
Ze simulací vyplývá, že výsledný útlum B a směrodatná odchylka s signálu se po průchodu filtry příliš neliší (tabulka 5.1) a průběh signálu po filtraci *filtr_{2A}* se blíží průběhu *filtru_{2B}* (obrázek 5.4). Podstatný rozdíl nastává v oblasti časové konstanty, díky které *filtr_{2A}* dosahuje podstatně většího zpoždění signálu a více než dvojnásobné mezní frekvence. Dané zjištění odpovídá teoretickým předpokladům chování filtrů z kapitoly 5.1.

Při použití reálného signálu včetně nízkofrekvenční složky je vidět, že dochází k podstatné redukci šumu a zároveň k zachování požadovaného signálu (obrázek 5.6). Snímač ležel při měření až do času 83 s ve výchozí nulové výšce. Následně byl zvednut do výšky 2 m a v čase 109 s byl opět přesunut do výšky 0 m. Signál je viditelně zatížen chybou, která způsobuje kolísání měřené výšky po filtraci o ± 1 m.

Obrázek 5.7 zobrazuje výsledné simulační schéma pro zpracování a filtraci barometrických dat pro následnou fúzi dat. *Alfa1* realizuje koeficient *alfa* pro blok *IIR_1*, ve kterém je implementován výsledný *filtr_{2B}*. Vzorkování vstupního signálu je zajištěno pomocí bloku *Zero-Order Hold*. Následně dojde k přepočtu tlaku na výšku a odečtení počátečního offsetu. Blok derivace slouží k derivaci měřené výšky na rychlost, která je potřebná pro budoucí fúzi snímačů.



Obrázek 5.6: Filtrace signálu barometru (výškový skok 2 m v čase 83 až 109 s)



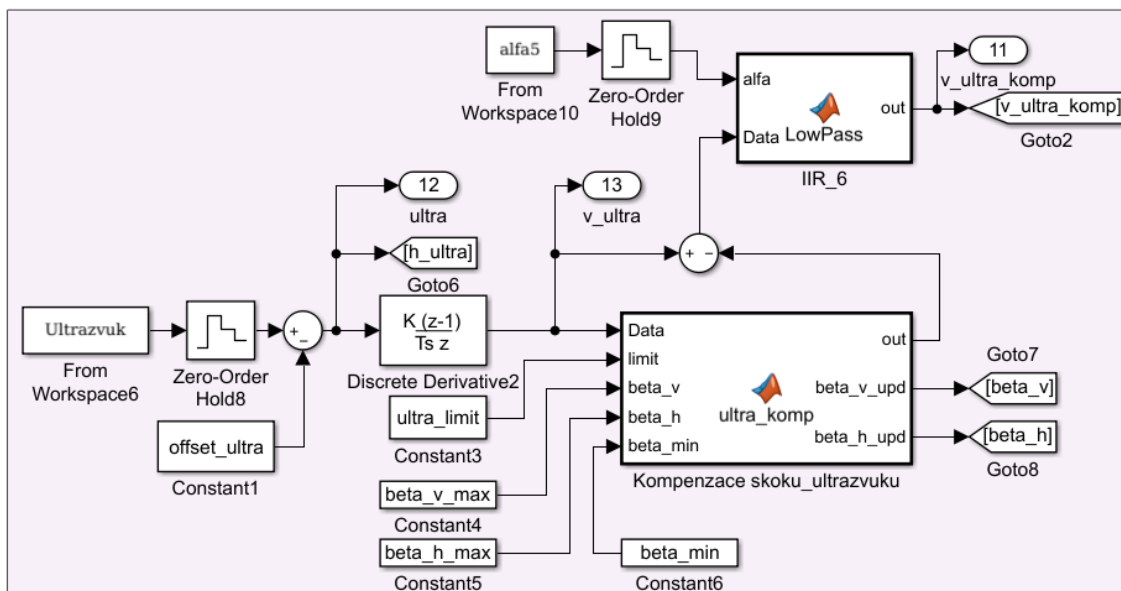
Obrázek 5.7: Simulační schéma filtrace barometru pro následnou fúzi dat

5.3 Předzpracování a filtrace dat ultrazvuku

Zásadním problémem, který znemožňuje přímé použití ultrazvukového snímače je, že měří absolutní vzdálenost od překážky. V důsledku toho snímač nedokáže rozeznat reálnou změnu výšky od prudké změny reliéfu terénu, jehož vzdálenost snímá. Jako praktický příklad lze uvést například snímání vzdálenosti snímače od stolu. V momentě, kdy se snímač začne pohybovat do strany a překoná hranu stolu, tak zaznamenaná skokovou změnu výšky, přestože nedošlo ke skutečné změně nadmořské výšky. Tuto vlastnost je zapotřebí odstranit nebo alespoň co nejvíce potlačit, protože není vhodné, aby quadrotor ve výsledku kopíroval reliéf terénu, ale požadujeme, aby držel stabilní letovou výšku bez ohledu na terén. Obdobný problém nastává i v případě detekce zbytkových odrazů ultrazvuku a detekce přeslechů.

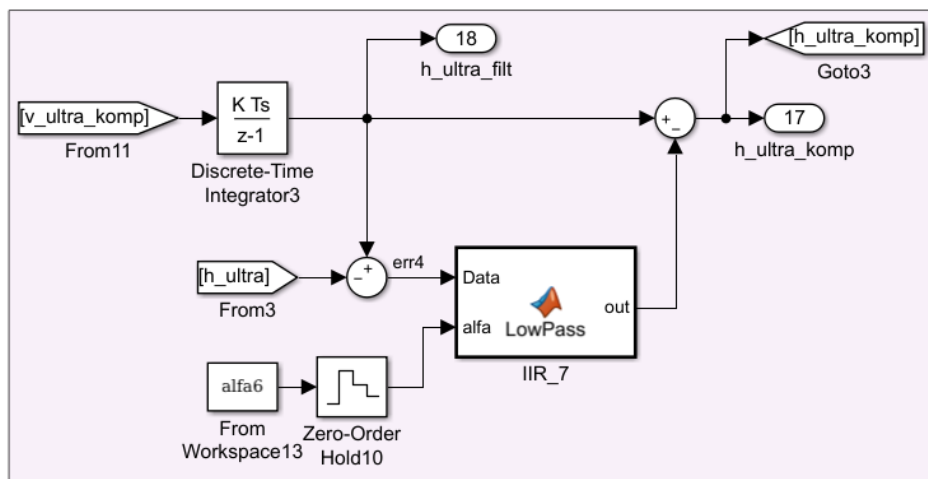
Potlačení tohoto jevu bylo zajištěno návrhem filtru (obrázek 5.8), který nejprve odečte počáteční offset startovní výšky a poté zderivuje měřenou výšku na rychlost. Měření snímače probíhá s periodou 40 ms, proto se již i desetimetrové skokové změny výšky

projeví jako rychlost o velikosti $v = 2,5 \text{ ms}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že reálná rychlost stoupání quadrotoru bude omezena nejvýše na $\pm 2 \text{ ms}^{-1}$, tak je blokem *Kompenzace skoku_ultrazvuku* jakákoliv vyšší rychlost považována za chybu měření. Limit rychlosti, od které je považována za chybu, je možné nastavit pomocí konstanty *ultra_limit*. Blok funguje jako pásmo necitlivosti, kdy má při rychlosti od -2 ms^{-1} do 2 ms^{-1} na výstupu nulu. Jakmile dojde k překročení tohoto limitu, nastaví na výstup hodnotu odpovídající rozdílu poslední hodnoty spadající do intervalu $\pm 2 \text{ ms}^{-1}$ a aktuální hodnoty, která ho přesáhla. V následujícím rozdílovém členu potom dojde k odečtení této hodnoty od rychlosti a tím se zajistí, že na výstupu zůstane poslední hodnota z intervalu. Do bloků *beta_v* a *beta_h* je zapisována míra věrohodnosti senzoru. V případě, že se rychlost pohybuje v daném intervalu, tak má ultrazvuk vysokou míru věrohodnosti, která je nastavována pomocí konstant *beta_v_max* = 0,5 [-] a *beta_h_max* = 0,2 [-]. V opačném případě věrohodnost klesne na úroveň *beta_min* = 0,7 [-]. Blok *IIR_6* je dolní propust s koeficientem α odpovídajícím *alfa5* = 0.12 [-], který byl nastaven experimentálně.

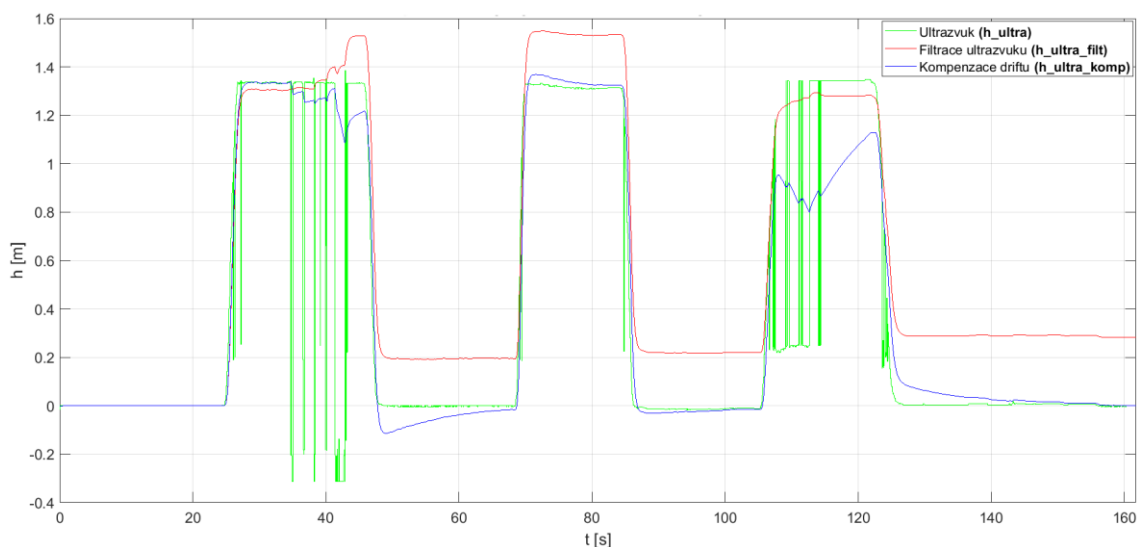


Obrázek 5.8: Filtrace skoků a přeslechů ultrazvukového snímače

Po zintegrování filtrovaného signálu *v_ultra_komp* (obrázek 5.9) získáme průběh, kde jsou již viditelně potlačeny skoky výšky, viz obrázek 5.10, kde signál *h_ultra* představuje originální naměřený signál a *h_ultra_filt* je již výška s potlačením skokových změn. Nelze si nevšimnout, že vynechávání měření v době zákmitů způsobuje drift výsledné výšky. Tento drift je odstraněn sledováním dlouhodobé odchylky mezi originálním a filtrovaným signálem, která vstupuje do filtru *IIR_7* s koeficientem *alfa6* = 0,0003 [-]. Pokud by se tato odchylka sledovala příliš rychle, opět by se ve výstupním signálu projevíly odfiltrované skoky. Tato odchylka je posléze odečtena od driftujícího signálu *h_ultra_filt*. Výsledný průběh je v grafu a schématu označen jako *h_ultra_komp*. Z grafu je také patrné, že se jedná o průběh výšky měřené ultrazvukem, který byl třikrát na přibližně 10 s zvednut do výšky 1,3 m.



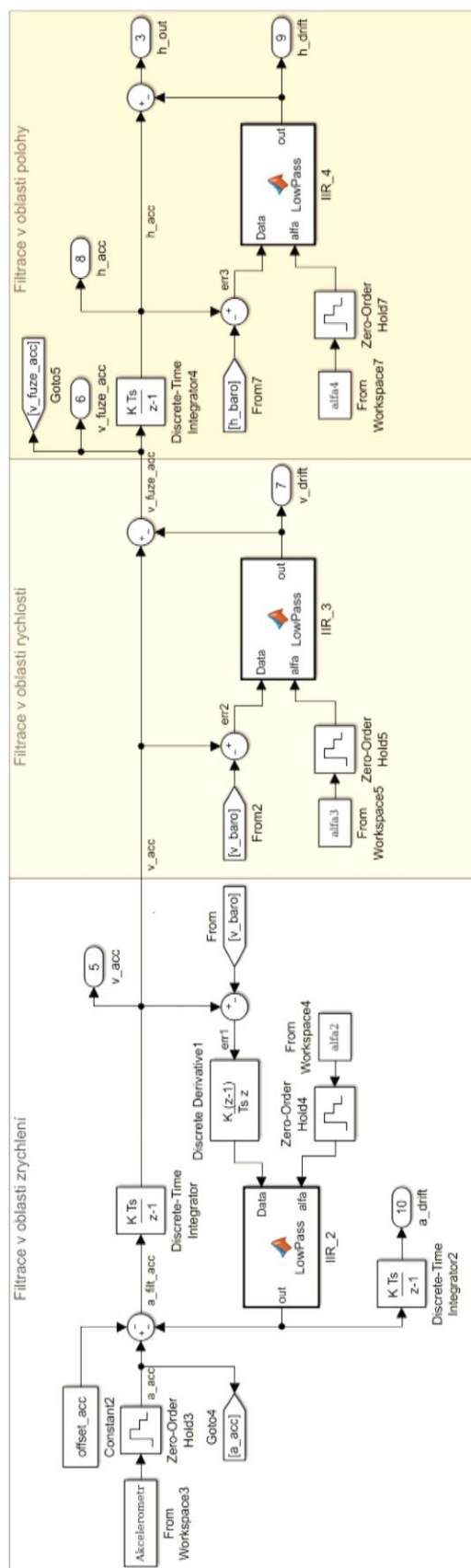
Obrázek 5.9: Kompenzace driftu ultrazvukového snímače



Obrázek 5.10: Filtrace dat ultrazvuku

5.4 Fúze akcelerometru a barometru

Vzhledem k tomu, že nelze k měření výšky používat samotný barometr, který v krátkodobém horizontu trpí výraznými poruchami vlivem proudění vzduchu a zároveň zpožděním filtrací, nelze ho použít pro účely regulace. Použití akcelerometru je v dlouhodobém horizontu zase nemožné z důvodu teplotního driftu a driftu integrací chyby. Nicméně, akcelerometr je velmi stabilní z krátkodobého hlediska, než dojde k přílišnému driftu vlivem integrované chyby. V následujících kapitolách je vycházeno z principu fúze těchto dvou snímačů, uvedeného v práci [11], která určuje rychlost letu pomocí akcelerometru, od kterého odečítá vznikající drift na základě odchylky od dat barometru. V práci je také využito odstranění vlivu proudění vzduchu pomocí pozemní barometrické stanice, to sebou ale přináší několik problémů. Především musí být stanice v bezprostřední blízkosti zařízení a nesmí se měnit její poloha. Z těchto důvodů nebyla použita.



Obrázek 5.11: Schéma fúzního filtru akcelerometru a barometru

5.4.1 Fúze v oblasti zrychlení

Viz obrázek 5.11 – část „Filtrace v oblasti zrychlení“, ve které je zobrazeno simulační schéma 1. stupně fúze akcelerometru s barometrem. Úkolem této části je odstranění driftu akcelerometru, který vzniká vlivem nepřesné kalibrace snímače a vlivem změn teplot, na které jsou MEMS akcelerometry typicky velmi citlivé. V simulaci již není řešen vliv tíhového zrychlení, jehož odečtení je již implementováno v rámci knihovny pro filtraci rotačních pohybů, čímž se zabývala především práce [1].

Data jsou z akcelerometru čtena s frekvencí 350 Hz. Od naměřených dat je odečítán počáteční offset, který je vypočten při inicializaci měření. Naměřené zrychlení je poté integrováno na rychlost. Následně je ve zpětné vazbě sledována odchylka od rychlosti měřené barometrem a tato odchylka je dále derivována na zrychlení a filtrována filtrem IIR_2 s experimentálně odladěným koeficientem $\alpha_2 = 0,00004 [-]$ dle doporučení v [11]. Takto určená hodnota driftu zrychlení je ve zpětné vazbě odečítána od měřeného zrychlení akcelerometrem.

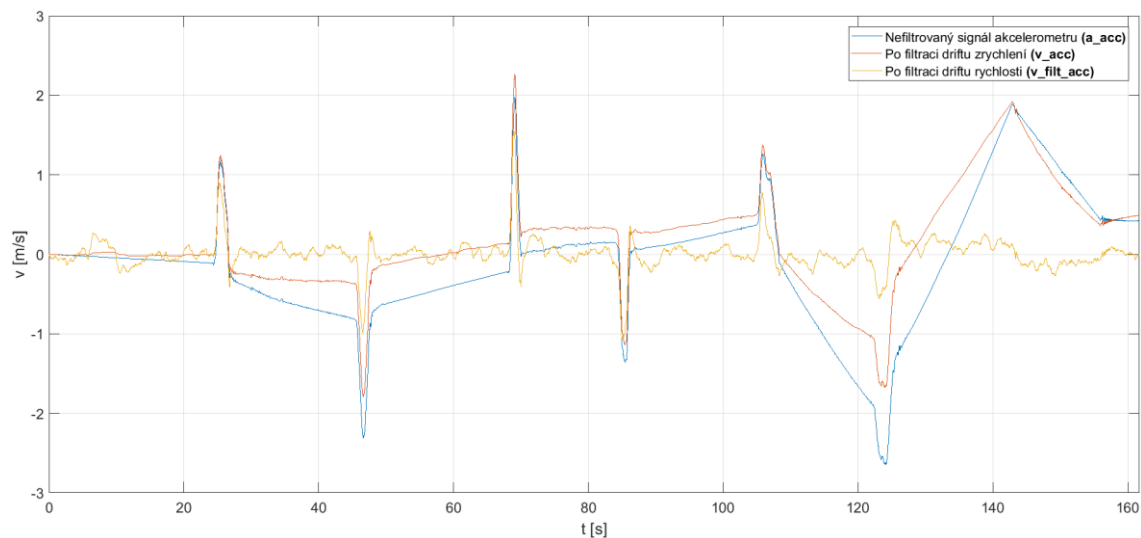
Tím je zajištěn částečný pokles driftu zrychlení (obrázek 5.12). Aby bylo možné srovnávat jednotlivé stupně filtrace, tak byl v grafu vynesena nefiltrovaný signál z akcelerometru, který byl zintegrován na rychlost (a_{acc}) a jako signál v_{acc} bylo vyneseno zrychlení po této filtraci, které bylo opět pro srovnání zintegrováno na rychlost.

5.4.2 Fúze v oblasti rychlosti

2. stupeň fúzního filtru je vyznačen v oblasti „Filtrace v oblasti rychlosti“ (obrázek 5.11). Jedná se o stejný princip jako u 1. stupně, kdy je sledována odchylka rychlosti akcelerometru od rychlosti barometru. Vypočtená odchylka je filtrována dolní propustí IIR_3 s koeficientem $\alpha_3 = 0,0005 [-]$, který byl opět experimentálně odladěn podle [11]. Filtrovaná odchylka rychlosti je potom odečtena od rychlosti v_{acc} , čímž je odstraněn drift rychlosti.

V grafu (obrázek 5.12) je výsledná vyfiltrovaná rychlost zobrazena jako signál v_{filt_acc} . Tento signál se již pohybuje okolo nulové rychlosti, ale je zatížen malým driftem způsobovaným barometrem. Nicméně, tento šum je do značné míry potlačen a zároveň bylo dosaženo odstranění driftu rychlosti akcelerometru po integraci zrychlení. V grafu jsou rozeznat oblasti, kdy bylo zařízení zvednuto do výšky 1 m v časech $t = \{25; 68; 105\}$ s a následně položeno zpět do úrovně 0 m v časech $t = \{46; 84; 122\}$ s.

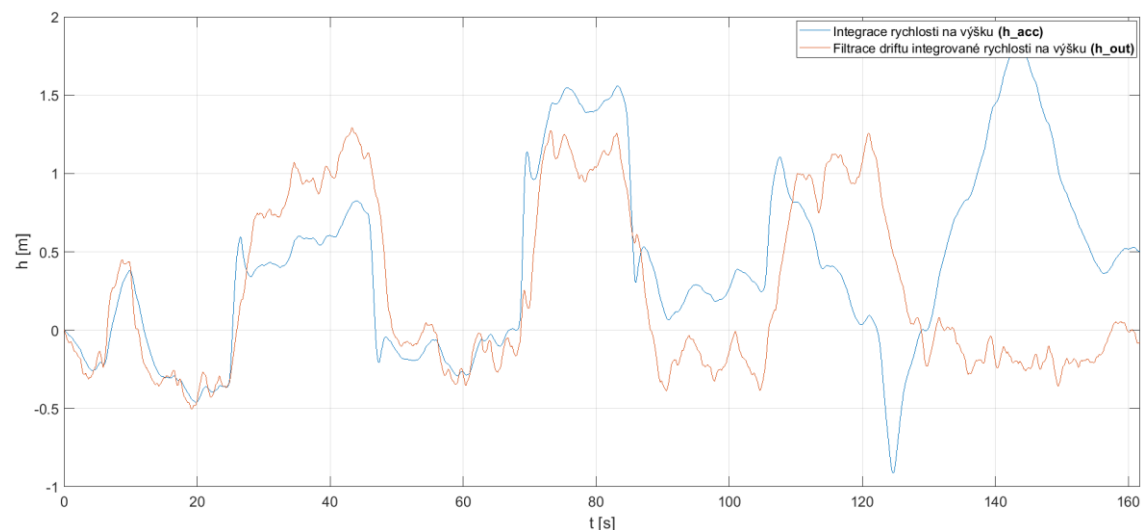
Takto zjištěná rychlost je zpožděna pouze o jednu periodu vlivem jedné integrace a drift rychlosti je filtrován se zpožděním filtru barometru. Z tohoto důvodu je výsledná rychlost vhodná pro použití v regulátoru rychlosti.



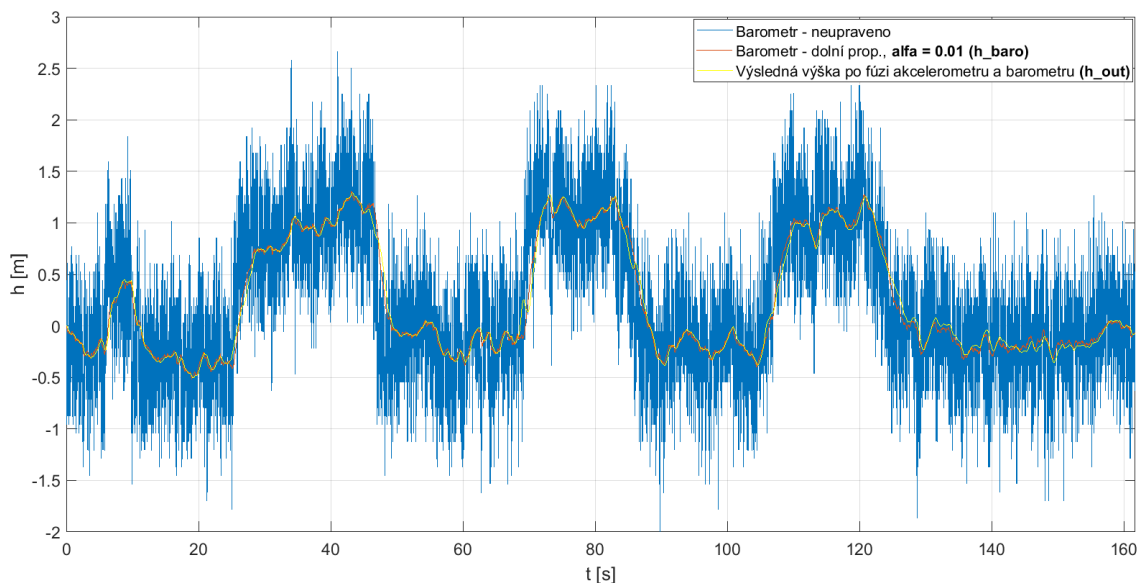
Obrázek 5.12: Fúzané zrychlení a rychlost (zrychlení z důvodu srovnání integrováno na rychlost)

5.4.3 Fúze v oblasti výšky

Oproti práci [11] byl přidán ještě 3. stupeň „Fúze v oblasti polohy“, obrázek 5.11. Jedná se opět o obdobnou filtraci jako u 1. a 2. stupně, kde byl využit filtr *IIR_4* s koeficientem $\alpha_4 = 0.002$ [-]. Tento stupeň odstraňuje drift výšky vypočtené z akcelerometru, který je způsoben integrací rychlosti na polohu, resp. výšku. Již se zde velmi výrazně projevuje zpoždění a chyba měření výšky barometrem. Po filtraci lze opět rozeznat výškové skoky 1 m v časech 25 až 46, 68 až 84 a 105 až 122 sekund (viz obrázek 5.13 a obrázek 5.14). Výsledná výška bude použita pro regulátor výšky quadrotoru.



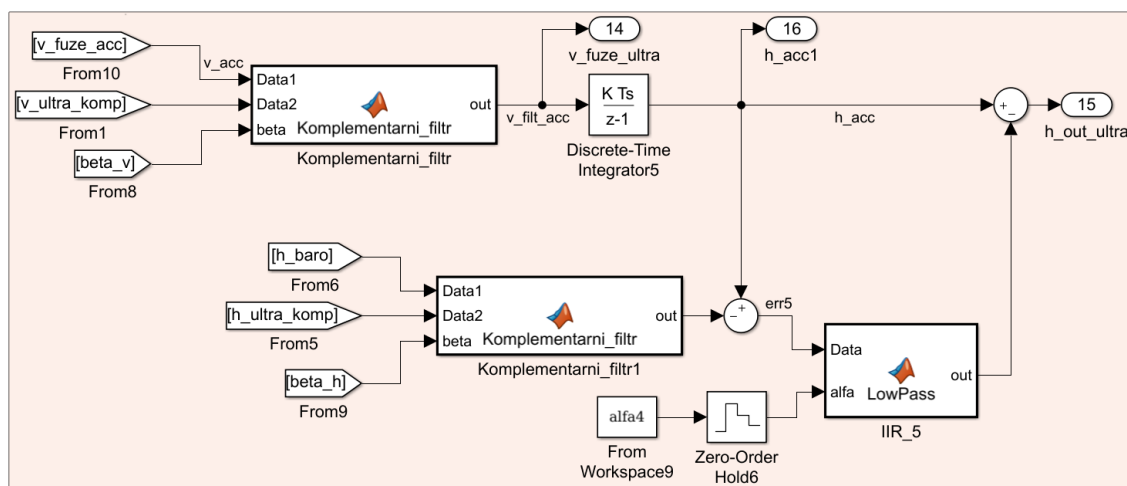
Obrázek 5.13: Fúze akcelerometru a barometru v oblasti výšky



Obrázek 5.14: Srovnání výšky z barometru a výšky po fúzi s akcelerometrem

5.5 Zpřesnění fúze snímačů pro výšku do 2 m

Výška se po fúzi akcelerometru s barometrem může pohybovat vlivem chyby měření barometru přibližně v rozsahu $\pm 0,75$ m okolo skutečné hodnoty. Tato skutečnost pro vyšší letové hladiny nepředstavuje problém, ale pro nižší je zapotřebí zpřesnit měření letové výšky. Proto bylo využito zpřesnění fúzované rychlosti i výšky pomocí ultrazvukového snímače (obrázek 5.15).



Obrázek 5.15: Simulační schéma připojující ultrazvuk k fúznímu filtru rychlosti a výšky

Zpřesnění je zajištěno využitím komplementárního filtru (6.2) v oblasti fúzované rychlosti a rychlosti ultrazvuku. V případě, že je měření ultrazvuku důvěryhodné, tak se koeficient $\beta_{v} = 0,5$ [-] a výsledná rychlost se poté skládá z 50 % z rychlosti z ultrazvuku a z 50 % z rychlosti z fúzního filtru. V opačném případě je ultrazvukový senzor potlačen a koeficient $\beta_{v} = 0,8$ [-], čímž klesne důvěra v ultrazvuk na 20 %.

V případě, že dojde ke vzdálení zařízení o více než 2 m od povrchu, dojde k úplnému odpojení ultrazvuku a jeho váha poklesne na 0 %. Výsledkem je částečná eliminace chyby zanášené barometrem (obrázek 5.16).

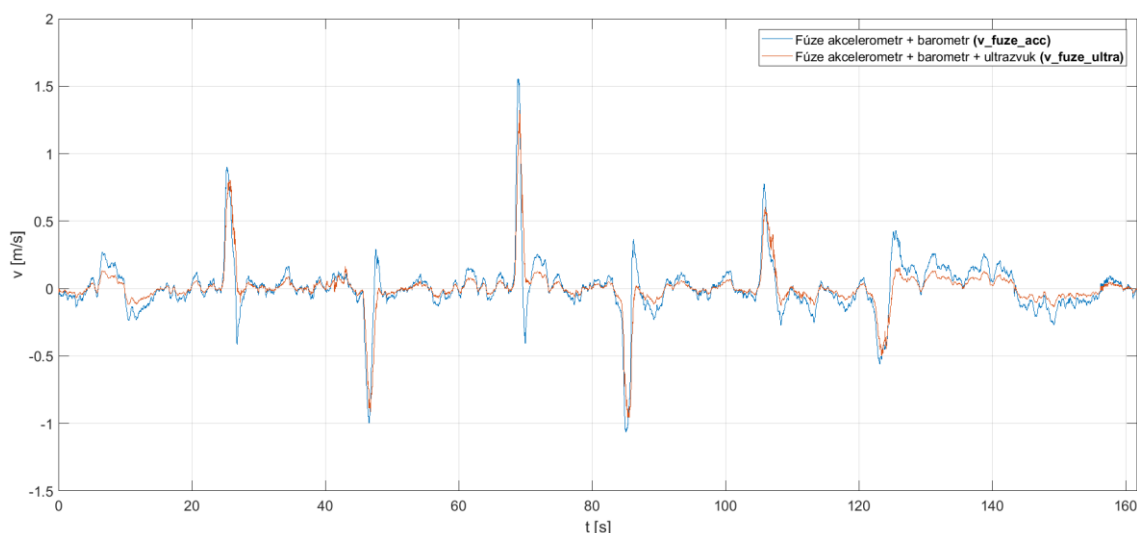
$$out = \beta \cdot Data1 + (1 - \beta) \cdot Data2 \quad (5.9)$$

out – výstupní hodnota filtru

β – koeficient filtru

Data1 – vstupní hodnota prvního signálu

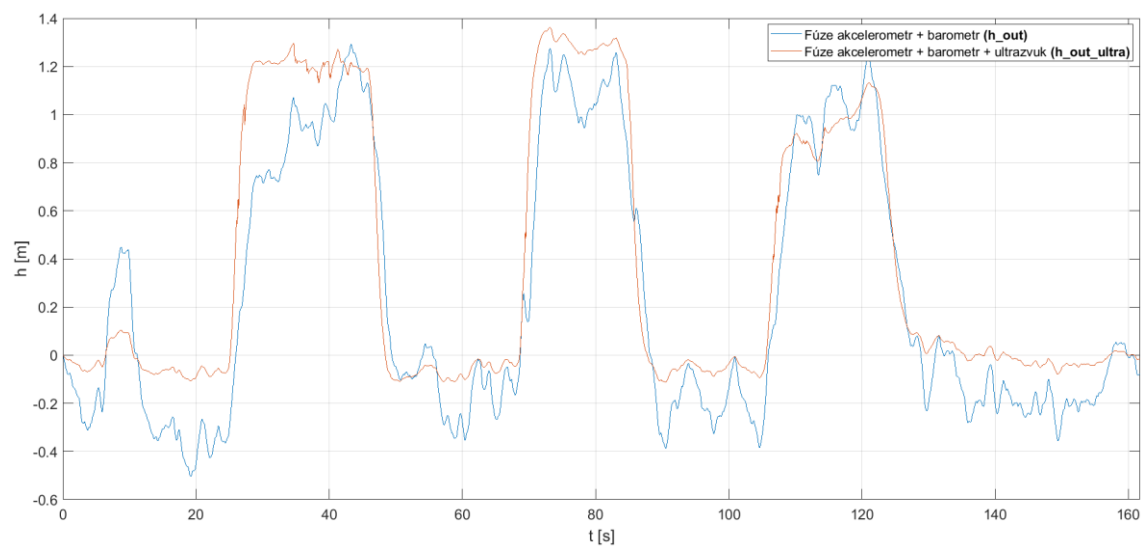
Data2 – vstupní hodnota druhého signálu



Obrázek 5.16: Zpřesnění fúzované rychlosti ultrazvukem

Stejný princip je použit i pro zpřesnění měření výšky. Pouze s tím rozdílem, že dochází ke zpřesnění výšky z barometru, která je používána k filtraci driftu výšky akcelerometru. V důsledku toho, že ultrazvuk dosahuje menšího zpoždění a vyšší přesnosti, dochází k vyhlazení a zrychlení měření (obrázek 5.17). V případě, že je ultrazvukové měření důvěryhodné, používá se z něj 70 % signálu. V opačném případě 20 %.

Výsledná chyba měřené výšky poklesne v ideálním případě pod $\pm 0,2$ m. Velikost chyby měření závisí na důvěryhodnosti snímače. Například obrázek 5.17 zobrazuje průběh h_{out_ultra} , který je výsledkem sloučení 80 % signálu h_{ultra_komp} (viz obrázek 5.10) a z 20 % se signálu h_{out} .



Obrázek 5.17: Zpřesnění fúzované výšky ultrazvukem

6 REGULACE

Se znalostí obecného matematického modelu chování quadrotoru z kapitoly 2.5 ve svislé ose, je možné sestavit simulační model v programu MATLAB a Simulink, na kterém budou navrhovány a testovány regulátory. Tento model musí být doplněn o fyzikální omezení a dynamiku konkrétního zařízení.

V této kapitole jsou stručně popsány použité regulátory a možné metody jejich nastavení. Následně jsou tyto regulátory aplikovány a nastaveny pro konkrétní regulovanou smyčku rychlosti a polohy.

6.1 Teoretický úvod

Zdroj [20].

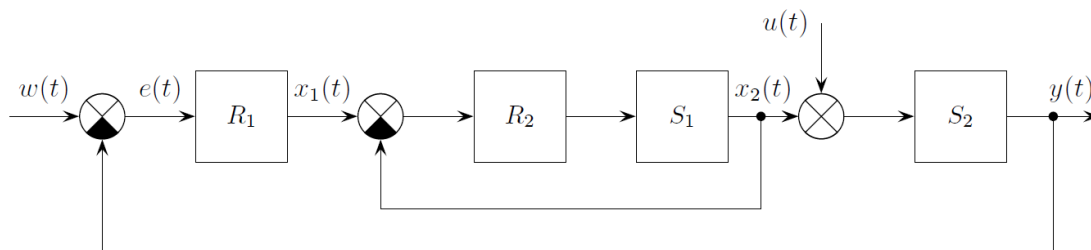
Pro regulaci výšky byl použit rozvětvený regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou, který v rychlostní smyčce obsahuje P regulátor a ve výškové PI regulátor, který je použit z důvodu dosažení nulové ustálené regulační odchylky. Parametry regulátorů byly určeny pomocí ITAE kritéria a následně byly odladěny v praxi.

Podkapitola 6.1.1 stručně popisuje použité regulátory a podkapitola 6.1.2 pojednává o principu ITAE kritéria.

6.1.1 Struktury regulátorů

Rozvětvený regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou je používán ke zlepšení kvality regulace (obrázek 6.1). Sestává z vnitřní regulační smyčky obsahující regulátor R_2 a regulovaný systém S_1 . Vnitřní smyčka je schopná reagovat bez zpoždění systému S_2 , který je regulován hlavním regulátorem R_1 . Použití vnitřní smyčky tedy zrychluje regulační děj a zároveň je schopen odstranit astatismus systému S_1 .

Jednotlivé regulační smyčky jsou seřizovány postupně od vnitřní smyčky. Většinou se podřízené smyčky nastavují tak, aby odpovídaly statickým soustavám na mezi aperiodicity. V případě potřeby je možné provádět další seřízení vnitřní smyčky s uzavřenou vnější smyčkou. [21]



Obrázek 6.1: Schéma regulačního obvodu s pomocnou regulovanou veličinou.

Zdroj [21]

Ve vnitřní smyčce je použit regulátor typu P, u kterého je akční veličina přímo úměrná regulační odchylce (6.1) vynásobené zesílením K_R . Ve vnější smyčce se nachází PI regulátor (6.2), který je schopný zajistit nulovou ustálenou odchylku, ale zároveň zpomaluje přechodný děj. I složka regulátoru je opatřena anti-windupem, který zamezuje nárůstu integrátoru nad reálné možnosti akčního zásahu motorů, což by mělo za následek zpomalení regulačního děje z důvodu nutnosti následného odintegrování I složky, která by do té doby satureovala akční člen, resp. motory. Kompletní zpracovanou teorii ohledně použitých a mnohých dalších regulátorů lze nalézt v [20] a [21].

$$F_{R(p)} = r_0 = K_R \quad (6.1)$$

$$F_{R(p)} = r_0 + \frac{r_i}{p} \quad (6.2)$$

r_0, K_R – zesílení P složky regulátoru

r_i – zesílení I složky regulátoru

6.1.2 ITAE kritérium

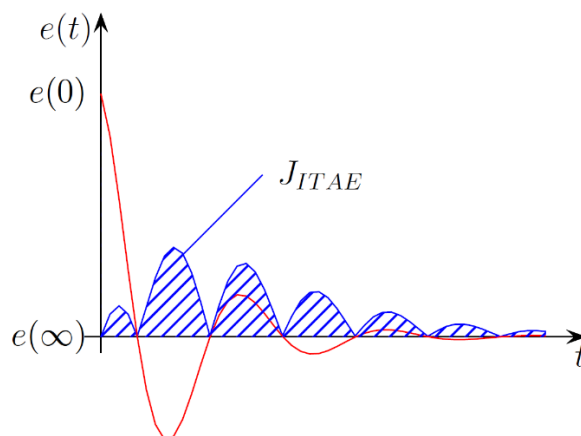
Zkratka pochází z anglického „Integral of Time multiplied by Absolute value of Error“. Jedná se o jedno z integrálních kritérií kvality regulace. Kritérium se snaží identifikovat optimální nastavení regulátoru z pohledu minimální plochy pod křivkou regulační odchylky $e(t)$, přičemž váha této odchylky narůstá lineárně s časem (viz obrázek 6.3). Kritérium je určováno z regulační odchylky získané při skokové změně žádné hodnoty. Jeho analytické řešení není možné z důvodu přítomnosti nelineární funkce absolutní hodnoty. Výpočet je uveden v rovnici (6.2) [21].

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} |e(t) - e(\infty)| t \, dt \quad (6.3)$$

J_{ITAE} – hodnota ITAE kritéria

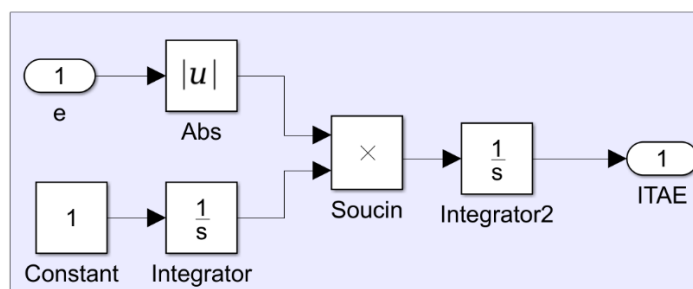
$e(t), e(\infty)$ – regulační odchylka v čase t a v čase ∞

t – čas [s]



Obrázek 6.2: Hodnota ITAE kritéria. Zdroj [21]

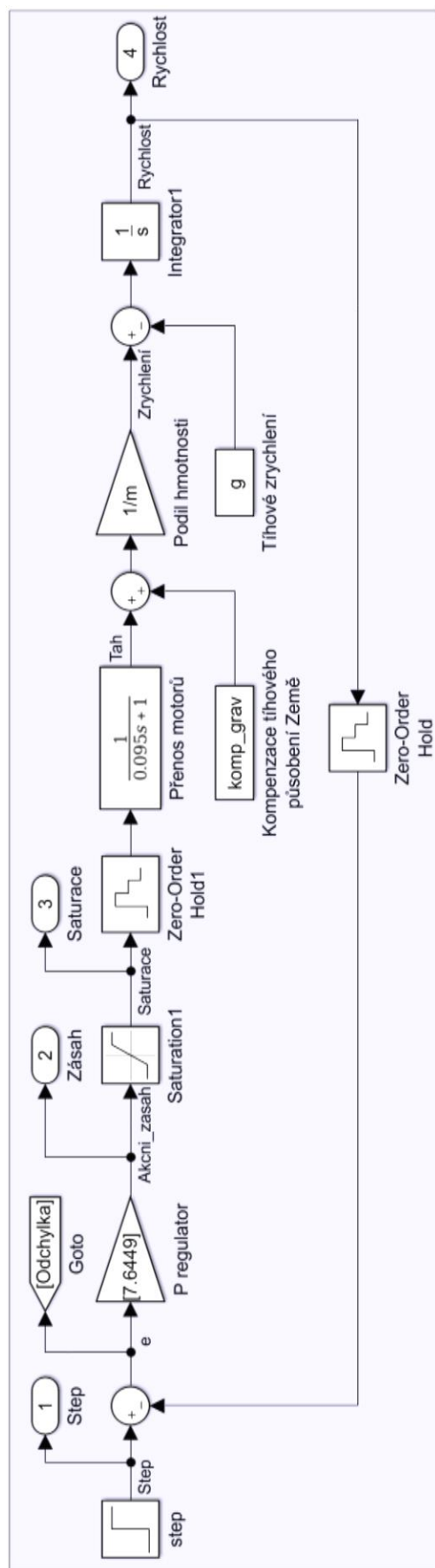
Nastavení regulátoru z hlediska ITAE kritéria se v praxi realizuje pomocí opakovaných simulací (viz obrázek 6.3 pro určení ITAE kritéria v případě nulové ustálené regulační odchylky). Výstupem je informace o závislosti ITAE kritéria na nastavení regulátoru.



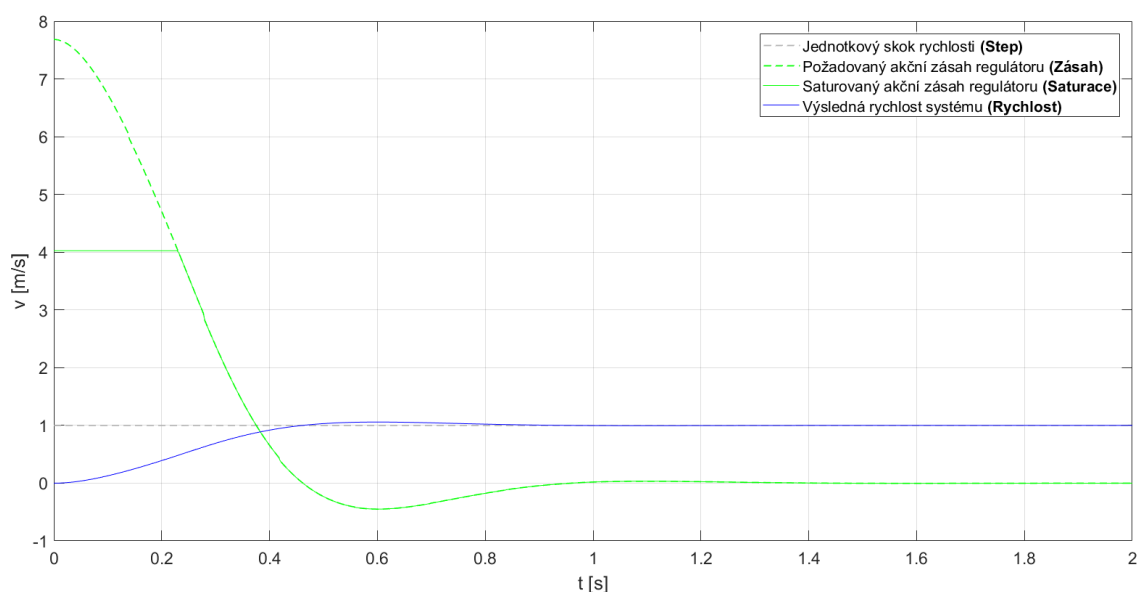
Obrázek 6.3: Simulační schéma ITAE kritéria

6.2 Návrh regulátoru rychlostní smyčky

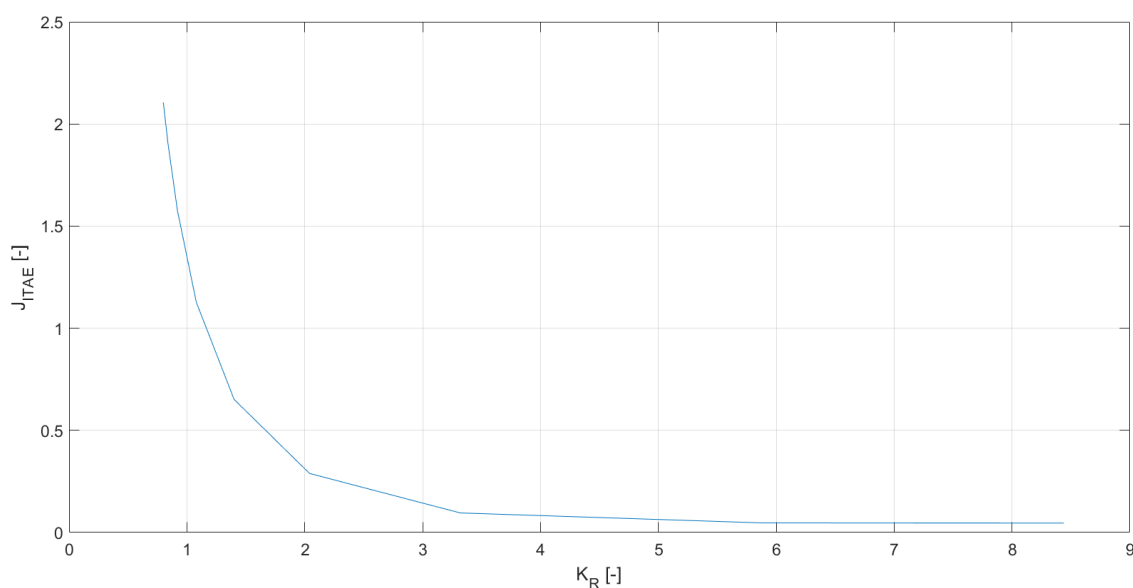
Obrázek 6.4 zobrazuje kompletní regulační schéma vnitřní rychlostní smyčky kopteru. Systém je zde regulován P regulátorem, který sleduje regulační odchylku od žádané hodnoty a na svém výstupu nastavuje odpovídající požadovaný akční zásah vynásobený jeho zesílením K_R . Akční zásah je následně omezen saturací. To je z toho důvodu, že je reálný akční zásah motorů má omezení 20 N . Z toho je přibližně 12 N zapotřebí pro vykompenzování tíhového působení Země, další $3,2\text{ N}$ jsou rezervovány pro regulaci rotačních pohybů a $0,8\text{ N}$ je rezerva. Za členem saturace je umístěn přidržovač nultého řádu, který simuluje diskrétní akční zásah číslicového regulátoru. Následuje přenos akčních členů, kterými jsou motory quadrotoru. Jejich přenos byl určen v práci [1]. K tahu motorů, který je nastavován regulátorem je připočten tah kompenzující tíhovou sílu. Dále dojde k přepočtu celkového tahu dělením hmotností quadrotoru na zrychlení, od kterého je odečítáno působící tíhové zrychlení. Tímto je získáno výsledné zrychlení, které je integrováno na rychlost a ta je diskrétně snímána ve zpětné vazbě.



Z důvodu, že tento systém není možné přivést na mez stability a použít nejjednodušší způsob nastavení regulátoru pomocí metod typu Ziegler-Nichols, byla aplikována metoda nastavení optimálního regulátoru z hlediska *ITAE* kritéria. Touto metodou byla stanovena optimální hodnota zesílení P regulátoru $K_R = 7,65 [-]$. Výsledný průběh s takto navrženým regulátorem zobrazuje obrázek 6.5, který je odezvou na jednotkový skok žádané rychlosti. Rychlostní systém by měl podle simulace dosáhnout žádané hodnoty za 0,4 s. Také si lze všimnout, že regulátor má příliš velké zesílení, kvůli kterému dochází k saturaci akčního zásahu. Pokud se zaměříme na průběh simulace závislosti *ITAE* na zesílení (obrázek 6.6), je zde vidět, že od zesílení $K_R = 4 [-]$ už hodnota příliš neklesá. To je způsobeno vlivem saturace, která se od tohoto zesílení začíná výrazně projevovat a regulační děj už nemůže dále zrychlovat.



Obrázek 6.5: Odezva rychlostní soustavy na jednotkový skok ($K_R = 7,65 [-]$)

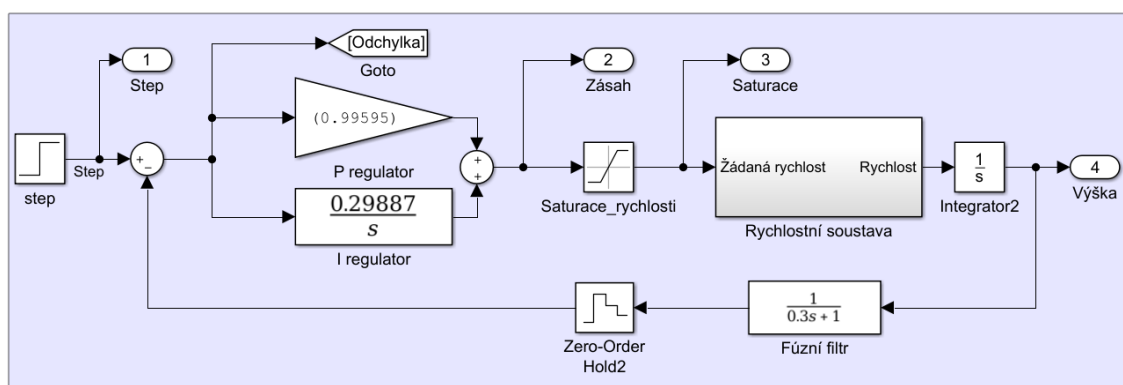


Obrázek 6.6: Závislost ITAE kritéria na zesílení P regulátoru

Laděním zesílení P regulátoru rychlostní smyčky na reálném systému bylo dospěno ke vhodnému zesílení regulátoru $K_R = 3$ [-].

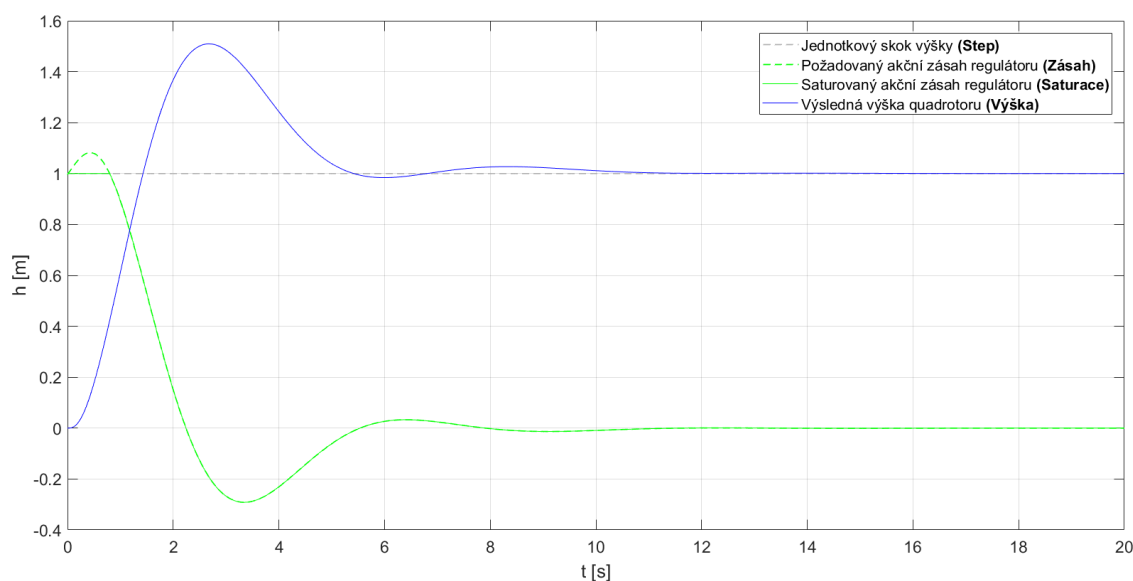
6.3 Návrh regulátoru výškové smyčky

Regulační schéma výšky sestává z PI regulátoru, který má na svém výstupu člen saturace rychlosti, která je prozatím omezena z důvodu bezpečnosti na $\pm 1 \text{ ms}^{-1}$. Žádaná rychlost vstupuje do bloku *rychlostní soustava*, která byla navržena v předcházející kapitole. Výstup rychlosti z vnitřní rychlostní smyčky vstupuje do integrátoru, kterým je integrována na výšku, která je snímána ve zpětné vazbě. Zpětná vazba obsahuje setrvačný člen, který představuje dynamiku fúzního filtru. Dále je ve zpětné vazbě přidržovač nultého řádu, který simuluje vzorkování signálu.



Obrázek 6.7: Simulační schéma regulační smyčky výšky s PI regulátorem

PI regulátor byl opět navržen s využitím ITAE kritéria. Tímto způsobem byly určeny parametry regulátoru $K_R = 1.0$ [-] a $r_i = 0,3$ [-]. Výsledný průběh výšky obsahuje překmit 50 % a žádané hodnoty je dosaženo za 1,5 s a její ustálení nastává po 5 s.



Obrázek 6.8: Odezva výškové soustavy na skok ($K_R = 1.0$ [-], $r_i = 0,3$ [-])

7 IMPLEMENTACE A TESTOVÁNÍ

Tato kapitola se věnuje implementaci a především výslednému nastavení parametrů filtrů a regulátorů, které byly odladěny na reálném zařízení. Další část je věnována popisu testování výsledného implementovaného kódu quadrotoru

7.1 Implementace do quadrotoru

Navržený fúzní filtr i rozvětvený regulátor byly přepsány do jazyka C v programu Atmel Studio. Při implementaci PI regulátoru byla I složka opatřena anti-windupem, který je realizován pomocí podmínek. Hlavní regulační smyčka kódu má kmitočet 350 Hz. Data z barometru jsou vyčítána s periodou 11,4 ms, z ultrazvuku s periodou 40 ms a z akcelerometru 2,8 ms. Simulací i reálným testováním bylo ověřeno, že vzorkování a regulační smyčka dosahují dostatečně vysokého kmitočtu a neovlivňují tedy průběh regulačního děje. Z toho důvodu bylo se systémem pracováno jako se spojitým a nikoliv jako s diskrétním systémem. Maximální tah motorů je omezen na ± 4 N a maximální rychlost letu na ± 1 ms⁻¹. Nastavování požadované výšky je řešeno tak, že při vychýlení řídicí páky na ovladači dojde k postupné inkrementaci či dekrementaci požadované letové hladiny. V Tabulkách níže jsou přehledně uvedena výsledná nastavení jednotlivých filtrů a regulátorů. Tabulka 7.2 srovnává vypočtené parametry regulátorů s výslednými parametry, které byly odladěny při testování.

Tabulka 7.1: výsledné nastavení koeficientů jednotlivých IIR a komplementárních filtrů

Filtr	α [-]	β (max) [-]	β (min) [-]
IIR_1	0,01	-	-
IIR_2	0,00004	-	-
IIR_3	0,0005	-	-
IIR_4 a IIR5	0,002	-	-
IIR_6	0,12	-	-
IIR_7	0,0003	-	-
Komplementarni_filtr	-	0,6	0,4
Komplementarni_filtr1	-	0,6	0,2

Tabulka 7.2: srovnání nastavení regulátorů ITAE kritériem a odladěných regulátorů během testování

Smyčka	K_R ITAE [-]	r_i ITAE [-]	K_R výsl [-]	r_i výsl [-]
Rychlosti	7,65	-	3,00	-
Výšky	1,00	0,30	1,00	0,30

7.2 Testování

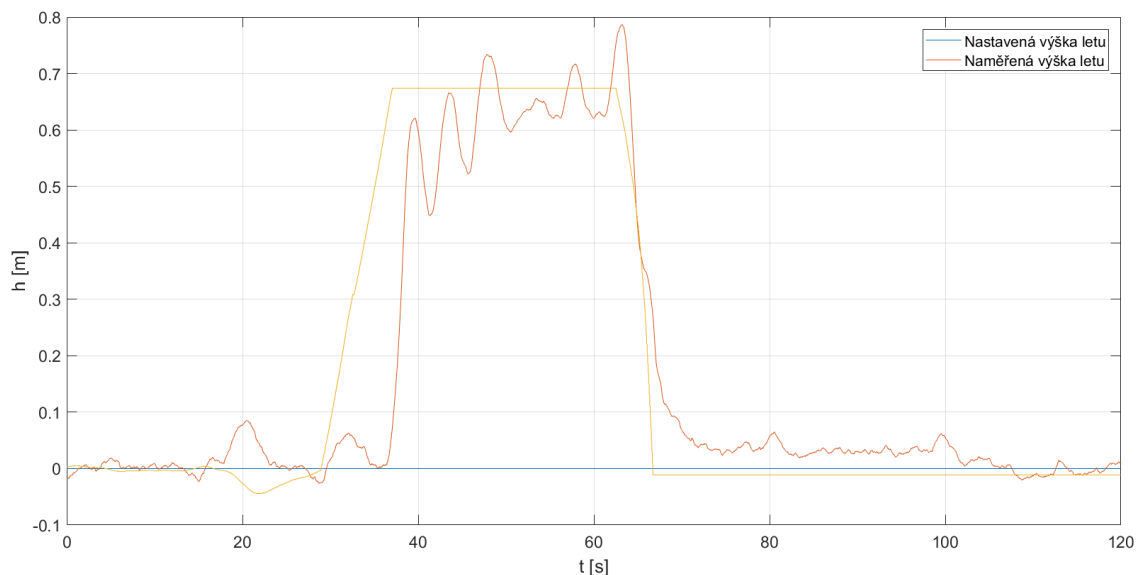
Pro účely testování stabilizace a řízení letové výšky byla vyrobena speciální testovací konstrukce, viz obrázek 7.1. Rozměry podstavy konstrukce jsou *1krát 1 m* a výška *2 m*. Uprostřed bočních stěn jsou umístěny dvě vodící tyče s lineárními ložisky, která se mohou pohybovat ve výšce *0,4 m* až *1,85 m*. Na lineárních ložiscích jsou umístěna další ložiska, umožňující rotační pohyb v jedné ose. Z těchto ložisek vedou úchytné tyče, které se připojují k ramenům kopteru. V oblasti konců rozsahu vodících tyčí jsou umístěny měkké molitanové dorazy. Ke konstrukci je připojen PC zdroj, který slouží k napájení některých částí zařízení v případě dlouhodobého ladění, ale není příliš vhodný pro napájení samotných motorů při testování letu, které mají větší nároky na příkon, než který je schopen dodat

Ve výsledku je tedy umožněn jeden rotační pohyb k testování rotace v ose *X* nebo *Y* a lineární pohyb v ose *Z*, resp. stoupání a klesání. Konstrukce zajišťuje bezpečnost při testování, protože quadrotor nemá možnost ani při nekontrolovatelném stoupání, klesání nebo rotaci narazit do země nebo jiného předmětu. Logicky je mu také zabráněno, aby nekontrolovatelně uletěl.



Obrázek 7.1: Testovací konstrukce

Funkčnost nastavení regulátorů byla ověřena při otestování na konstrukci. Záznam testování viz obrázek 7.2. Nejprve byla nastavena požadovaná výška letu $0,7\text{ m}$ a v čase 36 s byly zapnuty motory. To bylo provedeno z důvodu otestování reálné odezvy na skok žádané hodnoty. Quadrotor se dle předpokladů drží ve výšce přibližně $\pm 0,2\text{ m}$ okolo žádané hodnoty. V čase $63\text{ až }67\text{ s}$ byla plynule snižována požadovaná výška, která byla sledována quadrotorem, čímž bylo dosaženo plynulého přistání.



Obrázek 7.2: Záznam regulace výšky při reálném letu quadrotoru

8 ZÁVĚR

Úkolem první části této práce bylo navržení a realizace dálkového řízení vlastního quadrotoru. K tomuto účelu bylo využito běžně dostupné modelářské RC soupravy. Příjímač této RC soupravy byl připojen k řídicí elektronice kopteru, která byla naprogramována pro příjem řídicích signálů. Následně byla úspěšně otestována funkčnost tohoto řešení.

Dále se práce zabývá rešerší vhodných snímačů letové výšky, zpracováním naměřených dat a jejich vyhodnocením. Největší část práce je věnována filtraci a fúzi dat z jednotlivých snímačů. Pro přesné měření výšky do letové hladiny 2 m je využíváno fúze senzorů barometru, ultrazvuku a akcelerometru. Tím bylo dosaženo snížení chyby měření na přibližně $\pm 0,2$ m. V případě překročení výšky 2 m již není vhodné používat ultrazvukový snímač a proto je odpojen. Tím poklesne přesnost měření výšky na $\pm 0,5$ m. Výstupem fúzního filtru je rychlost letu a letová výška.

Následně byl vytvořen matematický model quadrotoru pro svislou osu, na který byl navržen rozvětvený regulační obvod, který na základě rychlosti letu a výšce letu zajišťuje stabilizaci letové výšky. Regulátory byly navrženy na základě ITAE kritéria.

Pro účely bezpečného testování byla vyrobena speciální konstrukce, na které bylo odladěno a otestováno nastavení jednotlivých regulátorů. Stabilizace i řízení quadrotoru se chovalo podle předpokladů a byla tedy úspěšně ověřena funkčnost použitého řešení. Z důvodu zajištění bezpečnosti nebyla funkčnost zařízení prozatím testována v reálných podmínkách mimo testovací konstrukci. Aby to bylo možné, je zapotřebí řádné otestování bezpečnosti quadrotoru, které je časově náročné a bude řešeno v budoucnu.

Také by bylo možné do budoucna uvažovat o využití dalších způsobů fúze použitých snímačů, v úvahu by přicházel například Kalmanův filtr. Dále by bylo vhodné věnovat se dalším metodám návrhu regulátorů z důvodu dalšího zvyšování kvality a přesnosti regulace letu.

Literatura

- [1] HAMÁČEK, Vojtěch. B19. Řídicí jednotka pro quadcopter [online]. Brno, 2016, 21 s. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~robotika/2016_BROB/2016_B19_quadcopter_rj.pdf. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Gábrlík.
- [2] *Camera drones and applications* [online]. Francie: Parrot Drones, c2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.parrot.com/us/#drones>
- [3] GÁBRLÍK, P. *Quadrocopter - stabilizace a regulace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 75 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [4] *European GNSS Agency* [online]. Praha: European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/>
- [5] *GPS: The Global Positioning System* [online]. Washington, D.C.: U.S. Air Force, 2018 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/policy/cooperation/>
- [6] Radio Control - PaparazziUAV. *PaparazziUAV* [online]. 2017, 2016 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: http://wiki.paparazziuav.org/wiki/Radio_Control
- [7] SRF10 Ultra sonic range finder. *Robot Electronics* [online]. Attleborough: Devantech Limited [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf10tech.htm>
- [8] STMICROELECTRONICS. *LPS25H MEMS pressure sensor: 260-1260 hPa absolute digital output barometer*. [online]. Revize 5. Ženeva, 2016, 45 s. Dostupné také z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/58/d2/33/a4/42/89/42/0b/DM00066332.pdf/files/DM00066332.pdf/jcr:content/translations/en.DM00066332.pdf>
- [9] STMICROELECTRONICS. *AN4450 Application note: Hardware and software guidelines for use of LPS25H pressure sensor*. [online]. Revize 5. Ženeva, 2016, 26 s. Dostupné také z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/a0/f2/a5/e7/58/c8/49/b9/DM00108837.pdf/files/DM00108837.pdf/jcr:content/translations/en.DM00108837.pdf
- [10] STMICROELECTRONICS. *LSM9DS1 iNEMO inertial module: 3D accelerometer, 3D gyroscope, 3D magnetometer*. [online]. Revize 3. Ženeva, 2015, 72 s. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/1e/3f/2a/d6/25/eb/48/46/DM00103319.pdf/files/DM00103319.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103319.pdf>

- [11] SUPSUKBAWORN, Thanakorn, Chin E. LIN a Hsin-Yuan CHEN. MEMS Implementation in Altitude Stabilization for Unmanned Vertical Take-off/Landing Aircraft. In: *International Journal of computer, consumer, and control (IJ3C)* [online]. Tchaj-wan: National Chin-Yi University of Technology, 2015, s. 59-66 [cit. 2018-05-16]. Vol. 4, NO. 1. ISSN 2304-2524. Dostupné z: <http://ij3c.ncuteecs.org/>
- [12] LIGOCKI, Adam. Výšková stabilizace kvadrotoru: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2015. 52 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Gábrlík
- [13] STEVEN W. SMITH. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing* [online]. 2nd edition. San Diego (Calif.): California Technical Pub, 1999 [cit. 2018-05-18]. ISBN 09-660-1766-8. Dostupné z: http://www.analog.com/en/education/education-library/scientist_engineers_guide.html
- [14] DVOŘÁK, V. Návrh číslicového filtru typu pásmová propust. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
- [15] *MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink* [online]. Natick: MathWorks, c2018 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/>
- [16] VYSOUDIL, Miroslav. *Základy fyzické geografie I: Meteorologie a klimatologie* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013 [cit. 2018-05-18]. ISBN 978-80-244-3892-4. Dostupné z: <https://geography.upol.cz/soubory/studium/e-ucebnice/978-80-244-3893-1.pdf>
- [17] MADGWICK, S. O. H., A. J. L. HARRISON a R. VAIDYANATHAN. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In: *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics* [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 1-7 [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.1109/ICORR.2011.5975346. ISBN 978-1-4244-9862-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5975346/>
- [18] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: začínáme se signály*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0200-0.
- [19] DOWNEY, Allen B. *Think stats: pravděpodobnost a statistika pro programátory: verze 1.6.0* [online]. Brno: Flow, 2014 [cit. 2018-05-19]. ISBN 978-80-905480-4-6. Dostupné z: <http://eknihy.knihovna.cz/static/files/think-stats-pravdepodobnost-a-statistika-pro-programatory.pdf>
- [20] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-730-0020-2.

- [21] BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace I* [online]. V. 1.3.6. Brno: VUT v Brně, 2017 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbmxyaXplbmlhcmVndWxhY2UxfGd4OjYxNTNlYmM0NTJjYmViZTE>

Seznam příloh

Přílohy jsou uloženy na přiloženém CD.

Příloha 1 – kompletní zdrojový kód quadrotoru.zip	(Atmel Studio 7)
Příloha 2 – zdrojové kódy simulací.zip	(Matlab R2017a)