Vysoká škola ekonomická v Praze

Fakulta informatiky a statistiky

Katedra informačních technologií

Studijní program: Aplikovaná informatika

Obor: Informační systémy a technologie

Prototyp GPS trackeru pro letecké navigační soutěže

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor diplomové práce: Bc. Lukáš Běhounek

Vedoucí diplomové práce: Mgr. et Mgr. Ing. František Sudzina, Ph.D.

Praha

květen 2020

FAKULTA INFORMATIKY A STATISTIKY

VŠE

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Prototyp GPS trackeru pro letecké navigační soutěže“ zpracoval samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury.

V Praze dne 30. dubna 2020 . . . . . .

Bc. Lukáš Běhounek

Poděkování

Děkuji panu Mgr. et Mgr. Ing. Františku Sudzinovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a poskytnutí cenných rad, kolegovi letci Ing. PhDr. Antonínu Pavlíčkovi, Ph.D. za úvodní konzultace, Ing. Jakubu Drábkovi za příležitost se rozepsat v rámci ekonomicko-historického filmového semináře. Děkuji Ing. Davidu Šibravovi za pomoc a konzultace při realizaci projektu, MgA. Luboši Louženskému za pomoc při realizaci práce, panu kolegovi Juraji Čekanovi, vynikajícímu letci a technikovi, za neustálou podporu a rady během realizace projektu a celé Letecké amatérské asociaci za krásný námět pro diplomovou práci a za vše, co mi během krátké doby dala a umožnila. Děkuji všem svým blízkým za nekonečnou podporu, pomoc a motivaci!

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je vyvinout prototyp GPS záznamového zařízení (loggeru), určeného pro použití v leteckých navigačních soutěžích. Vzhledem k současné situaci a nedostatku certifikovaných leteckých loggerů poptává Letecká amatérská asociace vývoj prototypu nového loggeru, který by splňoval veškeré požadavky pro použití v soutěžním navigačním létání v kategorii ultralehkých strojů. S ohledem na dlouhodobý cíl popularizace těchto soutěží je rovněž implementována funkcionalita odesílání polohových dat v reálném čase na vzdálený server, umožňující vizualizaci jednotlivých soutěžních letů, od čehož si Letecká amatérská asociace slibuje zpřístupnění těchto soutěží divákům.

V rámci diplomové práce je vyvíjen prototyp hardwarového zařízení, schopného polohu zaznamenávat a odesílat na vzdálený server přes mobilní sítě. Dále je realizována funkcionalita vzdáleného serveru, přijímající a ukládající polohová data, včetně komponenty pro vizualizaci jednotlivých letů na mapě.

Vývoj probíhá podle oficiálních požadavků a pravidel Mezinárodní letecké asociace tak, aby výsledné zařízení splňovalo certifikační podmínky a bylo možné jej využít v leteckých navigačních soutěžích.

V práci je využita metodika MMSP-AV a vývoj postupuje s využitím agilní metodiky Scrum.

Klíčová slova

GNSS, GPS, GPS logger, GPS tracker, letectví, letecké soutěže, sledování polohy v reálném čase, vývoj hardwaru, prototyp produktu

Abstract

The aim of this diploma thesis is to develop a prototype of a GPS-based flight recorder (logger) to be used in navigation flying. Nowadays, no flight recorders certified for use in aviation competitions are in production and organizatiations are looking for alternatives. Czech Light Aircraft Association is looking for a new type of flight recorder that would fulfill all of the aviation-specific requirements defined by sporting code for the microlight category. Moreover, one of their long-term goals is to promote aviation competitions. One of the ideas is to provide real-time flight tracking capability that is expected to attract some popularity. Therefore, newly developed prototype will be capable of sending real-time position data to remote server, allowing competition flights to be visualized.

The goal of the thesis is to develop a prototype of such device, being able to save and stream position data to remote server using mobile network. Furthermore, the remote server with database and a simple visualization component is developed.

The development is being done in accordance with Fédération Aéronautique Internationale (World Air Sports Federation) sporting code and technical requirements, so that the resulting device fulfills all of the requirements needed for certification and could be used in navigation flying competitions.

For the purpose of the thesis MMSP-AV methodology and agile Scrum are used.

Keywords

GNSS, GPS, GPS logger, GPS tracker, aviation, aviation competitions, real-time position tracking, hardware development, product prototype

Seznam obrázků

Obrázek 1 - přesnost GPS pozicování (Renfro, Stein, Boeker, & Terry, 2018) 21
Obrázek 2 - logger Flymaster (Flymaster Tracker - User Manual, 2020) 27
Obrázek 3 - Flymaster a podporované země pro 2G variantu loggeru (Flymaster Tracker - User Manual, 2020).....28
Obrázek 4 - Flymaster a podporované země pro 3G variantu loggeru (Flymaster Tracker - User Manual, 2020).....28
Obrázek 5 - nepřesně zaznamenaná trasa během testování loggeru Flymaster (Meredith-Hardy, Flymaster - Testing report, 2020) 29
Obrázek 6- logger AMOD (Data logger AMOD AGL 3080, 2020) 30
Obrázek 7 - logger AFLOS 31
Obrázek 8 - nejnovější loggery, používané LAA 32
Obrázek 9 - seznam tříd dle FAI (Fédération Aéronautique Internationale, 2020) 34
Obrázek 10 - požadavky na přesnost měření tlaku (Technical Specifications for GNSS Flight Recorders, 2019).....36
Obrázek 11 - konverze jednotek (Technical Specifications for GNSS Flight Recorders, 2019) 36
Obrázek 12 - diagram komponent 45
Obrázek 13 - diagram entit 46
Obrázek 14 - diagram aktivity - jednotlivá iterace loggeru.....47
Obrázek 15 - SIM5320 a podporované frekvence 57
Obrázek 16 - porovnání ceny SIM7600G a SIM7600G-H dle TME.eu (Verze a cena modulu SIM7600, 2020).....58
Obrázek 17 - SIM7600 a podporovaná pásma (SIM7600 datasheet, 2020) 59
Obrázek 18 - cena U-Blox LARA R2 (U-Blox LARA R2, 2020) 60
Obrázek 19 - požadavky na přesnost barometrického senzoru (Technical Specifications for GNSS Flight Recorders, 2019) 62
Obrázek 20 - Proces u ukládání dat z loggeru do databáze na serveru 67
Obrázek 21 - příprava dat k uložení do databáze, prozatimní řešení 67
Obrázek 22 - rozbalení binární struktury v Pythonu.....68
Obrázek 23 - velikost konvertovaného souboru 68
Obrázek 24 - rychlost konverze 68
Obrázek 25 - celková trasa (OpenStreetMap, 2020) 71
Obrázek 26 - detail záznamu v zalesněném údolí (OpenStreetMap, 2020) 72
Obrázek 27 - záznam v zalesněném údolí je jednoznačný (OpenStreetMap, 2020) 72
Obrázek 28 - kvalitní záznam během jízdy po dálnici (OpenStreetMap, 2020) 73
Obrázek 29 - srovnání prototypu a loggeru LAA (OpenStreetMap, 2020) 74
Obrázek 30 - rozdíl v záznamech prototypu (červená) a loggeru LAA (modrá) (OpenStreetMap, 2020).....75
Obrázek 31 - srovnání záznamu při projízdění Letenského tunelu – prototyp červeně, LAA logger modře (OpenStreetMap, 2020) 75
Obrázek 32 - obnovení záznamu po vyjetí z tunelu – prototyp červeně, LAA logger modře (OpenStreetMap, 2020).....76

Obrázek 33 – soutěžní Ekolot JK05L OK-UUS90 využitý během testování 77
Obrázek 34 – soutěžní Cessna 152 OK-JHM využitá během testování 77
Obrázek 35 - trasa Slaný – Letňany (OpenStreetMap, 2020) 78
Obrázek 36 - trasa Letňany – Břeclav (OpenStreetMap, 2020) 79
Obrázek 37 - testování na trase Břeclav – Slaný (OpenStreetMap, 2020) 80
Obrázek 38 - testování v ostré zatáčce (OpenStreetMap, 2020) 80
Obrázek 39 - záznam trasy automobilem (OpenStreetMap, 2020) 81
Obrázek 40 - detail záznamu během jízdy autem a chůze (OpenStreetMap, 2020) 81
Obrázek 41 - záznam během cestě automobilem, chůze a pojíždění letadlem na letišti Slaný (Google Maps, 2020) 82
Obrázek 42 - záznam letu ze Slaného do Milovic (OpenStreetMap, 2020) 82
Obrázek 43 - záznam letu po letištním okruhu letiště Vodochody, přistání, pojíždění a vzletu (OpenStreetMap, 2020) 83
Obrázek 44 - záznam během pojíždění na letišti Vodochody (Google Maps, 2020) 83
Obrázek 45 - záznam letu ze středy 15. 4. (OpenStreetMap, 2020) 84
Obrázek 46 - trasa letu 16. 4. 2020 (OpenStreetMap, 2020) 85
Obrázek 47 - záznam ostrých zatáček z letu 16. 4. 2020 (OpenStreetMap, 2020) 85
Obrázek 48 - záznam z prototypu (OpenStreetMap, 2020) 86
Obrázek 49 - záznam z loggeru AMOD (OpenStreetMap, 2020) 87
Obrázek 50 - záznam z loggeru LAA (OpenStreetMap, 2020) 88
Obrázek 51 - srovnání překryvu záznamu prototypu, loggeru AMOD a loggeru LAA (modrá, zelená a červená křivka) (OpenStreetMap, 2020) 89
Obrázek 52 - srovnání záznamu loggerů po vletu z letiště Kladno (OpenStreetMap, 2020) 90
Obrázek 53 - srovnání záznamů během letu (OpenStreetMap, 2020) 90
Obrázek 54 - srovnání záznamů během letu (OpenStreetMap, 2020) 91
Obrázek 55 - srovnání záznamů během letu (OpenStreetMap, 2020) 91
Obrázek 56 - srovnání záznamů na letištním okruhu letiště Slaný (OpenStreetMap, 2020) 92
Obrázek 57 - odchylky záznamů během ostřejší zatáčky (OpenStreetMap, 2020) 92
Obrázek 58 - ostrá zatáčka - srovnání prototypu, AMOD, LAA loggeru a mobilního telefonu iPhone XS (modrá, červená, zelená, fialová) (OpenStreetMap, 2020) 93
Obrázek 59 - Tabulka závislosti teploty, tlaku a výšky dle standardní atmosféry ISA 95
Obrázek 60 - plánek letiště Slaný (Řízení letového provozu České republiky, 2017) 97
Obrázek 61 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky 98
Obrázek 62 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky 98
Obrázek 63 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky 99
Obrázek 64 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky 100
Obrázek 65 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky 100
Obrázek 66 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky 101
Obrázek 67 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky 101
Obrázek 68 - záznam ze serveru 103
Obrázek 69 - záznam z loggeru 104
Obrázek 70 - záznam je po opravě plynulejší 104
Obrázek 71 - odchylka pozic při stacionárním testu 105
Obrázek 72 - nastavení přístupového bodu pro internet 112
Obrázek 73 - získání IMEI 112
Obrázek 74 - metody odesílání záznamů na server 113

Obrázek 75 - struktura ukládaných dat 114
Obrázek 76 - doposílání nedoručených záznamů 115
Obrázek 77 - jednotkové testy.....116
Obrázek 78 - vizualizace trati v mapě pomocí Google Maps - Polyline.....117
Obrázek 79 - konverze binárních záznamů z interního úložiště do formátu IGC 118

Obsah

Seznam obrázků 1
Obsah 4
Slovník pojmů 6
TEORETICKÁ ČÁST 8
1 Úvod 9
2 Shrnutí výsledku práce 11
3 Fáze Zahájení dle MMSP-AV 13
3.1 Business požadavky 13
3.2 Životní cyklus vývoje 15
3.3 Celoživotní náklady produktu 16
3.4 Model vývoje 20
3.5 Pozicování v 3D prostoru 21
3.6 Určování přesného času 22
3.7 Bezdrátová datová komunikace 22
3.8 Průzkum existujících řešení 22
PRAKTICKÁ ČÁST 23
4 Fáze Rozpracování dle MMSP-AV 25
4.1 Plán práce 25
4.2 Přehled současně využívaných řešení 26
4.3 Sběr požadavků na výsledné zařízení 33
4.4 Souhrnné požadavky na prototyp 44
4.5 Diagram komponent 45
4.6 Architektura firmwaru 46
4.7 Server pro přijímání dat z loggerů 49
4.8 Způsob testování prototypu 50
4.9 Mobilní frekvence využívané v zemích světa 53
4.10 Product increment 1 – sběr požadavků 54
5 Fáze Konstrukce dle MMSP-AV 56
5.1 Výběr hardwaru 56
5.2 Product increment 2 – minimální funkční řešení 64
5.3 Product increment 3 – testování a optimalizace 66

5.4 Product increment 4 – finalizace prototypu 94
ZÁVĚR 106
6 Fáze Zavedení dle MMSP-AV 108
7 Závěr a další rozvoj 109
8 Ukázky kódu 111
8.1 Připojení k internetu 111
8.2 Získání identifikátoru zařízení IMEI 112
8.3 Metody pro posílání záznamů na server 113
8.4 Struktura ukládání dat do úložiště 114
8.5 Doposlání nedoručených záznamů 115
8.6 Prováděné jednotkové testy 116
8.7 Vizualizace na mapě 117
8.8 Konverze záznamů z interního úložiště do IGC 118
Reference 119

Slovník pojmů

AeČR – Aeroklub České republiky

Barometrická (tlaková) výška – nadmořská výška spočítaná dle aktuálního tlaku dle ISA

FAI - Fédération Aéronautique Internationale – Mezinárodní letecká asociace

FAI CIMA – FAI Commission Internationale de Micro-Aviation – komise FAI pro ultralehké létání

FAI GAC – FAI General Aviation Commission – komise FAI pro všeobecné letectví

FLARM – systém využívaný v letectví pro prevenci kolizí, akronym pro „flight alarm“

FL – flight level – letová hladina, nadmořská výška letu ve násobcích stovek stop, počítá se dle standardního tlaku ISA¨

GA – General Aviation – všeobecné letectví

GNSS – Global Navigation Satellite System – globální družicový polohový systém

GPS – Global Positioning System - globální polohový systém

GPS Fix – GPS polohové informace pro daný bod a čas (součást NMEA informace)

GPS výška – nadmořská výška měřená podle GPS

HTTP – Hypertext Transfer Protocol – internetový protokol určený zejména pro komunikaci s webovými servery

ICAO – International Civil Aviation Organization - Mezinárodní organizace pro civilní letectví

IoT – Internet věcí – zejména jednoduchá zařízení vybavená internetovou konektivitou

ISA – tzv. standardní atmosféra, používaná v letectví

LAA – Letecká amatérská asociace České republiky

METAR – pravidelná meteorologická zpráva, používá se v letectví

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport – zjednodušený komunikační protokol časo používaný v IoT zařízeních

NMEA 0183 – standardizovaný formát využitý mj. pro komunikaci přijatých GPS dat

PI – product increment - jedna z komponent agilní metodiky Scrum

QNH – atmosférický tlak přepočtený na střední hladinu moře, používá se v letectví

SQL – structured query language – standardizovaný dotazovací jazyk, využívaný zpravidla pro práci s daty v relačních databázích

TCP – Transmission Control Protocol – protokol transportní vrstvy využívaný v internetu

UTC – Universal Time Coordinated – koordinovaný světový čas, standard v letectví

UL – ultralight

Vztažný bod letiště – stanovená zeměpisná poloha letiště, je vyznačena na mapě letiště

WGS-84 – světový geodetický referenční systém, používaný v systému GPS

2G, 3G, 4G sítě – mobilní sítě druhé, třetí a čtvrté generace

TEORETICKÁ ČÁST

1 Úvod

Letecká amatérská asociace České republiky (LAA) a její Svaz ultralehkého létání pravidelně pořádá navigační soutěže a mistrovství České republiky v ultralehkém létání. Tyto soutěže se skládají z navigačních a technických disciplín. Navigační disciplíny jsou založeny mj. na přesném obletu zadané soutěžní trati, a to jak místně, tak časově. Pro účely vyhodnocení přesnosti průletu trati se historicky využívalo rozhodčích, kteří na byli přítomni na kontrolních bodech a zaznamenávali průlet konkrétního letadla spolu s časem, kdy letadlo protnulo daný bod/úsečku. S rozšířením satelitního určování polohy se od rozhodčích přešlo k záznamu trasy letu pomocí systému GPS. Soutěžící má během letu v letadle zapisovač polohy (tzv. logger) a na základě jeho záznamu je poté soutěžní let hodnocený.

V porovnání s jinými leteckými disciplínami jsou navigační soutěže divácky výrazně méně atraktivní. Letadlo vzlétne k soutěžnímu letu, zmizí z dohledu, určitou dobu letí, vrátí se a přistane. Divácky atraktivní jsou tak pouze vzlety a přistání, při kterém se většinou soutěží v přesnosti přistání, což bývá divácky nejzajímavější část soutěžního letu. Během samotného navigačního letu nemají diváci o soutěžících posádkách jakékoli zprávy a nemohou sledovat průběh. Řešením je možnost tzv. live trackingu, tedy sledování polohy v reálném čase, kdy by diváci mohli sledovat jednotlivé soutěžní lety v porovnání s trasou, kterou mají soutěžící sledovat. Tato technologie byla pilotně provozována na mezinárodní úrovni v rámci mistrovství světa Air Navigation Race v Portugalsku v září roku 2019, kde jsem byl jako soutěžící přítomen a kde opravdu došlo k tomu, že se diváci i ostatní soutěžící (kteří již let měli za sebou) shromáždili v hangáru, kde byly soutěžní lety promítány na plátno. Na základě těchto informací se zdá, že zavedení live trackingu je cesta k zatraktivnění leteckých navigačních soutěží.

Letecká amatérská asociace pořádá v roce 2020 mistrovství světa v ultralehkém létání na letišti Hosín u Českých Budějovic. Jelikož Česká republika je země s dlouhou a slavnou leteckou tradicí, chce LAA mistrovství zatraktivnit a otevřít divákům. I proto poptává možnost použití loggeru s možností live trackingu, díky čemuž by bylo možné lety ukazovat a v optimálním případě i skórovat v reálném čase. Vůbec poprvé v rámci mezinárodní ultralehké soutěže. Jediné takové aktuálně dostupné řešení je logger Flymaster, použitý i na výše zmíněném mistrovství světa Air Navigation Race. Jeho zásadní nevýhoda je však nespolehlivost, která vyplynula z testování ultralehké komise FAI CIMA v rámci mezinárodní letecké asociace FAI. Flymaster byl pro použití velmi nepřesný, zaznamenaná poloha byla s velkou odchylkou od trasy skutečné, či se projevil problém s nepřesným dopočítáváním chybějících pozic v případě chvilkového výpadku GPS příjmu. Z tohoto důvodu nebyl komisí FAI CIMA certifikován, z čehož vyplývá, že logger Flymaster není možné používat v rámci oficiálních leteckých soutěží v kategorii ultralehkého létání.

Předsednictvo svazu ultralehkého létání pod Leteckou amatérskou asociací tak poptává technologii, schopnou zaznamenávat polohu a kontinuálně ji odesílat na vzdálený server za účelem projekce soutěžních letů v reálném čase. Na základě předchozí spolupráce s vývojem

loggerů pro ultralehké soutěže pod LAA jsem byl předsednictvem osloven ohledně vývoje prototypu řešení s podporou této technologie.

Cílem práce je vyvinout funkční prototyp takového řešení. Pro vývoj bude využita metodika MMSP-AV, vyvíjená na FIS VŠE.

2 Shrnutí výsledku práce

V rámci této diplomové práce byl vyvinut prototyp GPS záznamového zařízení, které je schopno v reálném čase odesílat polohová data na vzdálený server pomocí mobilní sítě. Tato polohová data je možno v reálném čase zobrazovat na mapě.

Vyvinutý prototyp splňuje požadavky Mezinárodní letecké asociace, Letecké amatérské asociace i Aeroklubu České republiky pro použití v leteckých navigačních soutěžích ve třídách ultralehkého létání a všeobecného letectví.

Funkcionalita zařízení byla otestována během pozemních i letových testů, které potvrdily jeho přesnost a spolehlivost. V následujících měsících bude zařízení testováno během navigačních soutěžích pořádaných Leteckou amatérskou asociací ČR a Aeroklubem České republiky.

V projektu je využívána metodika MMSP-AV, vyučovaná na Vysoké škole ekonomické v Praze, vývoj probíhá dle agilní metodiky Scrum. Projekt byl započat na podnět Letecké amatérské asociace. Nejprve byla provedena analýza současného stavu a dostupných řešení, následovaná sběrem požadavků na výsledné zařízení a jeho prototyp. Byl vytvořen souhrn kritérií, které prototyp musí splňovat, včetně testovacích scénářů. Byla navržena architektura jednotlivých komponent kýženého výsledku a navržena funkcionalita softwaru.

Prototyp zařízení byl podroben rozsáhlým testům a to jak pozemních, tak letových. Na jejich základě byla funkcionalita laděna a optimalizována. K datu odevzdání diplomové práce existuje funkční prototyp, schopný v reálném čase odesílat přesná polohová data na vzdálený server, který je ukládá a vizualizuje.

Zařízení se skládá z komponent pro pozicování pomocí GPS, pro komunikaci prostřednictvím mobilní sítě, z modulu pro měření tlaku, interního paměťového úložiště, displeje a centrální jednotky. Zařízení je navrženo s ohledem na předpokládaný dlouhodobý provoz. Naplňuje požadavky pro použití v celosvětovém rozsahu v dlouhodobém časovém horizontu, podporuje široké spektrum frekvencí a druhů mobilních sítí včetně sítí typu 4G. Výsledné zařízení předpokládá snadnou opravitelnost za účelem minimalizovat plýtvání, jeho součásti, u kterých se předpokládá vyšší riziko poškození, jsou vyměnitelné.

Sekce 1

Zahájení

3 Fáze Zahájení dle MMSP-AV

V práci je využívána metodika MMSP-AV, vyučovaná na VŠE (Metodika MMSP-AV, 2020). Během první fáze, zahájení projektu, byl proveden sběr business požadavků a průzkum již existujích řešení a možností. Byly sesbírány dílčí požadavky na základě již definovaných pravidel a speficikací a dále kontaktovány kompetentní osoby pro případné doplnění. Cílem první fáze bylo co nejlépe připravit podklady pro průběh projektu a prozkoumat dílčí faktory podrobně tak, aby byly minimalizovány změny v průběhu vývoje. Kvalitní přípravou byl zajištěn hladký průběh projektu.

3.1 Business požadavky

Základním požadavkem na zařízení je schopnost přijímat GNSS signál s dostatečnou přesností a následné zpracování v reálném čase. Příjem GNSS signálu musí být v dostatečné síle a logger musí být schopen zaznamenávat polohu a výšku v intervalu jedné sekundy. Záznam musí být ukládán do interního datového úložiště loggeru a dále odesílán na server přes mobilní datové připojení. Vzdálený server bude data přijímat a ukládat do databáze, zároveň bude existovat možnost data vizualizovat na mapě. Logger bude vybavený displejem, zobrazujícím aktuální čas v UTC, a aktuální stav průběhu zaznamenávání spolu s ukazatelem stavu baterie.

Jelikož dlouhodobým výsledkem má být vývoj certifikovaného zařízení pro soutěžní létání, použitého jak v rámci mistrovství světa organizovaného Leteckou amatérskou asociací, tak v rámci následných lokálních navigačních soutěžích, musí splňovat požadavky mezinárodní letecké asociace FAI pro soutěžní ultralehké létání. Pro co nejlepší splnění požadavků i mezinárodní letecké asociace byla kontaktována zodpovědná osoba ve FAI CIMA, se kterou má být vývoj prototypu diskutován a která poskytne případné další informace a požadavky na funkčnost zařízení, které budou během vývoje zohledněny.

S ohledem na fakt, že logger Flymaster byl použit i na mezinárodních závodech v kategorii všeobecného letectví, budou zohledněny nejen požadavky ultralehkého létání, ale i požadavky všeobecného letectví tak, aby výsledné řešení mohlo být certifikováno a používáno i v této kategorii.

Možné přizpůsobení pro kategorii bezmotorového létání není zvažováno z důvodu přílišné komplexity (vyžaduje se například analýza zvuků a detekce spuštění pomocného motoru či implementace systému FLARM) a násobně větší konkurence (IGC Approvals for GNSS Flight Recorders, 2020).

3.1.1 Zainteresované strany

Logger je vyvíjen na podnět Letecké amatérské asociace České republiky a tedy především pro její účely. Na základě komunikace s Leteckou amatérskou asociací tedy budou postupně upřesňovány požadavky to i během vývoje. Kontaktními osobami jsou předseda svazu ultralehkého létání pan Ing. Mgr. Jiří Nečas společně s Ing. Petrem Jonášem, zodpovědným za organizaci soutěžního létání a organizátorem nadcházejícího mistrovství světa v ultralehkém létání 2020 na letišti Hosín v České republice, Bc. Markem Velátem, vedoucí rozhodčích a předsedou sportovní komise a Jurajem Čekanem, zodpovědným za technické záležitosti, pod které spadá i vývoj loggerů.

Druhou zainteresovanou stranou je komise pro ultralehké létání pod mezinárodní leteckou asociací, FAI CIMA. Tato projevila prostřednictvím prezidenta Wolfganga Lintla a předsedy subkomise pro soutěžní záznamová zařízení Richarda Meredith-Hardyho zájem o spolupráci při vývoji nového typu loggeru. FAI CIMA loggery certifikuje a schvaluje pro soutěžní létání, proto bude vývoj loggeru řešen v úzké spolupráci.

Další stranou, která o vývoj nových loggerů projevila zájem, je Aeroklub České republiky prostřednictvím šéfrozhodčího a organizátora navigačních soutěží pana Martina Hřivny.

Logger je vyvíjen především na základě podnětů a požadavků Letecké amatérské asociace České republiky, při respektování a v největší možné míře plnění požadavků ostatních zainteresovaných stran a samozřejmě za splnění všech oficiálních pravidel a požadavků, daných pro letecké navigační soutěže v rámci ultralehkého a všeobecného letectví.

3.2 Životní cyklus vývoje

Vývoj prototypu vychází z metodiky MMSP-AV, odvozené od metodiky OpenUP a používané na FIS VŠE (Metodika MMSP-AV, 2020). Metodika rozlišuje čtyři dílčí části projektu – Zahájení, Rozpracování, Konstrukce a Zavedení – a popisuje jednotlivé úlohy, realizované v každé z těchto částí. Úlohy v jednotlivých fázích lze z hlediska metodika MMSP-AV popsat následovně.

3.2.1 Fáze Zahájení

Během fáze Zahájení budou definovány základní požadavky na prototyp záznamového zařízení a provedeno základní rozplánování projektu a analýza technického přístupu.

3.2.2 Fáze Rozpracování

V následné fázi Rozpracování bude proveden průzkum požadavků na vyvíjený logger, včetně řešerše existujících pravidel a specifikací. Na základě definovaných požadavků bude navržena základní architektura řešení včetně testovacích scénářů.

3.2.3 Fáze Konstrukce

Během fáze Konstrukce bude v jednotlivých iteracích, skládající se vždy z vývoje přírůstku řešení, testování a optimalizace, zkonstruován prototyp loggeru splňující dané požadavky. Bude provedeno testování funkčnosti a vyvinuty i všechny dílčí komponenty. Výsledkem fáze Konstrukce bude funkční prototyp, splňující vstupní požadavky.

3.2.4 Fáze Zavedení

Během fáze Zavedení již bude vyvinutý funkční prototyp, určený k prezentaci a dlouhodobému testování. Během provozu prototypu budou sbírány požadavky na vývoj ostré verze a analyzovány možnosti dalšího rozvoje a vylepšení. Fáze Zavedení již nebude v rámci této diplomové práce plně pokryta. Na tuto fázi

3.3 Celoživotní náklady produktu

Z pohledu celoživotních nákladů se životní cyklus produktu dá rozdělit do několika částí, přičemž pro každou fázi je vhodno analyzovat a případně vyčíslit možné náklady (Dhillon, 2010).

V případě GPS loggeru je první fází vývoj prototypu a demonstrace funkčnosti. Druhou fází je sestavení a sériová výroba produkční verze, která by mohla být využívána v leteckých navigačních soutěžích a komerčně distribuována. Rovněž je, v rámci třetí fáze, nutno myslet na servis již provozovaných zařízení, stejně jako na možnosti vyřazení z provozu a recyklace zařízení.

3.3.1 Prototypování

V rámci prototypování jsou náklady na výrobu relativně nízké. Prototyp používá provizorní zapojení i konstrukci a předpokládá se jeho snadná dostupnost a opravitelnost. Dají se očekávat vyšší náklady na jednotlivé konkrétní součásti, jelikož v případě objednávky jen několika kusů součástky není možné využít množstevních slev. Tyto by však vzhledem k nákladům na celkové vývojové práce neměly být signifikantní. S ohledem na předpokládaný budoucí další rozvoj produktu je již od začátku vývoje myslet na podobu finální verze a vyvíjet se zohledněním i předpokládaných požadavků. Následné případné prodloužení fáze prototypování a více práce, odvedené na prototypu, bude znamenat méně budoucích změn.

Ve fázi prototypování tedy budou zohledněny požadavky na funkcionalitu případné produkční verze loggerů. Je též vhodné již v prvotní fázi využít součástek, které splňují všechny požadavky pro budoucí využití a budou moct být využity i v produkční verzi, čímž se ušetří budoucí náklady na jejich změnu. V prvotní fázi je též záhodno počítat i s konstrukčním řešením produkční verze a například minimalizovat počet jednotlivých součátek za účelem zmenšit výsledné řešení.

Limitem pro prototypování je omezený počet měsíců, určených na vývoj, a omezený počet pracovních kapacit, stejně jako zájem zadavatele práce na rychlé dodání funkčního prototypu, pročež budou v některých případech muset být akceptována řešení neoptimální, avšak aktuálně ekonomicky výhodná. V případě větší kapacity na prototypování a vývoj prvotní verze by pravděpodobně bylo možné ušetřit náklady na produkci finální verze, u které je naopak nutno počítat s trhem, omezeným konečnou poptávkou po tak specifickém produktu, jako jsou loggery pro letecké navigační soutěže. Ekonomicky je tedy nutno hledat optimální řešení z hlediska nákladů na vývoj produktu, nákladů na jeho produkci a předpokládaných příjmů na omezeném trhu.

3.3.2 Produkční verze

Vývoj produkční verze je přímo závislý na úspěšnosti prototypování. Nákladově platí, že pokud již ve fázi prototování bude počítáno s finální podobou produktu a podle toho je vyvíjen i prototyp, transformace z prototypu do produkčního zařízení by měla být méně náročná a vyžadovat méně změn. Jelikož funkcionalita loggeru a výběr potřebných elektronických součástek se předpokládá již v rámci prototypu a již během prototypování byla většina požadavků vyřešena, ušetří tato investice náklady během výroby produkční verze.

Před výrobou je nutno vyřešit konstrukční otázky – jak bude výsledné zařízení vypadat, jakým způsobem bude sestavené, zda bude využívat modulární konstrukce z oddělených komponent, jednotné na míru vyrobené desky, či kombinace. Je nutno vyřešit obal loggeru a napájení, případně nabíjení. Odolnost konstrukce je vhodné podrobit zátěžovému testování oproti scénářům, které mohou nastat za provozu. Zejména se jedná o rány způsobené pády či nárazy, vliv vibrací během používání za letového provozu či vliv přetížení a prudkých obratů.

Do produkční varianty bude rovněž nutno dotáhnout i vzdálený server, vyřešit zejména otázky jeho uživatelské použitelnosti a bezpečnosti. Dále, s provozem loggerů, budou vznikat náklady jeho na údržbu a případné opravy či vylepšení. S ohledem na jednoduchou škálovatelnost výsledného řešení a potřebu vysoké dostupnosti serveru, kdy server je nutná komponenta a předpokládá se její bezproblémovost, se nabízí využití cloudových služeb, které tyto vlastnosti poskytují. S cloudovými službami kromě jednoduché či plně automatické škálovatelnosti, vysoké dostupnosti a platbou na bázi využitých prostředků přichází i minimalizace nákladů na provoz systému a prakticky odpadá nutnost pravidelné administrace, čímž se minimalizuje potřeba lidské práce, kterou je možno investovat konstruktivnějším směrem.

V rámci provozování je rovněž nutno počítat jak se servisem během záruční doby i mimo ní, a s tím spojenými náklady. Je nutno mít k dispozici zásobu náhradních dílů i nových loggerů, určených k vyřizování případných reklamací. Nové loggery je záhodno mít vyrobené na skladě za účelem vyřizování nových objednávek, případně mít optimalizovaný proces výroby tak, aby bylo možné vyrobit nový kus v krátkém čase, přijatelném zákazníkem. S logistikou loggerů se pojí i náklady na dopravu.

Kromě nákladů na provoz serveru se předpokládají i náklady na provoz a podporu výsledných zařízení. Přímým nákladem bude nutnost platby za využívání datových přenosů. Tyto lze samozřejmě přefakturovávat výslednému uživateli, s čímž se pojí administrativní náklady a nutnost poskytování podpory. Příjmy za provoz loggerů zde budou možné buď formou dlouhodobého paušálního poplatku bez ohledu na jejich využití, platby pouze za dobu používání loggeru na krátkodobé bázi, či platbu za objem využitých služeb. S každou z těchto variant jsou spojeny i administrativní náklady.

Nutno je počítat i s náklady na prezentaci loggerů a marketing.

3.3.3 Ukončení provozu, oprava, recyklace

Je preferována snadná servisovatelnost a pokud možno maximalizace životnosti výsledného zařízení, které touto myšlenkou podporuje evropskou iniciativu „práva na opravu“[1] (Evropská komise, 2020). Je záhodno maximalizovat vyměnitelnost jednotlivých součástí, zvláště pak těch, u kterých se dá předpokládat vyšší riziko poškození během provozu, jako jsou například antény nebo displej. Tyto by měly být navrženy s ohledem na jednoduchou budoucí vyměnitelnost a minimalizaci plýtvání. Jako důsledek tohoto bodu se využívá využití rozšířených a běžně dostupných součástí, u kterých lze očekávat dostupnost i v horizontu následujících let.

Výsledné zařízení bude využívat standardních a recyklovatelných elektronick ých součástí. Obal a vnitřní konstrukce budou vyrobeny z recyklovatelného plastu v rámci snahy o minimalizaci odpadu a plýtvání energií.

3.3.4 Metoda cílových nákladů

S ohledem na cenu výsledného zařízení bude použita metoda cílových nákladů, srovnávající cenu obdobných a konkurenčních produktů. Cena výsledného zařízení by neměla výrazně převyšovat cenu přímé konkurence, pakliže neposkytne odpovídající přidanou hodnotu.

Jelikož cílem diplomové práce byl pouze vývoj prototypu, nikoli výroba ostré verze, platí, že náklady na výrobu prototypu, spolu s dalšími předpokládanými náklady na výrobu ostré verze včetně krabičky a obchodní marží, nesmí převyšovat cenu konkurenčních zařízení. V rámci prototypu bude hledána taková kombinace, která umožní minimalizaci ekonomických nákladů na jeho výrobu při splnění všech požadovaných podmínek a s ohledem i na případný budoucí vývoj produkční verze produktu.

Vzhledem k rozsahu projektu a relativně malý výběr použitelných součástek nebyla použita metoda QFD matrix (Mazur, 2020).

3.3.5 Další využití

Kromě leteckých navigačních soutěží se výsledné zařízení či jeho modifikace nemusí držet striktně jen oblasti leteckých navigačních soutěží. Případná modifikace výsledného produktu či navazující vývoj pro odlišnou oblast již bude vycházet ze zkušeností s již vyvinutým zařízením, čímž dojde k ušetření nákladů na takový vývoj. S ohledem na poskytovanou funkčnost sledování polohy v reálném čase se nabízí možnost využití této funkcionality i v jiných oblastech, například ke sledování automobilů či jiných dopravních prostředků.

[1] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_19_5889
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/com_2016_773.en_.pdf
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_420

V těchto oblastech nicméně již existuje silná konkurence. Síla vyvíjeného řešení spočívá právě ve vývoji na míru konkrétnímu použití, s čímž jde ruku v ruce i předpoklad vyšší ceny výsledného produktu. V oblasti letectví se nabízí využití i mimo navigační soutěže, například pro sledování letadel, půjčovaných třetím osobám, třeba v případě leteckých škol či aeroklubů. Dále by zařízení mohlo najít využití v těch oblastech, kde je poptávána funkcionalita sledování v reálném čase, a zároveň určitá přizpůsobení na míru či poptávka po provozu serveru na vlastní infrastruktuře klienta.

3.4 Model vývoje

Nejprve, před započetím jakýchkoli vývojových prací, bude potřeba zjistit veškeré technické požadavky na výsledné zařízení i na vzdálený server. Z důvodu využití loggerů jak v rámci mezinárodních, tak lokálních soutěží, budou technické požadavky shrnuty na základě analýzy předpisů mezinárodní letecké asociace FAI v kategorii ultralehkého i všeobecného letectví, v kombinaci s lokálními předpisy, používanými v České republice. Analýza bude doplněna komunikací s kompetentními osobami v rámci LAA, FAI a pro potřeby kategorie všeobecného letectví i Aeroklubem České republiky. S těmito osobami též bude diskutováno vhodné řešení serveru pro přijímání a zpracování dat z loggerů v reálném čase.

Během vývoje se předpokládá potřeba kontinuálního testování a vývoje v iteracích. Klíčovým krokem bude vybrání jednotlivý komponent: pro příjem GNSS signálu, odesílání dat přes mobilní síť, displej i napájení. Při výběru budou zohledněny zkušenosti z vývoje předchozí generace loggerů a jejich technická i ekonomická stránka. Během vývoje se rovněž předpokládá potřeba neustálého testování řešení a jeho zlepšování. Rovněž se předpokládá potřeba rezervy na řešení situací, nepředvídatelných při prvotním návrhu, a tedy je nutno proces vývoje řídit flexibilně.

Jedná se o vývoj doposud neexistujícího produktu, kde se předpokládá práce s častým upřesňováním požadavků na základě aktuálního postupu realizace a na základě kontinuální zpětné vazby od zadavatele práce, tedy i rychlé a flexibilní reakce a časté změny v plánování. Z těchto důvodů byly zvoleny agilní metodiky a kokrétně pak na základě konzultace s Ing. Lukášem Lancem, certifikovaným scrum masterem, metodika Scrum (Šochová, 2017). Vývoj bude dělený do několika Product Increments (Schwaber, 2004), v rámci kterých budou vyvinuty zásadní celky. Product Increments se budou skládat z několika sprintů, přičemž výsledkem každého z nich by měl být ucelený kus práce . První sprint bude určen především na prozkoumání možných řešení a návrh konceptu. Poslední sprint bude určen hlavně na testování řešení a dodělávání případných dalších požadavků, které vzniknou ze sprintů předchozích. Na konci každého sprintu bude provedeno vyhodnocení uplynulého sprintu a naplánování nadcházejícího sprintu.

3.5 Pozicování v 3D prostoru

Jedná se o GPS záznamové zařízení a jelikož toto je neměnitelný požadavek, nebudou dále uvažovány jiné možnosti určování polohy.

3.5.1 Přesnost GPS

Analýza z roku 2018 (Renfro, Stein, Boeker, & Terry, 2018) prokazuje, že určení vertikální pozice (výšky) je výrazně méně přesné, než určení horizontální pozice, čili zeměpisné šířky a délky (Obrázek 1).

	$\langle DOP \rangle$				$\langle DOP \rangle_{worst\ site}$			
	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017
Horizontal DOP	0.86	0.85	0.83	0.83	0.99	0.97	0.94	0.94
Vertical DOP	1.39	1.37	1.34	1.35	1.73	1.72	1.68	1.68
Time DOP	0.81	0.80	0.78	0.78	0.94	0.92	0.89	0.89
Position DOP	1.64	1.62	1.58	1.59	1.89	1.89	1.84	1.83
Geometry DOP	1.83	1.81	1.77	1.77	2.10	2.10	2.04	2.04
Number of visible SVs	10.31	10.33	10.39	10.49	4.99	5.28	5.93	5.95

Obrázek 1 - přesnost GPS pozicování (Renfro, Stein, Boeker, & Terry, 2018)

Přesnost GPS přímo závisí na kvalitě přijímaného signálu. Další vliv mohou mít i faktory jako interference signálu, velké solární bouře, údržba GPS satelitů (GPS.gov, 2020). Je proto záhodno měření jak horizontální, tak vertikální pozice zpřesnit.

Zpřesňování celkové polohy (horizontální i vertikální) lze vhodně realizovat použitím takzvané asistované GPS (A-GPS), používající data z mobilních sítí k upřesnění polohy. Kromě zpřesnění vede i k rychlejšímu získání iniciální GPS pozice (Acosta & Toloza, 2012).

3.5.2 Určení výšky pomcocí barometru

Na výšku dle GPS letectví nespoléhá, namísto toho používá standardní měření tlaku. Jelikož měření výšky podle GPS se týká relativně velká odchylka, která může dosahovat až 100 metrů, je záhodno ji mít možnost zpřesnit. Toto je mimojiné i jeden z požadavků pro soutěžní loggery, jak uvádí další kapitoly. Požadovaného zpřesnění je možno dosáhnout využitím tlakové výšky, měřené pomocí barometru, kalibrované dle aktuálního tlaku (Graham, 2011).

3.6 Určování přesného času

Pro určení přesného času lze využívat času z GPS. Tento je navázán na UTC a přesnost GPS času se pohybuje v řádu desítek nanosekund (Wechsler, 1990). GPS čas však není s UTC shodný. Zásadní rozdíl totiž je, že čas UTC je průběžně korigován pomocí přestupných sekund, zatímco čas GPS běží bez těchto korekcí (Wechsler, 1990). Oba časy byly shodné v lednu 1980, přičemž aktuálně se GPS a UTC liší o 18 sekund (qps.nl, 2020)

3.7 Bezdrátová datová komunikace

Pro bezdrátovou datovou komunikaci loggeru se vzdáleným serverem je možno využít několika možností (Audin, 2018; McClelland, 2019). Prvním způsobem je použití ověřených existujících mobilních sítí, které je dostupné prakticky celosvětově. Jeho alternativou může být využití satelitního připojení. Dalšími možnostmi jsou WiFi či Bluetooth, které se však vyznačují omezeným dosahem. Jiným způsobem může být využití tzv. LPWAN, například jedné z jejích implementací LoRa (Hellstrom, 2020).

Data z loggeru na vzdálený server lze dopravit různými způsoby, přičemž hlavím kritériem je co nejspolehlivější a nejsnažší použitelnost, dostupná na co nejvíce místech.

3.8 Průzkum existujících řešení

Nejprve bude proveden průzkum existujících řešení pro získání celkové představy o možnostech řešení a případných úskalích.

Projekt Design and Development of GPS-GSM Based Tracking System With Google Map Based Monitoring (Verma & Bhatia, 2013) využívá ke sledování aktuální polohy zařízení sestávající z GSM a GPS modulu, displeje a centrální jednotky. Toto zařízení posílá periodicky aktuální polohu na vzdálený server, kde je vizualizována pomocí Google Maps.

Obdobný řístup řeší i autoři článku Automobile Anti-theft System Based on GSM and GPS Module, kteří celý systém ještě doplňují o senzor vibrací (Hu, Li , & Li, 2012).

PRAKTICKÁ ČÁST

Sekce 2
Rozpracování

4 Fáze Rozpracování dle MMSP-AV

Během fáze Rozpracování bylo nutno analyzovat všechny dílčí faktory a požadavky na výsledné zařízení a s jejich zohledněním naplánovat proces vývoje. Byla provedena řešerše existujících pravidel a specifikací a konzultace se zainteresovanými stranami. Bylo provedeno hrubé naplánování průběhu vývoje prototypu a dílčích komponent.

4.1 Plán práce

Začátku prací předcházelo naplánování jednotlivých product increments. Bylo jasné, že nejprve bude potřeba sesbírat požadavky na výsledné zařízení, poté vybrat a zaopatřit potřebný hardware a začít s vývojem hardware, firmware i serveru. Jednotlivé komponenty bylo nutno průběžně testovat a to jak samostatně, tak v rámci funkčního celku. Byly sestrojeny dva identické prototypy – jeden určený pro vývoj, druhý pro testování. Zatímco na vývojovém loggeru byly průběžně prováděny změny a to jak firmwaru, tak zapojení, na druhém prototypu byla kontinuálně testována poslední funkční verze a zjištěné nedostatky byly zapisovány a zapracovávány během vývoje. Vývoj byl průběžně konzultován s Jurajem Čekanem z Letecké amatérské asociace.

Byla využita metodika Scrum (Schwaber, 2004; Šochová, 2017). Hrubé naplánování vývoje spočívalo v rozdělení do čtyř product increments, skládajících se každý ze čtyř dvoutýdenních sprintů. V prvním PI byla provedena business analýza, sběr požadavků a analýza a návrh funkcionality možného řešení. V rámci druhého PI byl vybrán potřebný hardware a sestaven prototyp, který byl v rámci třetího PI dále optimalizován a testován. V rámci posledního, čtvrtého PI, byl podle plánu prototyp finalizován a vyvinuty dílčí serverové komponenty. S ohledem na omezení kvůli koronaviru bylo do PI 4 odloženo i některé testování a implementace barometru, původně plánované na předchozí PI.

4.2 Přehled současně využívaných řešení

Kategorie ultralehkého létání i kategorie všeobecného letectví dlouhodobě řeší problém s nedostatkem loggerů, vhodných pro specifické požadavky navigačních soutěží. V kategorii ultralehkého létání aktuálně dominují loggery AMOD AGL 3080, které již nejsou v produkci. Kromě loggerů AMOD je komisí FAI CIMA dále schválen logger Air Observer, který rovněž již není dostupný v prodeji a na mezinárodních závodech jsou nyní používány výlučně loggery AMOD.

Řešením této situace měl být logger Flymaster, který však při kvůli značným nedostatkům nesplnil podmínky pro certifikaci nemůže být v soutěžním prostředí použit (Meredith-Hardy & Esteban, Flight Recorder Approval Committee (FRAC), 2019).

V kategorii všeobecného létání jsou používány loggery AFLOS, rovněž již mimo prodej. Na závodech Air Navigation Race v roce 2019 byly úspěšně využity loggery Flymaster disponující live trackingem, které jsou jako jediné aktuálně dostupné. Neprojevily se nedostatky, pro které jej komise FAI CIMA odmítla certifikovat, s největší pravděpodobností díky aktualizovanému firmwaru. Vzhledem k úspěšnému použití na mezinárodní soutěži v kategorii všeobecného letectví je možné, že FAI CIMA logger Flymaster v budoucnu bude znova testovat a případně jej certifikuje.

4.2.1 Flymaster

Obrázek 2 - logger Flymaster (Flymaster Tracker - User Manual, 2020)

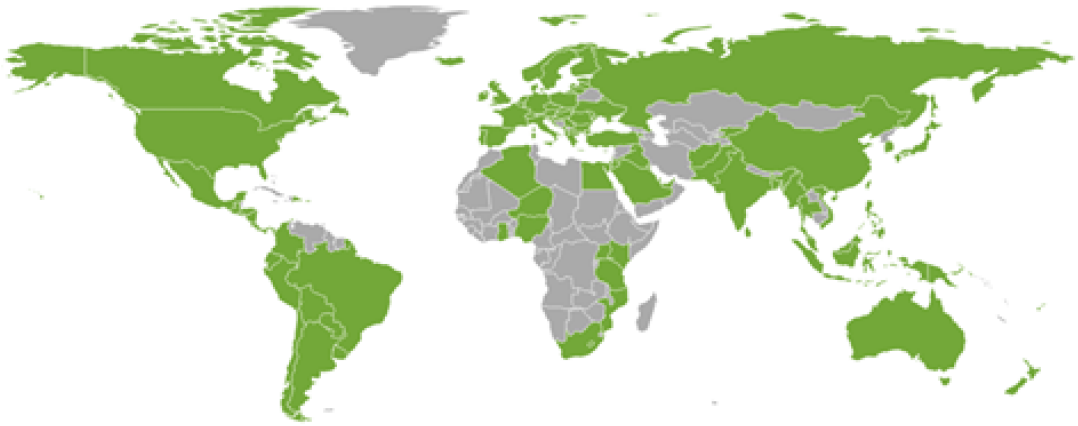
Flymaster Tracker (Obrázek 2 - logger Flymaster je relativně nový produkt portugalské společnosti Flymaster Avionics. Disponuje možností live trackingu. Zařízení dále disponuje barometrickým senzorem, schopným zaznamenávat výšku v závislosti na atmosférickém tlaku, což je jeden z požadavků pro letecké soutěže.

Flymaster je produkován ve dvou variantách – 2G a 3G (Obrázek 3 - Flymaster a podporované země pro 2G variantu loggerua Obrázek 4 - Flymaster a podporované země pro 3G variantu loggeru). 2G varianta podporuje sítě GSM 850 MHz, EGSM 900 MHz, DCS 1800 MHz and PCS 1900 MHz. Jedná se tedy o základní GSM sítě, charakteristické pomalým přenosem. Tyto sítě však budou v budoucnu v Evropě postupně vyřazovány z provozu (Worth, 2020).

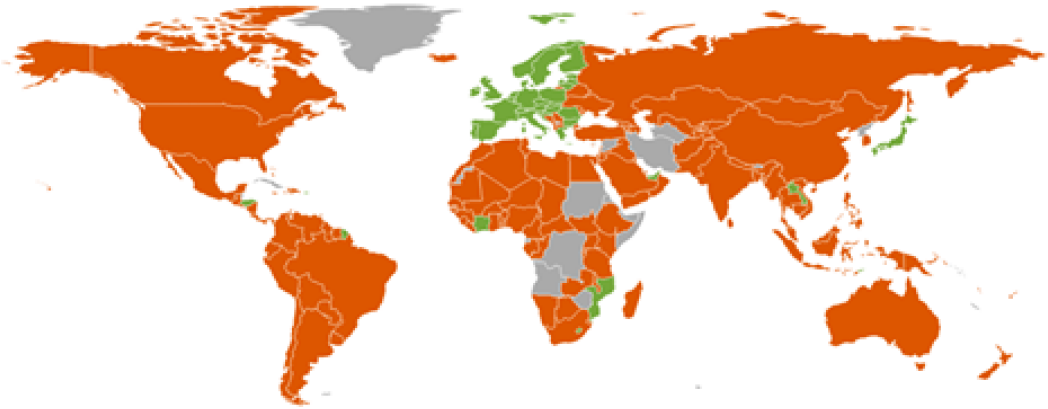
Varianta 3G podporuje navíc sítě UMTS/HSPA na frekvencích 800/850/900/1900/2100 MHz. Tato varianta se tedy zdá dlouhodobě využitelnější.

Sítě 4G nepodporuje žádná z variant. (Flymaster Tracker - User Manual, 2020)

SIM karta je v tomto zařízení integrovaná a není možné ji uživatelsky vyměnit. Flymaster nabízí dvě možnosti předplatného - standardní a rozšířenou - podle zemí, kde je služba dostupná. Jelikož je SIM karta neměnitelná, nepřichází v úvahu možnost vložit lokální SIM kartu v nepokrytých zemích, čímž Flymaster ztrácí na univerzálnosti.

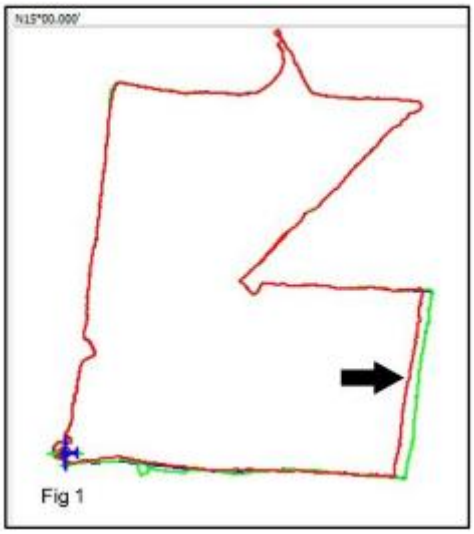


Obrázek 3 - Flymaster a podporované země pro 2G variantu loggeru (Flymaster Tracker - User Manual, 2020)



Obrázek 4 - Flymaster a podporované země pro 3G variantu loggeru (Flymaster Tracker - User Manual, 2020)

Flymaster byl testován komisí FAI CIMA a během testování zamítnut pro nepřesnost a podezření na modifikaci, resp. dopočítávání záznamů, což je v požadavcích nedoporučovaná praktika (Meredith-Hardy, Flymaster - Testing report, 2020). Obrázek 5 - nepřesně zaznamenaná trasa během testování loggeru Flymaster zobrazuje GPS záznam ze dvou schválených a prověřených loggerů typu AMOD (červeně) a loggeru Flymaster (zeleně), kdy Flymaster ukazuje trasu jinde, než byla ve skutečnosti letěna. Zpráva dále zmiňuje špatné měření barometrické výšky, kde Flymaster zaznamenával stabilně výšku FL 44330 (flight level 44330, tedy 4 433 000 ft, 1354 km na mořem), což je hodnota opět odtržená od reality. (Meredith-Hardy, Flymaster - Testing report, 2020)



Obrázek 5 - nepřesně zaznamenaná trasa během testování loggeru Flymaster (Meredith-Hardy, Flymaster - Testing report, 2020)

Kompletní zpráva je k přečtení na webových stránkách FAI CIMA[2] (Meredith-Hardy & Esteban, Flight Recorder Approval Committee (FRAC), 2019).

Cenově se Flymaster[3] pohybuje na úrovni 199€ za 2G variantu a 239€ za 3G variantu. Dále je nutno započítat měsíční provozní náklady 3.99€, respektive 5.99€ za variantu s rozšířeným pokrytím. Datový plán je možno aktivovat pouze na měsíční bázi, není tedy nutno platit za datové připojení v měsících, kdy logger není využíván. Cenově výhodněji může vyjít pořízení v případě dvouletého úvazku na datové předplatné, kdy pořízení vychází na 149€ za 2G variantu či 189€ za 3G variantu, a měsíční poplatek pak činí 4.99€, resp. 6.99€ pro rozšířené pokrytí. Ušetřené peníze za pořízení snižuje dražší datové předplatné (Flymaster Avionics Lda., 2020).

[2] http://wiki.fai.org/download/attachments/35651593/Flymaster+WPC+Thailand+report+v1.pdf
[3] https://www.flymaster.net/tracker

4.2.2 AMOD

Obrázek 6- logger AMOD (Data logger AMOD AGL 3080, 2020)

AMOD AGL 3080 (Obrázek 6- logger AMOD) je de facto jediným používaným typem loggeru pro mezinárodní ultralehké soutěže a do loňského roku též jediným používaným typem v rámci českých ultralehkých soutěží. Poskytuje pouze funkcionalitu GPS záznamu, nemá displej, barometrický senzor a nedisponuje livetrackingem (AMOD AGL3080 User Manual, 2020). V současné době již není v prodeji a použité technologie jsou ve srovnání s těmi aktuálně dostupnými zastatalé. I přesto je jediným současně používaným loggerem certifikovaným FAI CIMA pro kategorii ultralehkého létání[4].

[4] Během FAI mistrovství světa v ultralehkém létání 2018 v Maďarsku a FAI mistrovství Evropy v ultralehkém létání 2019 v Litvě všechny soutěžící týmy používaly výhradně loggery typu AMOD. Tato skutečnost byla konzultována s delegáty FAI CIMA, kteří potvrdili, že AMOD je jediný aktuálně využívaný typ loggeru a v jeho postupném zastarávání spočívá při absenci akceptovatelné alternativy velký problém. FAI CIMA tak má velký zájem o případné nové řešení soutěžního loggeru.

4.2.3 AFLOS

Obrázek 7 - logger AFLOS

AFLOS[5] (Obrázek 7 - logger AFLOS) je jedním z loggerů, schválených a používaných v kategorii všeobecného letectví. V České republice se jedná o jediný aktuálně používaný typ loggeru pro tuto kategorii. Disponuje displejem, zobrazujícím GPS čas, napětí baterie a stav záznamu.

Přestože se jedná o ověřený a spolehlivý logger, jeho hlavním nedostatkem je absence barometrického senzoru, umožňujícího určování tlakové výšky, a zároveň nedisponuje funkcí live trackingu.

[5] http://www.behetec.com/AFLOS/en

4.2.4 LAA loggery

Letecká amatérská asociace problém s nedostatkem loggerů pro záznam navigačních soutěžích řešila již v minulých letech. Z důvodu stále rostoucí popularity navigačního poháru Petra Tučka, a tím pádem vzrůstajícího počtu soutěžících, pomalu přestával dostačovat stávající počet loggerů AMOD. Letecká amatérská asociace poptávala logger, splňující standardy soutěžního létání, pro využití v národních navigačních soutěžích. Logger, který by letecké požadavky splňoval, a zároveň byl pro dané účely ekonomicky dostupný, neexistoval. Za tímto účelem poptala Letecká amatérská asociace dodávku takovýchto loggerů. Tohoto úkolu se jsme se chopili v trojici Bc. Lukáš Běhounek, Bc. Michal Smetana a Bc. David Šibrava za pomoci Juraje Čekana, a poptávaný logger vyvinuli a v počtu čtyřiceti kusů vyrobili a dodali.

Loggery (Obrázek 8 - nejnovější loggery, používané LAA) splňují standardy soutěžního ultralehkého létání. Obsahují barometrický modul i displej, zobrazující informace o čase, stavu zaznamenávání a úrovni nabití baterie. Live trackingem nedisponují. Prozatím nejsou certifikovány komisí FAI CIMA a nejsou volně dostupné k prodeji. Aktuálně jsou loggery využívány v rámci navigačního poháru Petra Tučka a dalších soutěžích, pořádaných Leteckou amatérskou asociací.

Obrázek 8 - nejnovější loggery, používané LAA

4.2.5 Shrnutí

V kategorii ultralehkého létání a všeobecného letectví aktuálně panuje neudržitelná situace, kdy současně využívané a rozšířené loggery již nejsou v produkci. Možností do budoucna je využití loggeru Flymaster, který též jako jediný disponuje live trackingem. Tento logger však prozatím není certifikován pro kategorii ultralehkého létání, jelikož vykazoval nepřesnosti záznamu. Flymaster je však stále jediným loggerem, splňujícím požadavek na live tracking.

4.3 Sběr požadavků na výsledné zařízení

Peed započetím vývoje bylo samozřejmě nutno analyzovat jednotlivé požadavky na výsledné zařízení. Na to jsou kladeny požadavky nejen ze strany Letecké amatérské asociace. Požadovanou funkčnost loggerů pro soutěžní navigační létání určují především pravidla mezinárodní letecké asociace FAI (Technical Specifications for GNSS Flight Recorders, 2019). Pravidla jsou to poměrně striktní, logger totiž během letu nesmí umožňovat posádce získat jakoukoli výhodu (např. zobrazením polohových dat) a musí být dostatečně zabezpečen proti neoprávněné manipulaci. Záznam zároveň musí být dostatečně přesný, spolehlivý a kontinuální, aby se data dala využít pro vyhodnocování jednotlivých soutěžních letů.

Jak již bylo zmíněno výše, primárně bude vycházeno z požadavků FAI pro ultralehké létání, tyto budou doplněny požadavky z kategorie všeobecného letectví. Tato kategorie je velmi podobná a dá se předpokládat velký překryv požadavků. Ohledně dalších informací budou kontaktovány kompetentní osoby v rámci FAI.

Prototyp loggeru bude průběžně testován během navigačních soutěžích pořádaných v České republice, tedy v kategoriích ultralehkého létání a všeobecného letectví. Dále bude doplněna Analýza místních pravidel a přímé kontaktování odpovědných zástupců místních organizací, kteří poskytnou další informace, konkrétně zástupců Letecké amatérské asociace (ultralehké létání) a Aeroklubu České republiky (všeobecné letectví).

4.3.1 Informační zdroje

Pro sběr požadavků tedy budou využity následující informační zdroje:

1) Analýza existujících pravidel FAI
2) Upřesnění požadavků komunikací s delegáty FAI CIMA
3) Analýza lokálních pravidel v České republice
4) Upřesnění požadavků komunikací s lokálními českými institucemi

Za účelem sběru požadavků pro kategorii ultralehkého létání jsem se spojil s delegátem FAI výboru pro ultralehké létání FAI CIMA, Petrem Jonášem, který mne propojil s předsedou výboru pro letové záznamníky FAI CIMA Richarda Meredith-Hardyho (Meredith-Hardy & Esteban, Flight Recorder Approval Committee (FRAC), 2019) ohledně požadavků na vyvíjené zařízení (do tohoto výboru jsem byl posléze rovněž jmenován, pozn. aut.). Richard Meredith-Hardy jako hlavní dokument poskytl „Technical Specifications for GNSS Flight Recorders“ (Technical Specifications for GNSS Flight Recorders, 2019), spolu se sportovním řádem pro sekci „Microlights and Paramotors“ - Ultralehké letouny a Motorové padákové kluzáky – a jeho přílohou číslo 6, GNSS Flight Recorders and other electronic devices (FAI CIMA, 2020). Tyto dokumenty budou stěžejní pro sběr požadavků na prototyp.

Sportovní řád Letecké amatérské asociace České republiky pro ultralehké létání vychází přímo ze sportovního řádu FAI a na letové zapisovače neklade žádné další požadavky, tento tedy nebude dále analyzován (LAA ČR, 2019).

Letecké navigační soutěže probíhají rovněž v kategorii všeobecného letectví, v potaz je dále brán i sportovní řád pro tuto kategorii. Požadavky na GNSS záznamníky jsou uvedeny v příloze 4 sportovního řádu kategorie všeobecného letectví (FAI GAC, 2020). Rovněž byl kontaktován šéfrozhodčí navigačních závodů pořádaných Aeroklubem České republiky, pan Martin Hřivna.

Sportovních tříd dle FAI je značný počet, jak dokládá přehled níže (Obrázek 9 - seznam tříd dle FAI). Vyvíjený prototyp bude odpovídat požadavkům tříd C a R. Pro další třídy později může být funkcionalita přizpůsobena.

Class A:	Free Balloons
Class B:	Dirigibles - Airships
Class C:	Aeroplanes, Electric- and Solar-powered Aeroplanes
Class D:	Gliders and Motor Gliders
Class E:	Rotorcraft
Class F:	Model Aircraft
Class G:	Parachutes
Class H:	Vertical Take-off and Landing Aircraft
Class I:	Human-powered Aircraft
Class K:	Spacecraft
Class M:	Tilt-Wing/Tilt-Engine Aircraft
Class O:	Hang Gliders and Paragliders
Class P:	Aero-Spacecraft
Class R:	Microlight Aircraft and Paramotors
Class S:	Space models
Class U:	Unmanned Aerial Vehicles

Obrázek 9 - seznam tříd dle FAI (Fédération Aéronautique Internationale, 2020)

4.3.2 Technické požadavky FAI na GPS trackery

Dokument (Technical Specifications for GNSS Flight Recorders, 2019) definuje požadavky na GPS záznamová zařízení pro letecké navigační soutěže. Aby bylo možné zařízení použít v rámci oficiální soutěže či oficiálního letu, jako je například let ke stanovení rekordu, je nutné, aby logger splňoval určité požadavky a na jejich základě byl schválen jako oficiální záznamové zařízení.

Pro rekordy definuje FAI tři úrovně schválení:

- Úroveň 1 – pro všechny lety, včetně stanovování světových rekordů
- Úroveň 2 - pro všechny lety za účelem získání FAI výkonnostních odznaků či diplomů a národních rekordů, vyjma stanovování světových rekordů
- Úroveň 3 – pro všechny lety za účelem získání FAI výkonnostních odznaků Silver, Gold, Diamond

Požadavky na loggery i sportovní řád se mohou postupem času měnit. FAI definuje, že jednou schválený logger zůstává oficiálně použitelný a schválený i tehdy, když se požadavky změní, za předpokladu, že změny nejsou příliš rozsáhlé (vyhrazuje si samozřejmě právo certifikaci loggeru odebrat).

Jelikož logger je vyvíjen od začátku pro použití právě v leteckých navigačních soutěžích, cílem je, aby splňoval všechny FAI požadavky a mohl být schválen v nejvyšší možné kategorii.

Konstrukce

- Anténa by se měla nacházet uvnitř obalu kvůli možnému zneužití a podvrhávání dat.
- Obal musí být zapečetěn tak, aby jakékoli jeho neoprávněné otevření bylo jednoduše rozpoznatelné
- Znovuzapečetění loggeru musí mít možnost provádět jen výrobce či oprávněná osoba.
- Logger by měl obsahovat senzor pro snímání barometrické výšky, s nastavitelným QNH a kompenzací vlivem teploty. Během záznamu bude senzor kalibrován dle ISA na tlak QNH 1013.25
- Přesnost snímání výšky musí být do 10 m pro GNSS a 1/3 hPa pro barometrický senzor (Obrázek 10 - požadavky na přesnost měření tlaku

4.4.5.1 The sea level setting must correspond to the required ISA (1013.25 mb) within 1 millibar;
(1mb at SL = 8.2m (26.9 feet)

4.4.5.2 Up to an altitude of 2000 metres, calibration correction must be within 3 millibars;
3mb at 1000ft (304.8m) = 83.2 feet (25.4m)
3mb at 2000ft (609.6m) = 85.5 feet (26.1m)
3mb at 3000ft (914.4m) = 88.2 feet (26.9m)
3mb at 4000ft (1219.2m) = 90.9 feet (27.7m)
3mb at 5000ft (1524.0m) = 93.8 feet (28.6m)
3mb at 6000ft (1828.8m) = 96.5 feet (29.4m)
3mb at 7000ft (2133.6m) = 99.7 feet (30.4m)

4.4.5.3 Above 2000m, calibration correction should be within one percent of altitude..

Obrázek 10 - požadavky na přesnost měření tlaku (Technical Specifications for GNSS Flight Recorders, 2019)

- Elektrické spoje mezi GNSS přijímačem a centrální jednotkou se musí nacházet kompletně uvnitř obalu
- Na obalu, případně na displeji, se musí nacházet jméno výrobce, typ a verze hardwaru a softwaru a tříznakové sériové číslo kusu. V případě displeje se tyto informace musí zobrazovat po dobu nejméně deseti sekund
- Paměť pro záznam nesmí být přístupná pro čtení ani zápis posádce během letu.
- V případě, že paměť je plná, musí zápis pokračovat, například přepisováním nejstarších záznamů
- Paměť musí být spolehlivá, výpadek napájení či jakékoli běžné poškození by neměly zapříčinit neuložení či ztrátu záznamu letu
- Logger by měl obsahovat senzor pro snímání atmosférického tlaku (barometr), který musí být zkalibrován dle ICAO ISA a musí být dostupná tabulka korekce
- Dokument rovněž popisuje konverze jednotek (Obrázek 11 - konverze jednotek

Feet to metric distances:	1 inch = 1/12 foot = 2.54 centimetres	exactly, by International definition
Miles:	International Statute Mile = 5280 feet	exactly, by International definition
	International Nautical Mile = 1852 metres	exactly, by International definition
Speed:	Knots are Nautical Miles per hour	
	"mph" refers to Statute Miles per hour	
ICAO ISA Sea Level:	Pressure equivalent to 760mm of Mercury	exactly, by International definition
	= 29.9213 inches based on 2.54 cm to the inch, as above	
	= 1013.2500 HectoPascals (the same numbers as Millibars)	

Obrázek 11 - konverze jednotek (Technical Specifications for GNSS Flight Recorders, 2019)

Požadavky na záznam

- Polohová data musí být zpracovávána s využitím modelu WGS-84
- Výška musí být zaznamenávána jak z GNSS senzoru, tak barometrická výška dle ICAO ISA
- Počet satelitů, které je GNSS čip schopen najednou přijímat, je alespoň 12
- Čas je používán UTC
- Záznam bude spuštěn buď s prvním GPS fixem, či až s pohybem loggeru (rychlostí větší než 15 km/h či změnou tlaku o 1 metr za sekundu po dobu pěti následujících sekund).
- Frekvence záznamu se doporučuje jednou za pět sekund či vyšší
- Událost Pilot event musí být zaznamenána jednoduchým stisknutím tlačítka. Informace o úspěšném zápisu musí být indikována zvukově, indikační diodou či na displeji
- Ukončení záznamu může proběhnout třemi způsoby
    - Pokud se logger pět minut nepohnul (indikováno výše definovaným určením pohybu)
    - Pokud byl logger uživatelem vypnut
    - Pokud je napájení přerušeno na déle než jednu minutu. Pokud je napájení přerušeno na dobu menší než jedna minuta, logger by měl pokračovat v záznamu do stejného souboru
- Nízké napětí – logger musí implementovat upozornění na nízkou úroveň baterie.
- Deklarace úloh – záznamy C
- Hlavička záznamu obsahuje identifikaci výrobce a tříznakové sériového číslo konkrétního loggeru, spolu s verzí hardware a firmware a detailech o GNSS a barometrickém senzoru
- Stahování záznamů z loggeru bude prováděno již dostupným či výrobcem dodaným obslužným softwarem, respektive DLL knihovnou, která bude podporovat ovládání (stahování a verifikaci záznamu) pomocí konzole
- Výstupní záznam musí být buď ve specifickém formátu definovaném výrobcem či v IGC. Konverze do IGC musí každopádně být umožněna,
- Kontrolní součet musí být spočítán přímo jednotkou loggeru. Tento může být počítán buď během záznamu, či přes stažením souboru do počítače
- Nedoporučuje se používat softwarová modifikace pozic. Zaznamenané pozice nesmí být předpočítány do budoucna na základě předchozích dat (čas, směr a rychlost)
- Snímání atmosférického tlaku musí pokračovat i během nefunkčnosti GPS

Bezpečnost

Technické požadavky zmiňují následující body:

- Na konci IGC záznamu nutno počítat bezpečnostní záznam. Z obsahu souboru se utvoří hash, a ten je dále šifrován pomocí privátního klíče loggeru ještě před přenosem souboru. Algoritmus pro hash musí být typu SHA2
- Každý logger má svůj vlastní privátní a veřejný klíč
- Logger nesmí umožňovat uživateli přistupovat k záznamům během letu
- Logger nesmí umožňovat uživateli modifikovat GPS záznamy
- Logger musí být zabezpečen proti neoprávněné modifikaci záznamů
- Je vhodno ověřovat autenticitu a konzistenci záznamů
- Logger nesmí soutěžícímu zobrazovat jakákoli data o poloze, kurzu, rychlosti či výšce

Nutnou podmínkou je předejít možné modifikaci záznamu soutěžící posádkou. Je nutné, aby jakýkoli případný pokus o změnu v datech byl detekovaný. Specifikace IGC obsahuje i popis pro kontrolní součty z obsahu souboru se záznamem.

Dále je nutno záznamy zabezpečit použitím asymetrického šifrování tak, aby byla zajištěna jejich integrita a bylo vždy možno ověřit, že daný záznam byl vygenerován konkrétním loggerem. Připouští se možnost šifrovat celý buď celý záznam či použít asymetrického šifrování pro ověření autenticity a konzistence bez šifrování formou elektronického podpisu. Klíče musí být rozdílné pro každý vyrobený logger tak, aby v případě kompromitace jednoho klíče nebyla ohrožena bezpečnost všech loggerů. Z toho důvodu smí klíče znát či k nim mít přístup jen minimální množství lidí. Šifrování a verifikace autenticity se týká všech datových přenosů z loggeru včetně přenosu dat na server přes internetovou síť během live trackingu. I zde bude šifrování vhodné s ohledem na zabezpečení dat proti možné kompromitaci během jejich přenosu či obranu proti jejich podvržení.

Vnější obal loggeru musí být buď nerozebiratelný či vhodně zapečetěný tak, aby jakákoli neoprávněná manipulace byla detekovatelná poškozením pečeti. Je nutno používat pečeti specifické a spárovatelné s daným konkrétním kusem loggeru. Pečeť může být nahrazena mikrospínači.

Z krabičky mohou vystupovat jen následující kabely či konektory:

- Nabíjecí konektor pro připojení ke 12 VDC. Možnost externího napájení má být dostupná také tehdy, pokud logger má vlastní interní baterii
- Konektor na externí anténu
- Konektor pro datovou komunikaci. Je doporučen typ RJ45 či USB

Logger musí obsahovat funkci pro detekci nepřesných či poškozených záznamů. Tohoto může být dosaženo buď firmwarem loggeru, či obslužným PC softwarem.

4.3.3 Požadavky pro ultralehké létání

Sportovní řád pro třídu R (ultralehké létání) hovoří o loggerech ve třech sekcích – v hlavním textu sportovního řádu a v přílohách 3 a 6. V hlavním textu se zmiňuje pouze to, že při úlohách, hodnocených na základě záznamu letu, musí být přítomen oficiální, schválený logger.

Stěžejním dokumentem je příloha číslo 6 „GNSS Flight Recorders and other electronic devices“. V příloze FAI sportovního řádu, sekci „Local regulations“, jsou letové zapisovače rovněž zmíněny. Tento dokument však neklade žádné technické požadavky na loggery, řeší především organizační záležitosti. Dokument je pouze souborem doporučených pravidel a tedy není ani závazný, jelikož během soutěže mohou být implementovány odchylky. Příloha 3 tak nebude brána v úvahu.

Z FAI sportovního řádu hovoří o loggerech především příloha 6 a rozlišuje tři typy loggerů. Pro účely soutěžních letů je možno využít pouze typu 1, který jako jediný nezobrazuje letové informace posádce během letu, dále tedy bude brán v potaz pouze tento typ. Ten musí splňovat následující požadavky:

- Za žádných okolností nesmí zobrazovat jakékoli letové informace posádce
- Musí obsahovat následující indikace:
    - Zapnuto/vypnuto
    - Stav záznamu
    - Nízká úroveň baterie
    - Nedostatek místa v úložišti
    - Indikace „PEV“ - pilot event marker – čili uložení aktuální pozice pilotem
    - Jméno výrobce, výrobní číslo kusu a verzi firmwaru
    - Případné další informace o běhu, vyjma letových informací (poloha, rychlost, kurz…)
- Frekvence ukládání alespoň jednou za pět sekund (doporučeno jednou za sekundu)
- Uložení nejméně 99 PEV
- Záznam musí být stažitelný do počítače ve schváleném formátu
- Je doporučeno implementovat možnost nastavení jména pilota a identifikace soutěže a úlohy tak, aby výsledné záznamy byly jednoduše a jednoznačně identifikovatelné
- Je doporučeno implementovat záznam barometrické výšky spolu s GPS výškou
- FRAC (komise FAI CIMA pro schvalování loggerů) musí schválit každou kombinaci verze hardwaru, firmwaru a obslužného softwaru loggerů, aby tyto mohly být použity během soutěže

Požadavky na letové zapisovače pro ultralehké létání

Pro ultralehké létání zmiňují pravidla následující požadavky:

- GPS přijímač
  - Musí být dostatečně přesný v záznamu souřadnic a výšky (bude hodnoceno při procesu schvalování)
  - Při výpadku signálu nesmí být GPS pozice dopočítávána
- Konstrukce loggeru
  - Veškeré spoje jednotlivých částí loggeru musí být uvnitř obalu
  - Obal musí umožňovat bezpečnou instalaci mechanismu pro uchycení
  - Ovládání loggeru musí být možné i v rukavících
  - Logger musí pokračovat v záznamu po nárazu ekvivalentnímu volnému pádu z 25 cm na beton
  - Logger musí uvádět jméno výrobce, typ a sériové číslo – možno zobrazovat na displeji
  - Vně obalu mohou vystupovat jen kabely či konektory pro anténu, napájení a datovou komunikaci s počítačem
- Zabezpečení
  - Obal by měl být zapečetěný tak, aby jakákoli manipulace s ním byla jednoduše detekovatelná
  - Nesmí být možné upravit firmware loggeru (bez toho, aby během procesu byla smazána celá paměť – nesmí tedy být možné upravovat dílčí části)
  - Během letu nesmí být možno ani pomocí připojení k PC získávat data o poloze
- Komunikace s počítačem
  - Logger musí být možno připojit do USB počítače
  - Software pro stahování záznamů musí běžet pod 32bit Windows systémy a musí být volně ke stažení na internetu
  - Výstupní formát záznamu musí být FAI IGC
  - Software musí umožňovat k záznamu uložit také identifikaci soutěže, úlohy a pilota

Pilot events

Soutěžní logger musí implementovat logiku pro záznam tzv. „Pilot events“. Znamená to, že po stisknutí příslušného tlačítka se daná zaznamenaná pozice označí příznakem. O úspěšném zápisu pozice musí logger informovat na displeji či pomocí notifikační diody.

Místní úprava pro Českou republiku

Jak již bylo zmíněno, v České republice se soutěže v ultralehké kategorii konají pod Leteckou amatérskou asociací České republiky. Sportovní řád Letecké amatérské asociace České republiky pro ultralehké létání přímo vychází ze sportovního řádu FAI a na letové zapisovače neklade žádné další požadavky (LAA ČR, 2019). Dle vyjádření Bc. Marka Veláta, předsedy Sportovní komise Svazu ultralehkého létání Letecké amatérské asociace a člena předsednictva Svazu, neklade Asociace žádné další speciální požadavky, ani výhledově nepočítá se změnami Sportovního řádu ohledně GPS loggerů.

Další požadavky dle komunikace s FAI CIMA

Dle vyjádření Richarda Meredith-Hardyho, zástupce FAI CIMA v oblasti loggerů, je nutno v případě SIM modulu zohlednit vývoj sítí v rámci celého světa. Zmínil, že Evropě se nyní začínají postupně vyřazovat z provozu 2G sítě ve prospěch sítí nových generací (Worth, 2020). S ohledem na provoz loggerů v budoucnosti je nutno tento vývoj zohlednit a loggery by měly podporovat aktuální sítě, tedy 3G i 4G. S ohledem na celosvětovou použitelnost datových přenosů bude nutno analyzovat využití frekvencí v jednotlivých zemích.

Zmiňuje též možnost implementovat funkcionalitu SOS tlačítka, které by po stisknutí odeslalo tísňovou zprávu s polohou na vzdálený server, a navrhuje implementovat obousměrnou komunikaci klient-server tak, aby bylo do soutěžních loggerů možno případně poslat zprávu ze serveru (např. o zrušení úlohy). Zdůrazňuje též fakt, že v případě, že není dostupný GPS signál, nesmí být v žádném případě zaznamenána poloha.

Doporučuje využít technologie MQTT a Node-red a zmiňuje, že pro účely prototypu není nutno vyvíjet složité webové rozhraní, stačí data zpřístupnit pro další zpracování.

4.3.4 Požadavky pro všeobecné letectví

Kromě použití ve třídě ultralehkého létání by logger měl splňovat rovněž požadavky pro použití ve třídě všeobecného letectví. Tyto jsou shodné s technickými požadavky FAI a oproti požadavkům pro ultralehké létání nekladou žádné další požadavky.

Místní úprava pro Českou republiku

Za účelem zjištění případných lokálních odchylek od pravidel FAI jsem kontaktoval Martina Hřivnu, hlavního rozhodčích navigačních soutěží pod Aeroklubem České republiky, který se vyjádřil, že lokální pravidla jsou shodná s pravidly FAI. Doporučil implementovat detekci pohybu, na jejímž základě by započalo zaznamenávání polohy (namísto zaznamenávání od doby, co je logger zapnutý a získá první GPS fix). Upozornil též na rozdíl času GPS a času UTC a problém přestupných sekund.

4.3.5 Rozdíl GPS času a UTC - Problém přestupné sekundy

Jak bylo zmíněno již výše, narozdíl od času GPS, který běží kontinuálně a beze změny od 6. ledna 1980, světový koordinovaný čas UTC podléhá korekcím pomocí tzv. přestupných sekund. Ačkoli časové jednotky trvají ve všech typech vyjádření času stejně, jsou to právě rozdíly těchto přestupných sekund, které jednotlivé časy od sebe odlišují. GPS čas byl s UTC shodný k lednu 1980. Od té doby se k březnu 2020 odebralo od UTC dohromady 18 přestupných sekund, o které je tedy GPS čas posunutý. (GPS, UTC, and TAI Clocks, 2020)

V letectví se standardně používá čas UTC, nikoli čas GPS. Tento rozdíl je tak nutno opravovat tak, aby logger zobrazoval čas právě v UTC. S ohledem na budoucí přidávání dalších přestupných sekund je nutno v soutěžním loggeru implementovat funkcionalitu, která umožní nastavit aktuální diferenci UTC a GPS času. Tato funkcionalita zároveň nesmí být přiístupna uživateli - soutěžícímu, kterému by mohla během soutěže poskytnout neférovou výhodu. Nabízí se zde možnost využít právě schopnosti loggeru komunikovat se serverem a tuto korekci nastavovat ze serveru. Je záhodno korekci poté uložit do paměti loggeru pro budoucí použití tak, aby při dalším zapnutí logger nemusel před započetím záznamu čekat na data o korekci ze serveru, což by v případě nedostupnosti internetového připojení komplikovalo

Z hlediska prototypu, u kterého se z podstaty věci předpokládá rychlý iterativní vývoj a schopnost úprav, bude akceptovatelné korekci nastavit fixně, bez možnosti změn.

4.3.6 Formáty záznamu pro soutěžní létání - IGC a GAC

Pro vyhodnocování letu definují pravidla specicické podoby záznamu, do kterých má být soutěžní záznam konvertován. Pro ultralehké létání je to formát IGC, pro všeobecné letectví velmi podobný formát GAC. Jejich popis je nad rámec této práce, specifikace jsou však snadno dostupné na webu[6].

Kromě formátu GAC[7] připouští sportovní řád pro všeobecné letectví i rozšířený formát GPX[8].

[6] https://www.fai.org/sites/default/files/documents/sc2_annex_4_2020.pdf
[7] http://www.ukiws.demon.co.uk/GFAC/documents/tech_spec_gnss.pdf
[8] https://www.topografix.com/gpx.asp

4.3.7 Požadavky na serverovou část

Pravidla FAI ani jednotlivé technické požadavky nezmiňují možnost live trackingu. Na základě dostupných obecných pravidel bude pouze nutno dodržet požadavky na zabezpečení dat definované pro jakékoli přenosy dat z loggeru, konkrétně zajištění autenticity a ochrany proti podvržení. Další požadavky přímo vychází z konzultace s FAI CIMA, LAA a AeČR, jejichž zástupci byli kontaktování a vyjádřili se s následujícími doporučeními:

- Na serveru se bude ukládat seznam všech přijatých polohových dat.
- Polohové záznamy půjdou jednoznačně přiřadit vždy jednomu konkrétnímu loggeru.
- Záznam v interním paměťovém úložišti by měl být shodný se záznamem na serveru za účelem případného budoucího využití pro skórování v reálném čase.
- V případě výpadku internetového připojení je vhodné nejprve odeslat aktuální pozici a pak postupně doposlat všechny, které se prozatím neposlaly.
- Data o poloze není nutno odesílat každou sekundu, spojování záznamů do větších celků je možné i za cenu několikasekundového zpoždění „live trackingu“.
- Data, uložená na serveru, musí být chráněna proti neautorizovanému přístupu.

4.4 Souhrnné požadavky na prototyp

V rámci vývoje prototypu bude vytvořena demonstrace realizovatelnosti řešení. Toto bude provedeno formou minimálního produktu. Na základě požadavků plynoucích z pravidel, specifikací a požadavků Letecké amatérské asociace byly v rámci metodiky Scrum vytvořeny následující user stories, jež budou v rámci prototypu splněny.

Konstrukce prototypu bude provizorní za účelem demonstrovat funkcionalitu.

4.4.1 User stories

Rozlišujme tři základní role – uživatel (soutěžící), rozhodčí (vyhodnocující) a ředitel soutěže. Tyto role mají následující požadavky:

- Jako uživatel chci:
    - jednoduché ovládání loggeru
    - aby logger poskytoval přesný aktuální čas
    - aby logger zaznamenával polohu každou sekundu a jeho přesnost byla srovnatelná či lepší v porovnání s loggery AMOD
    - aby logger produkoval stabilní záznam
    - aby logger zobrazoval data o běhu na displeji
- Jako rozhodčí chci:
    - aby data z loggeru byla jednoduše dostupná na stažení do počítače
    - aby logger byl certifikovaný pro použití v soutěžním létání
- Jako organizátor soutěže chci:
    - aby data o poloze byla v reálném čase odesílána na server a vizualizována na mapě.
    - aby data o poloze byla chráněna proti neautorizovanému přístupu

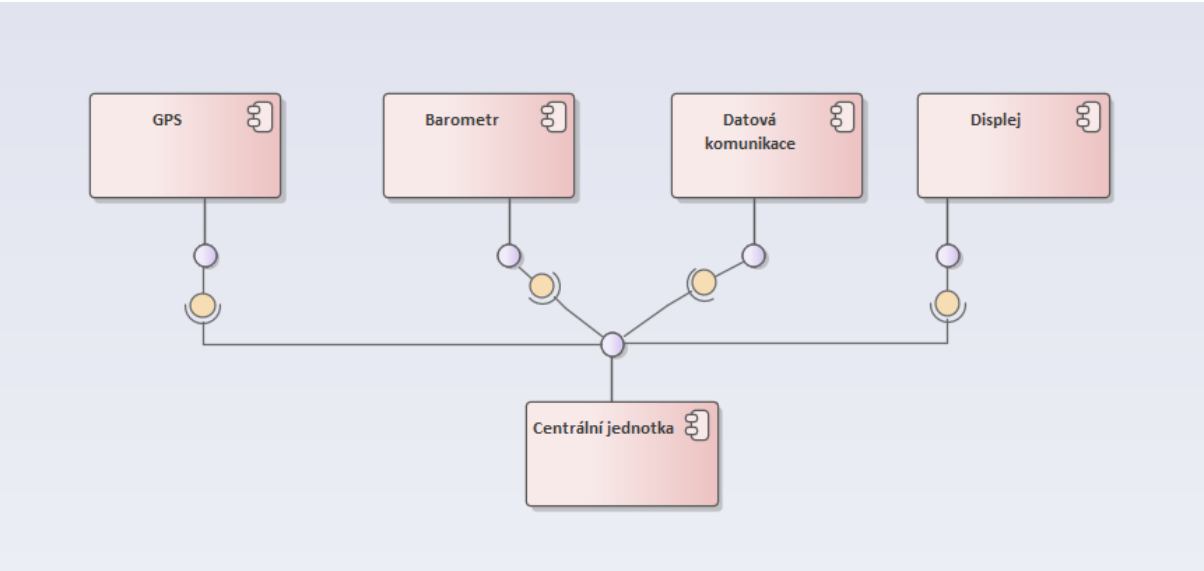
4.5 Diagram komponent

Logger se skládá z centrální jednotky, zpracovávající data z jednotlivých modulů a řídící chod loggeru, a následujících modulů:

- modul pro polohování na základě GPS
- modul pro snímání tlaku – barometrický senzor
- modul pro odesílání dat na server
- displej

Pro uložení dat je dále nutno napojit paměťové úložiště, které může být realizováno formou interní paměti či zapojení paměťového úložiště, například paměťové karty.

Níže uvedený diagram komponent (Obrázek 12 - diagram komponent) demonstruje dílčí komponenty zařízení a vztah mezi nimi – centrální jednotka komunikuje se všemi částmi odděleně a řídí je.



Obrázek 12 - diagram komponent

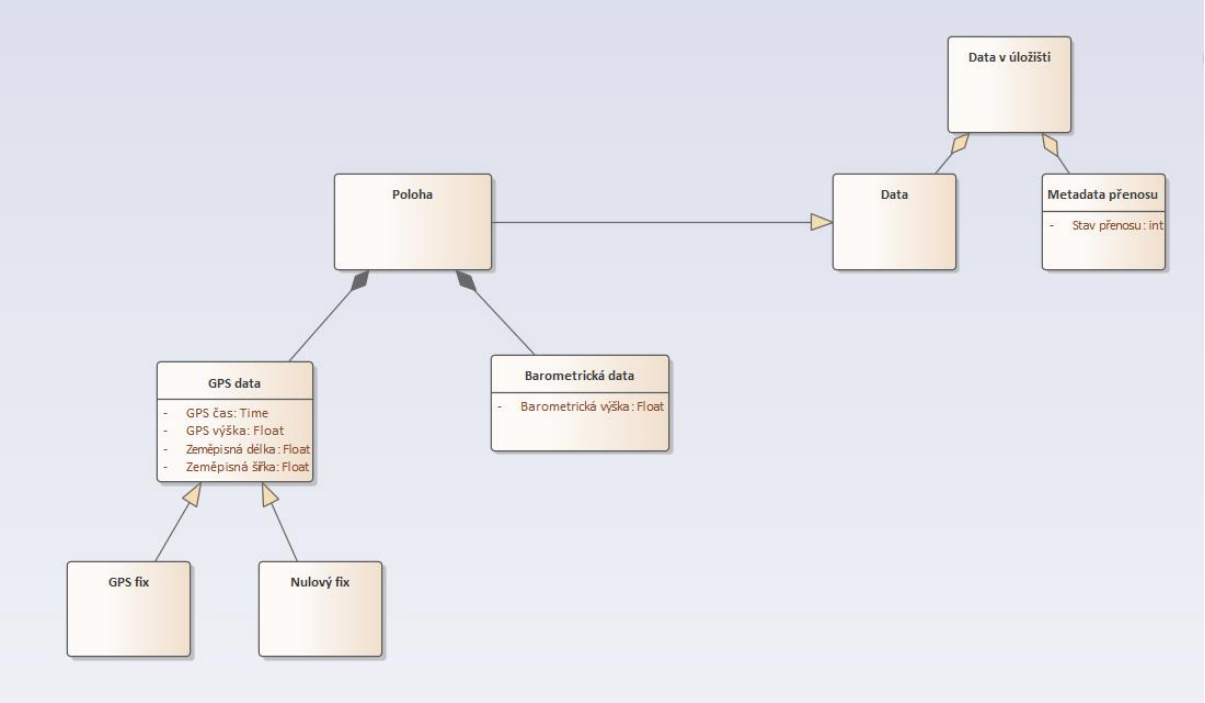
4.6 Architektura firmwaru

Firmware loggeru má za úkol sbírat polohová data, ukládat je do interního úložiště a odesílat na server. Doplňkem je zobrazování vybraných informací na displeji.

V rámci diplomové práce byla provedena analýza a návrh architektury firmwaru. Zapojení a programování bylo svěřeno specialistovi na programování hardwaru, Ing. Davidu Šibravovi. V rámci diplomové práce byl pak firmware průběžně testován a akceptován.

4.6.1 Diagram entit

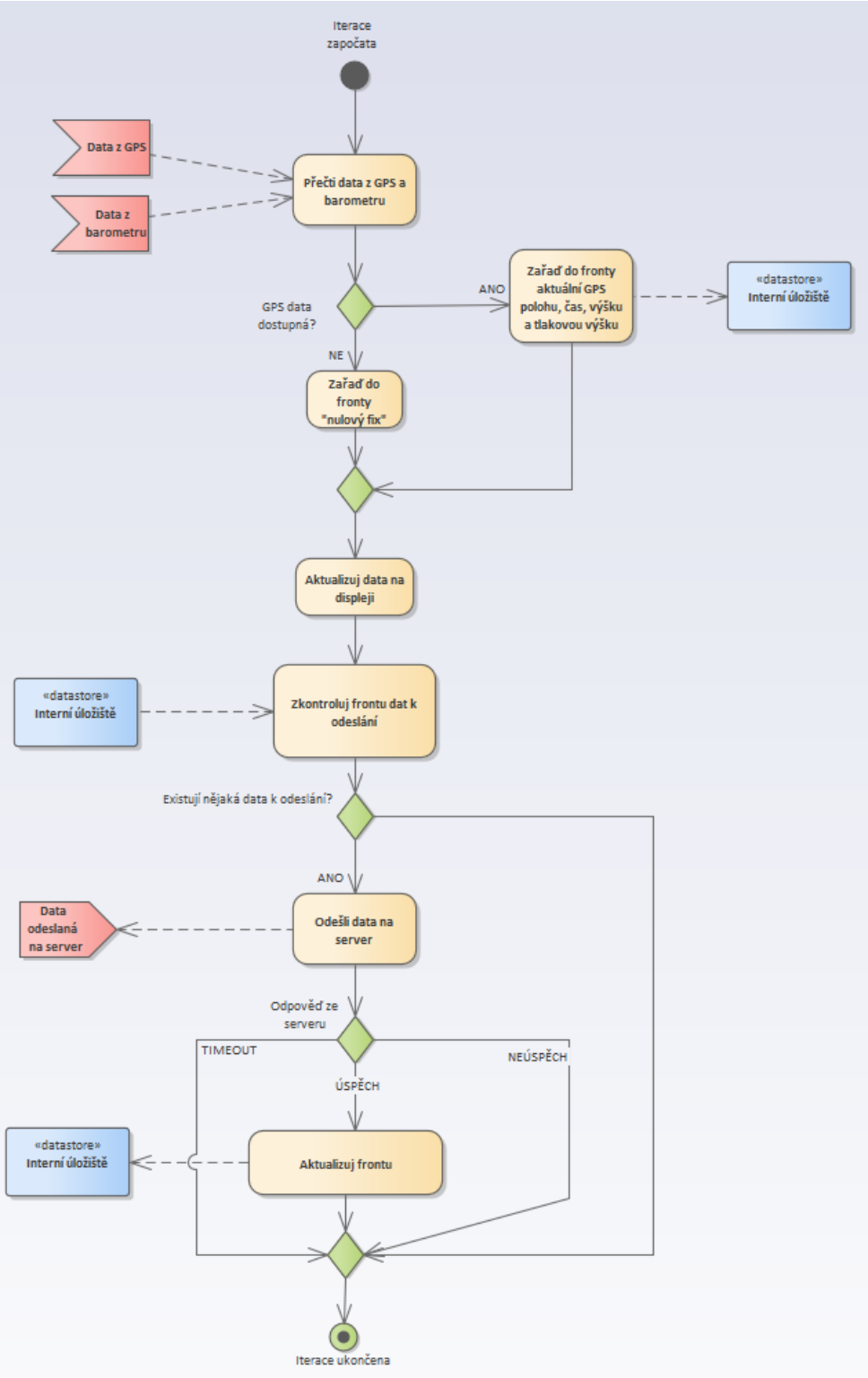
Stěžejní druhem dat, používaným loggerem, jsou data polohová, skládající se z dat o poloze GPS a tlakové výšce. Pro účely přenosu jsou polohová data dále doplněna o metadata související s přenosem na server. Výsledná polohová data spolu se stavem odesílání na server jsou ukládána do interního paměťového úložiště. Diagram níže (Obrázek 13 - diagram entit) ilustruje jednotlivé entity a jejich atributy a vazby.



Obrázek 13 - diagram entit

4.6.2 Diagram aktivit

V rámci návrhu firmwaru a vytvoření akceptačních kritérií pro vyvíjený firmware byl vytvořen následující diagram aktivit (Obrázek 14 - diagram aktivity - jednotlivá iterace loggeru), představující princip základních úkolů loggeru.



Obrázek 14 - diagram aktivity - jednotlivá iterace loggeru

Popis aktivity – inicializace

Během inicializace proběhne připojení všech modulů a otestování komunikace s nimi. Rovněž bude modulu pro datovou komunikaci poslán signál pro připojení k síti. Na displeji se zobrazí informace o konkrétním loggeru a informace o probíhajícím spouštění. V případě selhání některé z komponent se program ukončí a o selhání bude vypsána zpráva na displej.

Popis aktivity – smyčka

Ihned po inicializaci programu následuje spuštění smyčky iterací, zpracovávajících polohová data. Iterace probíhá jednou za sekundu. Program načte data z GPS a barometru a uloží je do úložiště. Pokud GPS data nejsou dostupná, zařadí k odeslání tzv. „nulový fix“, informující, že spojení se serverem je fukční, ale nejsou dostupná GPS data – z důvodu rozlišení výpadku datového spojení a výpadku GPS pozicování. Dále program zkontroluje, zda v úložišti existují data s příznakem neúspěšného odeslání a pokud ano, tato zařadí k odeslání, v pořadí od nejnovějšího k nejstaršímu. Výsledný soubor dat je odeslán na server.

V případě úspěšné odpovědi serveru se těmto datům nastaví příznak o úspěšném odeslání a vyřadí se z fronty. V případě neúspěšné odpovědi či timeoutu se ponechá příznak neúspěšného odeslání a data budou zpracována v další iteraci.

Během každé iterace rovněž probíhá proces aktualizace informací, zobrazovaných na displeji. Z důvodu přesnosti zobrazovaného času probíhá tato aktualizace ihned po obdržení aktuálních GPS dat, ještě před odesíláním dat na server.

4.7 Server pro přijímání dat z loggerů

Vzhledem k chybějícím specifikacím pro vzdálený server v rámci leteckých navigačních soutěží byl tento navržen především dle požadavků a doporučení Richarda Meredith-Hardyho, kdy pro účely prototypu doporučuje pouze jednoduchou funkcionalitu, kdy server pouze zapisuje přijatá polohová data do databáze.

4.7.1 Požadavky na server

Na server jsou kladeny tyto základní požadavky:

- Server je schopen přijímat zprávy
- Server obsah zprávy zapíše do databáze
- Server vrátí odpověď rozlišující úspěšnost/neúspěšnost operace

Pro účely prototypu je nutno vytvořit pouze základní server, schopný komunikovat s loggery a demonstrovat tak proveditelnost daného řešení.

4.7.2 Vizualizace polohových dat

Doplňkovou součástí serveru je funkcionalita pro vizualizaci přijatých polohových dat na mapě. Požadavek Richarda Meredith-Hardyho předpokládá vytvoření pouze jednoduchého programového rozhraní, které je schopno číst a poskytovat polohová data, uložená v databázi, na základě identifikace loggeru a časového úseku.

Jako demonstrace proveditelnosti live trackingu bude též vyvinuta jednoduchá komponenta, zobrazující na mapě trasu pohybu daného loggeru. Na tuto nejsou kladeny žádné zvláštní požadavky.

4.8 Způsob testování prototypu

Testování bude probíhat kontinuálně s vývojem loggeru. Každá vývojová verze firmwaru/hardwaru bude průběžně testována a zjištěné nedostatky budou řešeny. Prvním základním požadavkem je, aby zařízení bylo schopno přijímat a zpracovávat GPS signál. Poloha by měla být aktualizována každou sekundu a zapisována jak do interního paměťového úložiště, tak na vzdálený server.

Systém pro datovou komunikaci musí být rovněž spolehlivý a schopný doručit data na vzdálený server. Klíčové je rovněž ověření schopnosti využívání různých druhů sítí, což bude ověřeno jak v rámci různých lokalit na zemi, tak během letových testů.

Pro použití v navigačních soutěžích je nutno dosahovat přijatelné přesnosti určování polohy. Pro účely vývoje bude záznam polohy průběžně srovnáván s dalšími typy loggerů, primárně loggery AMOD, sekundárně pak se záznamem z dalších zařízení jako jsou například mobilní telefony. Případné příliš velké odchylky budou analyzovány a řešeny individuálně.

Testovány budou následující vlastnosti:

- Logger přijímá GPS signál a aktualizuje jej každou sekundu
- Při náhlém výpadku GPS signálu je logger po obnovení příjmu signálu schopen pokračovat v záznamu
- Logger je schopen kontinuálního odesílání dat prostřednictvím mobilní sítě
- Přesnost záznamu je srovnatelná či lepši v porovnání se současně používanými loggery

4.8.1 Testovací scénáře

Pro otestování požadovaných vlastností loggerů bude využito několika testovacích scénářů tak, aby postup byl standardizovaný a pokud možno replikovatelný. Podstatou je vyloučit vliv procesu měření na jeho výsledek a zajištění co nejlepší opakovatelnosti testu po provedení opravy.

Kontinuální záznam při ponechání loggeru v klidu

Jako nejjednodušší test pro ověření funkcionality záznamu polohy a odesílání na vzdálený server bude volena metoda ponechání loggeru bez pohybu na určitém místě. Bude sledováno, zda logger začne přijímat signál GPS a komunikovat se vzdáleným serverem. Předpokládá se vhodný výběr místa s ohledem na příjem GPS signálu, tedy v exteriéru či v interiéru u okna. Na vybraném místě by signál GPS měl být dostupný na loggerech AMOD či jiném zařízení, podporujícím GPS, aby se vyloučila chyba příjmu.

Kontinuální záznam při pohybu loggeru – automobil

Další metodou testování funkčnosti loggeru je záznam trasy během cestování automobilem. Výhodou je možnost naplánovat si přesnou trasu, zaznamenat ji na loggeru a poté kontrolovat, zda je zaznamenána korektně. V automobilu bude též vhodné otestovat zaznamenávání při vyšších rychlostech, například na dálnici, či při ztížených podmínkách, jako je výpadek, respektive nedostupnost GPS signálu v tunelu.

Kontinuální záznam při pohybu loggeru – chůze

Testováním za chůze bude ověřena funkcionalita loggeru zejména za ztížených podmínek, jako je například příjem GPS signálu v úzkých uličkách města, v přírodě (údolí) či v interiérech.

Kontinuální záznam při pohybu loggeru – letadlo

Hlavní podmínkou pro úspěšné používání loggeru je samozřejmě záznam během letu v letadle. Bude provedena série navigačních letů, zaznamenaných na prototyp vyvíjeného loggeru a několik certifikovaných soutěžních loggerů typu AMOD (aby byly vzájemně redundantní a dalo se identifikovat případné selhání jednoho z nich).

Schopnost loggeru obnovit GPS pozicování po výpadku GPS signálu

Schopnost obnovit příjem GPS signálu po výpadku je pro logger rovněž stěžejní. Tento scénář bude testován umístěním loggeru do míst, kde nebude schopen přijímat GPS signál, což bude signalizováno na jeho displeji. Po návratu loggeru do místa, kde je ověřeno, že je logger schopný signál GPS přijímat, logger musí pokračovat v korektním záznamu.

Kromě samotné schopnosti pokračovat v záznamu polohy lze rovněž srovnávat dobu, jakou obnovení příjmu signálu trvalo, s loggery AMOD a ostatními.

Testování předchozí generace loggeru (LAA logger), nedisponující live trackingem, ukázalo, že obnovení příjmu GPS signálu po výpadku je výrazně rychlejší ve srovnání s AMODy. Předpokládá se tedy, že i vyvíjený logger by měl produkovat lepší či s AMODy srovnatelné výsledky.

Schopnost loggeru doposlat chybějící data na server po výpadku signálu

Obdobně jako po výpadku příjmu GPS signálu, i v případě výpadku mobilního signálu, respektive mobilního internetového připojení, musí být logger dále schopný nejen odesílat aktuální data, ale i doposlat prozatím nedoručená data o poloze.

Pro srovnání úspěšnosti zápisu na serveru budou porovnávána data, zapsaná v interním paměťovém úložišti, s daty, zapsanými na server.

Přechod mezi jednotlivými druhy mobilního připojení

Logger musí samozřejmě být schopen pracovat kontinuálně s několika různými druhy mobilního datového připojení. Tedy, při přechodu mezi 4G, 3G a 2G sítěmi musí logger pokračovat v komunikaci se serverem. Tento scénář bude testován zaznamenáváním typu sítě, případně používané frekvence, k aktuálnímu času a poloze. Různé sítě budou testovány jak pohybem v rámci jednotlivých lokalit (město vs. hluboké lesy), tak během letu v závislosti na poloze a především výšce. Různé typy sítí totiž jsou dostupné do různých výšek nad zemí (resp. vzdáleností od vysílačů). Zkušební lety budou tedy prováděny v různých polohách a výškách.

Přesnost záznamu během náhlých změn směru a rychlosti

Vzhledem na požadavek, aby loggery zaznamenávaly korektně i během prudkých změn směru a rychlosti, aniž by logger zapsal nesprávnou pozici (tzn. logger nesmí pozici dopočítávat dopředu na základě historických pozic), bude provedena série testů s rychlými změnami směru a rychlosti. Tyto testy mohou být provedeny v automobilu či letadle. Logger nesmí zaznamenat jinou pozici, než skutečně navštívenou. Záznam může být porovnán s mapou (v případě automobilu) či s loggery AMOD, které jsou již certifikované a fungují korektně.

4.9 Mobilní frekvence využívané v zemích světa

V rámci splnění předpokladu podpory 2G, 3G i 4G sítí je nutno vybrat takový modul, který bude tyto technologie podporovat, a dále bude podporovat maximum možných frekvencí za účelem možnosti použití na celém světě. Mobilní frekvence používané v jednotlivých zemích a regionech jsou odlišné a aby bylo možné vybrat vhodný modul, je provést analýzu využívaných frekvencí.

4.9.1 Předpoklady

S ohledem na využitelnost vyvíjeného loggeru celosvětově je nutné, aby použitý SIM modul podporoval maximální množství používaných frekvencí. Na jedné straně se v Evropě mluví o postupném ústupu od 2G sítí a jejich postupné vypínání ve prospěch novějších generací přenosu mobilního signálu, na druhé straně v méně rozvinutých oblastech světa se stále ještě nové generace sítí neprosazují.

V určitých oblastech, zejména v méně rozvinutých lokalitách, často ani není dostupný mobilní signál. Toto však není věc, která by měla být řešena v rámci vývoje live tracking loggeru, protože i v případě nedostupnosti datového přenosu logger dále zaznamenává data na integrované úložiště a po skončení letu je tedy možné jeho záznam zobrazit, je tedy zachována nezbytná minimální funkcionalita loggeru.

4.9.2 Poznatky

Z provedené analýzy zdroje Frequencycheck.com[9] byl zjištěn základní požadavek na podporu komunikačních frekvencí - každá část světa využívá trochu jiné. V zásadě platí, že zatímco v Evropě, Asii, Austrálii a Africe je používaný jeden druh frekvencí, v severní a jižní Americe se používají o několik kHz odlišné. Modul určený pro evropský trh by tak pravděpodobně nebylo možno používat v Americe a naopak.

Je tedy nutné hledat takový modul, který by podporoval maximum světových frekvencí.

[9] https://www.frequencycheck.com/

4.10 Product increment 1 – sběr požadavků

V rámci prvního PI byl proveden sběr požadavků. Nejprve byly kontaktovány odpovědné osoby za zainteresované strany – Leteckou amatérskou asociaci ČR, Aeroklub ČR a FAI CIMA s informací, že je vyvíjen nový typ loggeru, splňující požadavky pro použití v soutěžním navigačním létání. Všem těmto osobám byla položena otázka, zda mohou poskytnout více informací či mají požadavky nebo doporučení, neuvedená v rámci zveřejněných pravidel a specifikací. Během čekání na jejich vyjádření byla provedena analýza pravidel pro soutěžní létání a specifikací pro soutěžní loggery. Na základě těchto dokumentů byly sepsány požadavky na vyvíjené zařízení. Sběr a analýza těchto požadavků trval dle plánu během všech sprintů prvního PI.

Již v rámci druhého sprintu byly přednostně analyzovány požadavky, týkající se hardwarové výbavy loggeru (například podpora 4G sítí či nutnost měření atmosférického tlaku), na jejichž základě byl v rámci druhého sprintu vybrán a objednán hardware tak, aby byl doručen ještě během prvního PI, tedy před započetím vývojových prací, jelikož jeho dostupnost je pro realizaci klíčová. Z důvodu plánovaného vývoje dvou kusů prototypu byly součástky objednány v počtu dvou kusů. I v případě selhání některé z kritických součástí tuto lze nahradit druhou, stejnou, a neblokovat tak další vývoj.

V rámci posledního sprintu byla navržena požadovaná funkcionalita firmwaru loggeru i serverové komponenty.

Výstupy z prvního PI jsou dostupné výše.

Sekce 2
Konstrukce

5 Fáze Konstrukce dle MMSP-AV

Během fáze Konstrukce byl nejprve vybrán potřebný hardware, s jehož použitím byl zkonstruován a naprogramován funkční prototyp. Tento byl průběžně testován a integrován do funkčního celku. Výsledkem této fáze je funkční prototyp.

5.1 Výběr hardwaru

Před započetím konstrukce samotné bylo nutno vybrat hardware, splňující veškeré výše uvedené požadavky.

5.1.1 Modul pro datovou komunikaci

Nejdříve byl proveden výběr modulu pro datovou komunikaci, který by splňoval kladené požadavky, zejména podporoval i 4G sítě a celosvětově používané frekvence. Ukázalo se, že velká část dostupných modulů pro datovou komunikaci podporuje zpravidla jen 2G sítě a navíc pouze regionálně, vždy jen s omezeným počtem podporovaných frekvencí. S podporou dalších frekvencí a dalších typů sítí rostla prodejní cena. Bylo zjištěno, že některé moduly integrují jak funkcionalitu mobilního připojení, tak GPS. Tato skutečnost je výhodná s ohledem na možnou budoucí aktivaci funkce AGPS, tedy upřesnění pozicování GPS na základě triangulace pomocí signálu mobilních sítí.

SimCom SIM800, SIM808, SIM900

Modul SIM800L[10], využitý při vývoji jiných řešení, podporuje pouze 4 frekvence:

- GSM850
- EGSM900
- DSS1800
- PCS1900

Tyto frekvence jsou typu GSM/GPRS, tedy 2G. Modul SIM800L tedy nesplňuje požadavek na dostupnost 3G a 4G sítě. U modulu SIM900[11], nástupce SIM800, narážíme na totožné omezení frekvencí. Podporuje pouze 2G síť. Na toto omezení narážíme též u modulu SIM808[12], který navíc disponuje GPS jednotkou a byl by tedy pravděpodobně vhodný v případě jednoduchých IoT zařízení požadujících GPS lokalizaci a jednoduchý datový přenos.

Modely z této řady tedy nejsou brány v úvahu.

[10] https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_SIM800L.pdf
[11] https://datasheet.octopart.com/SIM900-Simcom-datasheet-17594122.pdf
[12] https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SIM808_Hardware+Design_V1.00.pdf

SimCom SIM5320

Modul SimCom SIM 5320 již podporuje 3G frekvence WCDMA a HSPA. Nepodporuje však 4G frekvence, pročež nesplňuje základní požadavky .

Další nedostatek spočívá v nesplnění požadavku celosvětové podpory mobilních pásem. Datasheet[13] uvádí verzi modulu pro Evropu, Japonsko a Ameriku, avšak neuvádí verzi modulu, určenou pro celý svět (Obrázek 15 - SIM5320 a podporované frekvence).

Standard	Frequency	SIM5320E	SIM 5320J	SIM5320A
GSM	GSM 850MHz	✓	✓	✓
	EGSM 900MHz	✓	✓	✓
	DCS1800MHz	✓	✓	✓
	PCS1900MHz	✓	✓	✓
WCDMA	WCDMA 850MHz		✓	✓
	WCDMA 900MHz	✓		
	WCDMA 1900MHz			✓
	WCDMA 2100MHz	✓	✓	
HSPA	HSDPA	✓	✓	✓
	HSUPA			

Obrázek 15 - SIM5320 a podporované frekvence (SIMCom, 2020)

SIM7600

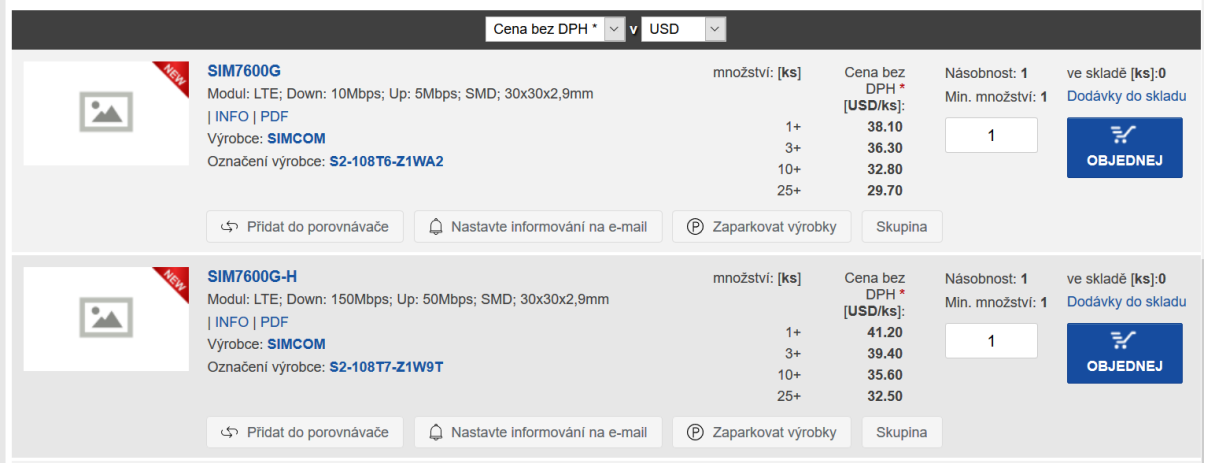
Modul SIM7600 disponuje širokým pokrytím frekvencí včetně 4G (Obrázek 17 - SIM7600 a podporovaná pásma). Oproti předchozím modulům je kromě regionálních verzí vyráběn i ve verzi celosvětové, podporující maximum pásem v jednotlivých oblastech. Tato verze je značena příponou G (global) či G-H (global high-speed). Pásmové pokrytí je v případě obou těchto verzí stejné, rozdíl spočívá v nestejné rychlosti LTE, kdy model G je tzv. LTE Cat 1 s maximální přenosovou rychlostí 10 Mbps a modul G-H LTE Cat 4 s maximální přenosovou rychlostí 150 Mbps (SIM7600 datasheet, 2020).

Vzhledem k požadavkům na odesílaná data, kdy na server se mají odesílat data o zeměpisné šířce, délce, nadmořské výšce, tlaku, datu a čase ve frekvenci jednou za sekundu, předpokládá se délka odesílaných dat v řádu desítek bajtů za vteřinu. S připočtením režijních datových nákladů, jako jsou například hlavičky odesílaných požadavků, se předpokládají nejvýše stovky bajtů za sekundu. Se započtením funkcionality doposílání nedoručených polohových dat, kdy s aktuální polohou budou odcházet i polohy historické, se pohybujeme v řádech tisíců, možná desetitisíců bajtů za sekundu, tedy hluboko pod limitem 10 Mbps (1.25 MBps). Z toho vyplývá, že požadavkům na rychlost bohatě vyhovuje i verze G, LTE Cat 1.

Dle výrobce GPS čipů uBlox má Cat 1 oproti Cat 4 některé výhody, jako její nižší složitost a především nižší spotřebu energie (U-Blox.com, 2018). V případě soutěžního loggeru, provozovaného na baterii, se jedná o značnou výhodu.

[13] https://www.tinyosshop.com/datasheet/SIM5320_Hardware+Design_V1.07.pdf

Cenově se rozdíl verzí G a G-H pohybuje v řádu jednotek dolarů dle nabídky obchodu TME.eu (Obrázek 16 - porovnání ceny SIM7600G a SIM7600G-H dle TME.eu , kolem 40 USD za kus v případě objednání jednoho kusu. Cena verze G-H vyšší než v případě verze G, i z tohoto důvodu je verze G preferována.



Obrázek 16 - porovnání ceny SIM7600G a SIM7600G-H dle TME.eu (Verze a cena modulu SIM7600, 2020)

Table 1: SIM7600 Series-PCIE Series Frequency Bands

Standard	Frequency	A	A-H	V-H	E	E-H	JC-H	SA	SA-H	G	G-H
GSM	850MHz							√	√	√	√
	900MHz				√	√		√	√	√	√
	1800M Hz				√	√		√	√	√	√
	1900M Hz							√	√	√	√
WCDMA	BAND1				√	√		√	√	√	√
	BAND2	√	√					√	√	√	√
	BAND4									√	√
	BAND5	√	√		√	√		√	√	√	√
	BAND6									√	√
	BAND8				√	√		√	√	√	√
	BAND19									√	√
LTE	FDD B1				√	√	√	√	√	√	√
	FDD B2	√	√	√				√	√	√	√
	FDD B3				√	√	√	√	√	√	√
	FDD B4	√	√	√				√	√	√	√
	FDD B5			√	√	√		√	√	√	√
	FDD B7				√	√		√	√	√	√
	FDD B8				√	√	√	√	√	√	√
	FDD B12	√	√							√	√
	FDD B13			√						√	√
	FDD B18						√			√	√
	FDD B19						√			√	√
	FDD B20				√	√				√	√
	FDD B25									√	√
	FDD B26						√			√	√
	FDD B28							√	√	√	√
	FDD B66									√	√
	TDD B34									√	√
	TDD B38				√	√				√	√
	TDD B39									√	√
	TDD B40				√	√		√	√	√	√
	TDD B41				√	√				√	√
Category		CAT1	CAT4	CAT4	CAT1	CAT4	CAT4	CAT1	CAT4	CAT1	CAT4
GNSS		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	√	√

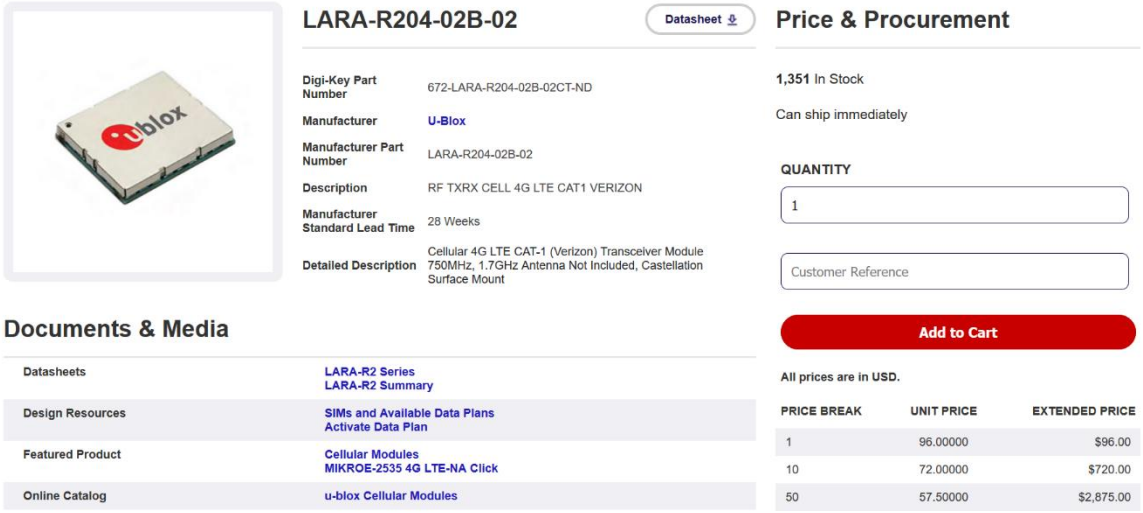
Note: SIM7600 Series-PCIE only support digital audio feature through PCM interface. SIM7600 Series-PCIEA only support Analog audio feature through analog audio interface.

Note: CAT1 or CAT4 correspond to different PN numbers.

Obrázek 17 - SIM7600 a podporovaná pásma (SIM7600 datasheet, 2020)

Čipy UBLOX

Kromě firmy SimCom vyrábí LTE čipy s GPS i firma U-Blox. Jako vhodné se jevil čip U-Blox LARA R2. Podporuje 4G, 3G i 2G společně s GPS, stejně jako SIM7600. Krátký průzkum trhu jej však jako potenciálního kandidáta poměrně jednoduše vyloučil pro jeho vysokou cenu, téměř dvojnásobnou (Obrázek 18 - cena U-Blox LARA R2).



LARA-R204-02B-02 Datasheet

Digi-Key Part Number	672-LARA-R204-02B-02CT-ND
Manufacturer	U-Blox
Manufacturer Part Number	LARA-R204-02B-02
Description	RF TXRX CELL 4G LTE CAT1 VERIZON
Manufacturer Standard Lead Time	28 Weeks
Detailed Description	Cellular 4G LTE CAT-1 (Verizon) Transceiver Module 750MHz, 1.7GHz Antenna Not Included, Castellation Surface Mount

Price & Procurement

1,351 In Stock

Can ship immediately

QUANTITY

1

Customer Reference

Add to Cart

All prices are in USD.

PRICE BREAK	UNIT PRICE	EXTENDED PRICE
1	96.00000	$96.00
10	72.00000	$720.00
50	57.50000	$2,875.00

Documents & Media

Datasheets	LARA-R2 Series LARA-R2 Summary
Design Resources	SIMs and Available Data Plans Activate Data Plan
Featured Product	Cellular Modules MIKROE-2535 4G LTE-NA Click
Online Catalog	u-blox Cellular Modules

Obrázek 18 - cena U-Blox LARA R2 (U-Blox LARA R2, 2020)

Vybraný model

Na základě porovnání požadavků na modul a analýzy dostupných možností byl vybrán modul SIM7600G.

5.1.2 GPS modul

Jelikož vybraný modul SIM7600G podporuje i GPS a hardwarovými specifikacemi vyhovuje požadavkům na prototyp i výsledné zařízení (SIM7600 datasheet, 2020), bude pro příjem a zpracování GPS signálu použit právě ten. V případě kombinace GPS a SIM čipu lze přikročit i k využití funkcionality A-GPS (SIM7600 datasheet, 2020), umožňující rychlejší získání GPS fixu.

U zvoleného modulu se předpokládá dostatečná přesnost a bude testován a porovnáván se staršími soutěžními loggery. V případě, že by se tento modul neosvědčil, bude přikročeno k využití již osvědčeného modulu U-Blox Neo-7M, využitého již během vývoje předchozí generace loggerů.

5.1.3 Centrální jednotka

Výběr této komponenty nebyl příliš komplikovaný. Jednotka má pouze zpracovávat vstupní údaje a propojovat konkrétní moduly, nejsou na ni kladeny žádné speciální požadavky. Na základě pozitivních zkušeností z jiných projektů bylo vybráno Arduino Mega - programování je relativně uživatelsky přívětivé, hardware je levný, spolehlivý a vyznačuje se nízkou energetickou náročností. Pro vývoj finální verze, nikoli prototypu, by bylo záhodno zvážit i jiné varianty.

Z hlediska hardware požadavků je Arduino Mega plně postačující a s ohledem na nízkou cenu, a dostupnost, není pro vývoj prototypu ekonomicky výhodné hledat alternativy.

5.1.4 Displej

Na displej jsou kladeny tyto požadavky:

- Bude zobrazovat textové informace o stavu záznamu, stavu baterie a aktuálním čase
- Nutná čitelnost i na přímém slunečním světle
- Nízká spotřeba energie

Na základě pozitivních zkušeností z vývoje předchozí generace loggeru byl vybrán displej typu Nokia 5110. Hlavními výhodami tohoto displeje jsou nízká cena, velmi malá náročnost na spotřebu elektrické energie a snadná čitelnost i na přímém slunečním světle. Z obdobných důvodů jako v případě centrální jednotky, ani u displeje není pro použití v rámci prototypu ekonomicky výhodné hledat alternativy.

5.1.5 Barometr

Na barometr je kromě obligátní nízké spotřeby elektrické energie kladen i důraz na přesnost měření. Chyba měření se nesmí na hladině moře pohybovat více než 1 hPa. Do výšky 2000 metrů nad mořem je tolerovaná odchylka 3 hPA (dle gradientu ISA se jedná o rozdíl výšky 30 metrů), a nad 2000 metrů je povolená odchylka definována jako 1% z celkové výšky. Podrobněji ilustruje přehled níže (Obrázek 19 - požadavky na přesnost barometrického senzoru).

4.4.5.1 The sea level setting must correspond to the required ISA (1013.25 mb) within 1 millibar;
(1mb at SL = 8.2m (26.9 feet)

4.4.5.2 Up to an altitude of 2000 metres, calibration correction must be within 3 millibars;
3mb at 1000ft (304.8m) = 83.2 feet (25.4m)
3mb at 2000ft (609.6m) = 85.5 feet (26.1m)
3mb at 3000ft (914.4m) = 88.2 feet (26.9m)
3mb at 4000ft (1219.2m) = 90.9 feet (27.7m)
3mb at 5000ft (1524.0m) = 93.8 feet (28.6m)
3mb at 6000ft (1828.8m) = 96.5 feet (29.4m)
3mb at 7000ft (2133.6m) = 99.7 feet (30.4m)

4.4.5.3 Above 2000m, calibration correction should be within one percent of altitude..

Obrázek 19 - požadavky na přesnost barometrického senzoru (Technical Specifications for GNSS Flight Recorders, 2019)

Na základě předchozích zkušeností s barometrickým modulem BME280 během vývoje předchozí generace loggerů, především s ohledem na přesnost, jednoduchou integraci a nízkou cenu, byl zvolen právě tento modul. Stejně jako v případě dalších modulů, ani v tomto případě není pro vývoj prototypu ekonomicky výhodné hledat případné alternativy.

5.1.6 Paměťové úložiště

Jedním z požadavků na logger je kromě odesílání dat na server i kontinuální ukládání dat do interního paměťového úložiště, jakožto primárního zdroje dat pro vyhodnocování letu. Na základě předchozích pozitivních zkušeností a na základě konzultace se zástupci Letecké amatérské asociace byla pro realizaci interního úložiště v rámci prototypu zvolena paměťová karta.

Velkou výhodou paměťových karet je jejich vyměnitelnost a velká kapacita. Standardní IGC polohový záznam, ukládaný každou sekundu a obsahující všechny informace potřebné pro vyhodnocení letu, obsahuje 35 znaků (bajtů). V případě hodinového letu je tedy zapsáno 123kB polohového záznamu při předpokladu zapsání 35 znaků za každou sekundu. Hlavičky a patička každého zaznameného letu se pak objemem pohybují pouze v řádu stovek bajtů. Tedy, i použití SD karty s kapacitou v řádu megabajtů, je pro prototyp naprosto dostačující. V rámci prototypu tedy bude pro ukládání dat použita běžná paměťová karta.

5.1.7 Napájení

GSM modul vyžaduje stabilní napětí ve velmi malém rozsahu 3.0-3.6V (SIM7600 datasheet, 2020), což je ve srovnání se zbylými moduly rozsah daleko užší. Kýženého napětí lze dosáhnout dvěma způsoby:

1. Použitím vhodných interních (nabíjecích) akumulátorů.
2. Transformací vstupního napětí z obyčejných baterií.

Dále je nutno řešit vykrývání napěťových špiček během provozu modulu, zdroj na vstupu musí být dostatečně stabilní, aby vstupní napětí neklesalo při zvýšené zátěži. Možnost použití obyčejných baterií byla po konzultaci s Ing. Davidem Šibravou vyhodnocena jako velmi náročná na úspěšné provedení. Transformace vstupního napětí z běžných baterií, u kterých předem neznáme jejich charakteristiky, by byla energeticky velmi ztrátová z důvodu nutnosti transformovat variabilní napětí na jedinou úroveň a zároveň zajistit vykrývání napěťových špiček a technicky i výrobně nepoměrně náročnější, ve srovnání s použitím vhodného integrovaného akumulátoru.

Pro účely prototypu a jeho testování bude použita běžná powerbanka. Pro účely pozdějšího vývoje se předpokládá využití standardizovaných baterií pro mobilní telefony, schopných dodávat napětí právě v pásmu 3.0-3.6 V. Kromě přesně definovaného rozmezí napětí je tento typ baterií zároveň schopen vykrývat napěťové špičky, spojené s provozem SIM modulu.

5.2 Product increment 2 – minimální funkční řešení

V rámci druhého PI bylo přistoupeno k samotné realizaci. V rámci prvního sprintu byla testována funkčnost modulu SIM7600 pro datovou komunikaci a příjem a zpracování GPS signálu.

5.2.1 MQTT

Po konzultaci s Jurajem Čekanem a Richardem Meredith-Hardym byl pro přenos informací zvolen protokol MQTT, určený především pro použití v IoT zařízeních (Malý, 2020). Hlavní výhodou MQTT je jednoduchost a nenáročnost. Oproti protokolu HTTP vyžaduje použití minima servisních dat (jako například hlavičky). Architektonicky je využit princip publisher/subscriber, kdy se jednotlivá zařízení přihlašují buď k publikování či odběru zpráv, kategorizovaným dle témat. Spojení je možno realizovat pomocí TCP či WebSockets a to nešifrovaně či šifrovaně. Obvyklé porty jsou 1883/8883 pro TCP a 8080/8081 pro WebSockets (Malý, 2020).

K realizaci architektury publisher/subscriber je potřeba implementovat tzv. broker, který se o zpracování zpráv stará. Jedním z nejpopulárnějším brokerů je například Mosquito, kteréhožto bylo využito i během realizaci této práce.

Jednou ze znamých implementací protokolu MQTT je například Facebook Messenger (Malý, 2020).

5.2.2 Založení serveru

Pro vytvoření serveru, zpracovávajícho zprávy z jednotlivých loggerů, tedy bylo nutno nakonfigurovat a spustit MQTT broker na vzdáleném serveru. Pro hostování řešení bylo vybráno řešení Google Cloud Platform, nabízející 300 USD kredit pro nově registrované uživatele (Google, Google Cloud Platform Free Tier, 2020). Jelikož provoz virtuálního stroje s vlastní pevnou veřejnou IPv4 adresou v rámci produktu Compute Engine stojí necelé 3 USD měsíčně, které jsou pokryty z kreditu pro nové uživatele, byl zvolen právě tento produkt (Google, Google Compute Engine | Pricing, 2020). Na virtuální stroj byl nainstalován MQTT broker Mosquito. Pro rychlé prototypování zpracování zpráv bylo využito rozšířeného řešení Node-RED, umožňující konfigurovat tok zpráv a jejich zpracování přímo z rozhraní webového prohlížeče (nodered.org, 2020).

V Node-RED byl vytvořen jednoduchý proces pro ověření správné komunikace z loggeru, a sice vypisování všech přijmutých zpráv z loggeru přímo do rozhraní Node-RED. Tímto způsobem bylo možno ověřit, zda server úspěšně přijímá zprávy z loggeru.

Dalším logickým krokem bylo vytvoření databáze pro ukládání polohových dat, přijímaných z loggerů. Jelikož toto byl neblokující krok pro další práci, respektive vytvoření funkcionality ukládání bylo jen otázkou investovaného času, a současným úkolem zatím bylo ověření realizovatelnosti celkového řešení, energie byla dále soustředěna do vývoje loggeru a ověřování, zda zvolená architektura a kombinace hardwarových komponent je vyhovující pro realizaci celkového řešení.

5.2.3 Firmware prototypu

V rámci tohoto PI byl vytvořen i základní firmware prototypu. V rámci konfigurace datové komunikace bylo nejprve nutno vložit SIM kartu do modulu SIM7600 a nastavit přístupový bod pro připojení k internetu za použití AT příkazů dle příslušné dokumentace modulu (SIM7600 datasheet, 2020). Dále byla naprogramována funkcionalita pro odesílání dat nejprve na náhodný server a po zprovoznění vlastního serveru již na tento konkrétní. Byla tedy otestována datová komunikace, jeden ze základních pilířů požadovaného řešení. Jelikož další úpravy komunikace byly již otázkou času na programování a implementaci a nikoli otázkou realizovatelnosti samotné, bylo dále přikročeno k zprovoznění GPS jednotky za účelem pozicování. Za použití dokumentace modulu SIM7600 byl zprovozněn příjem a zpracování signálu, v prvních okamžicích vypisovaného do konzole za účelem rychlého ladění, následně i odesílání polohových dat na vzdálený server. Přesnost signálu byla srovnávána jednak s aktuální známou pozicí, tak i se záznamy z loggerů AMOD, výsledky se zdály být uspokojivé. Podrobnějšímu testování však bylo pozicování podrobeno až v rámci dalšího vývoje.

Jelikož jedním z požadavků bylo i ukládání dat do interního paměťového úložiště, byla zapojena SD karta a zprovozněno ukládání polohových dat. Rovněž byl zapojený i displej, na který byl vypisován aktuální GPS čas, stav datového připojení a stav odesílání zpráv na vzdálený server. Jako poslední díl byl vyzkoušen barometrický senzor. Tento byl identický se senzorem, implementovaným v loggerech LAA, u kterého již byla přesnost úspěšně ověřena. Z konstrukčních důvodů byla integrace senzoru pro použití v celkovém řešení odložena do dalších PI.

5.3 Product increment 3 – testování a optimalizace

V rámci prvních dvou PI byly stanoveny požadavky na výsledné zařízení a otestovány všechny dílčí komponenty prototypu loggeru. Přirozeně tak následovalo ladění funkcionality do požadované výsledné podoby a testování.

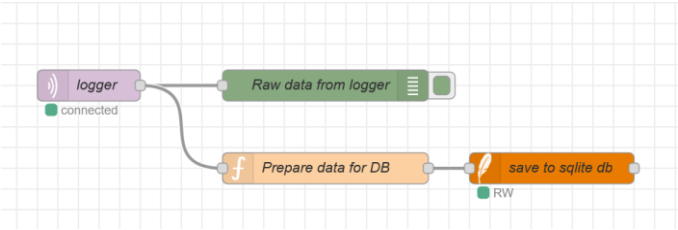
V případě live trackingu byla implementována klíčová funkcionalita, a sice doposílání prozatím nedoručených dat (například následkem výpadku signálu). Dle požadavku Richarda Meredith-Hardyho z komise FAI CIMA je v takovémto případě záhodno po obnovení signálu vždy nejprve doposlat aktuální pozici a poté průběžně doposlat všechny zbývající doposud nedoručené pozice v pořadí od nejnovější k nejstarší. Realizace byla relativně přímočará – ke každé pozici, zapsané do interního úložiště, se ukládá informace o tom, zda byla pozice úspěšně doručena i na server. Zároveň se během každého GPS fixu (ideálně tedy každou sekundu), kdy se logger snaží odeslat data na server, se algoritmus dotazuje na neodeslané pozice, které by na server mohl doposlat. Jak se ukázalo během testování, v případě doposílání řádově desítek pozic najednou, trvá toto odesílání příliš dlouhou dobu a blokuje zpracování následujícího GPS fixu. Z tohoto důvodu byl algoritmus doposílání chybějících pozic optimalizován tak, aby se vždy poslalo maximálně deset pozic v rámci jednoho požadavku na server, a neblokovalo se tak další zpracování pozic.

S ohledem na epidemii viru Covid-19 a nařízená opatření se testování prodloužilo oproti plánu a letové testy zasáhly až do PI4. Během doby, kdy nebylo možné testování provádět, byly oproti původnímu plánu prováděny další práce, především na firmwaru loggeru, serveru a obslužném softwaru.

5.3.1 Spuštění serveru

V rámci třetího PI rovněž bylo vyřešeno ukládání dat, odesílaných na server, do databáze. Na serveru byla vytvořena jednoduchá SQLite databáze, do které se zapisují všechna data, přijatá loggery.

Zápis do databáze je samozřejmě řešen pomocí tzv. Prepared statements, bránící případné SQL injekci, kterou by případný útočník mohl chtít použít k neoprávněnému přístupu k datům. Data, přijatá z loggeru, jsou nejprve předzpracována přípravným algoritmem, a poté uložena do databáze (Obrázek 20 - Proces u ukládání dat z loggeru do databáze na serveru.



Obrázek 20 - Proces u ukládání dat z loggeru do databáze na serveru

```
const str = msg.payload;
if(str.indexOf("no fix")!=-1){
    return {payload: "no fix"};
}

const arr = msg.payload.split(/[,;]/);
node.log(msg.payload);
node.log(arr);
console.log(arr);
msg.params = {
    $imei: msg.topic.replace(/\D/g,''),
    $latDeg: arr[1],
    $latMin: arr[2],
    $latSign: arr[3],
    $lonDeg: arr[5],
    $lonMin: arr[6],
    $lonSign: arr[7],
    $date: arr[8],
    $time: arr[9],
    $gpsAlt: arr[10]
};
return msg;
```

Obrázek 21 - příprava dat k uložení do databáze, prozatimní řešení

5.3.2 Vývoj obslužného softwaru pro konverzi záznamů

V rámci interního úložiště je záznam ukládán v binárním formátu. Tento není lidsky čitelný a je nutné jej konvertovat do vhodného formátu, jakým je například IGC.

Pro tyto účely byl napsán program v Pythonu, schopný binární formát konvertovat. Čtení struktury je ve výsledku jednoduché, Python za tímto účelem implementuje knihovnu „struct“. Pro extrakci binární struktury tak stačí pouze definovat její podobu (Obrázek 22 - rozbalení binární struktury v Pythonu), kde každé písmeno znamená odpovídající datový typ.

```
10  # get filename from input params
11  filename = sys.argv[1]
12  # define binary structure
13  struct_fmt = '=H H L 1c H H L c B B B B B B B H B B B'
14  struct_len = struct.calcsize(struct_fmt)
15  struct_unpack = struct.Struct(struct_fmt).unpack_from
16
```

Obrázek 22 - rozbalení binární struktury v Pythonu

Program pro konverzi dále vytvoří soubor, zapíše hlavičky IGC záznamu a zkonvertuje polohové záznamy odpovídajícím způsobem. Nutno podotknout, že takováto konverze je velmi rychlá. Záznam o velikosti 2133 kB, obsahující záznamy za zhruba 15 hodin běhu loggeru, byl zkonvertován za 0.2 sekundy, jak dokládají screenshoty níže (Obrázek 23 - velikost konvertovaného souboru, Obrázek 24 - rychlost konverze).

```
01/01/2000  01:00 AM          2,184,510 18_4_20____19_13_1.txt
```

Obrázek 23 - velikost konvertovaného souboru

```
D:\live-tracking-loggers-software>python3 convert-binary-records-ALT.py 18_4_20____19_13_1.txt
Start  18:19:26.260226
File converted!
Finish  18:19:26.467434
```

Obrázek 24 - rychlost konverze

5.3.3 Testování během provozu

Jak již bylo zmíněno, k testování během leteckého provozu mělo dojít během března roku 2020. Z důvodu epidemie koronaviru a nařízené karantény toto testování bohužel nemohlo být vykonáváno dle plánu a oproti plánu se protáhlo o několik týdnů, fakticky zasáhlo až do product increment 4.

Následující vizualizace zaznamenaných pozic využívají otevřených map Open Street Map[14] a Google Maps[15].

Určení polohy na konkrétním místě

Testy byly započaty testováním určení polohy na konkrétním místě. Tyto testy proběhly v pořádku, zařízení správně určilo polohu. S ohledem na ochranu soukromí, jelikož testy byly prováděny v místě bydliště (s ohledem na vládní opatření de facto nebyla jiná možnost), výsledky těchto testů nebudou sdíleny v rámci této práce. Rozhodující však jsou výsledky testování během pohybu.

Záznam během pohybu po zemi

S ohledem na karanténní opatření probíhaly testy téměř výlučně během cest automobilem. Pokud byla zahrnuta chůze, byla spojena jen s dílčími přesuny, například po ploše letiště, v dostatečné vzdálenosti od ostatních lidí. Výhodou pěšího testování je možnost prověřit funkčnost i v místech s omezeným příjmem GPS signálu, jako jsou například úzké uličky města, a dále schopnost obnovit příjem signálu po výpadku, jako jsou například tunely metra.

Záznam během letu

Na základě zkušenosti s vývojem předchozího typu loggeru a v minulosti provedených měření a testů předpokládám, že příjem GNSS signálu během letu bude v letadle během letu lepší než na zemi díky absenci překážek, rušících recepci signálu.

Jedinou výjimkou mohou být celokovové letouny, u nich je nutno dbát na správné umístění loggeru, resp. jeho antény, mimo oblast stíněnou kovovými částmi letounu. Během vývoje předchozího typu loggeru však bylo experimentálně zjištěno, že tehdy použitý typ GPS uBlox Neo-7M vykazuje stabilnější a kvalitnější příjem GPS signálu než typ SiRFstar III, používaný v loggerech AMOD AGL 3080. V letadlech celokovové konstrukce je čip uBlox schopný získat GPS fix a stabilně zaznamenávat i tehdy, když AMOD nebyl schopný fix získat. Tato skutečnost nebyla dále analyzována, jednou z možných příčin však může být větší počet kanálů v případě čipu uBlox, umožňující kontinuálně přijímat signál z většího množství satelitů zároveň, což znamená, že při ztrátě signálu z jednoho satelitu jej čip ihned může nahradit informacemi z jiného satelitu. Logger AMOD se starším GPS čipem nedisponuje tolika kanály a v případě ztráty signálu z kritického množství satelitů tak musí opětovně čekat na nový fix. Tato činnost trvá z podstaty fungování systému GPS variabilní dobu a nelze předvídat, během této doby je GPS čip bez fixu a nezaznamenává tedy polohu. V případě využití vícekanálového čipu se

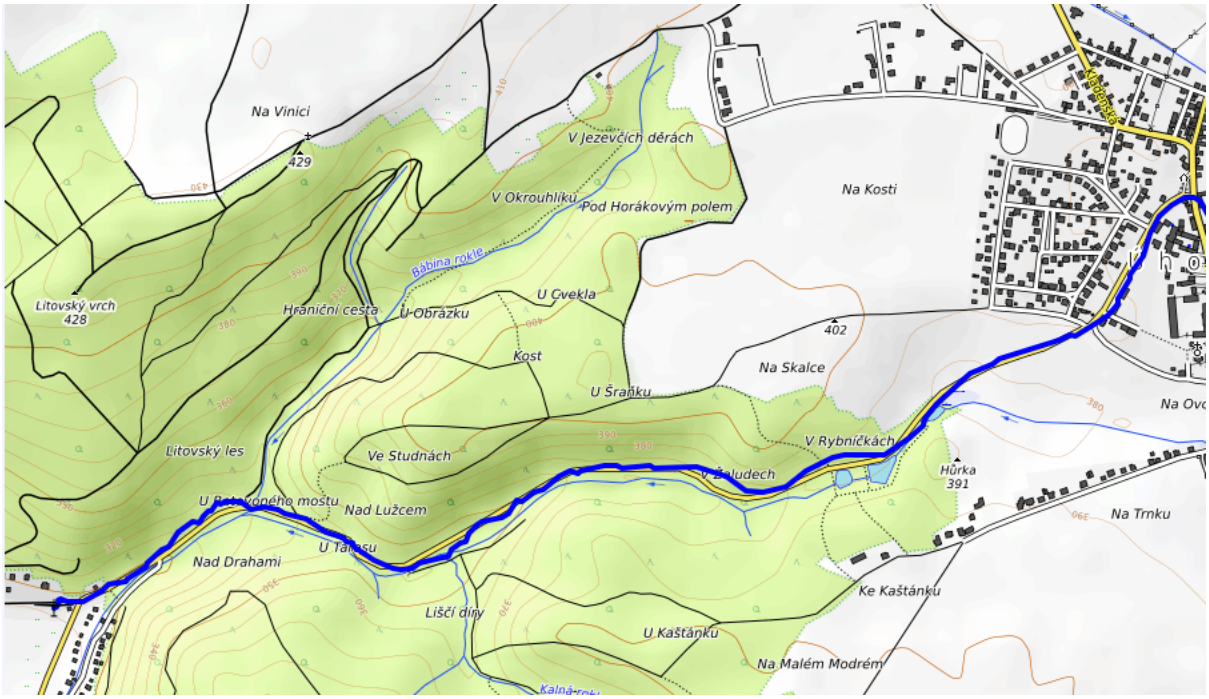
[14] https://www.openstreetmap.org/copyright
[15] https://www.google.com/permissions/geoguidelines/

předpokládá stabilnější příjem signálu. Tato skutečnost by vysvětlovala lepší fungování modernějšího čipu uBlox ve ztížených podmínkách. Typ a velikost použité antény byl stejný pro AMOD AGL3080 i nově vyvíjeného loggeru s uBlox Neo-7M a lze tedy předpokládat, že na stabilitu signálu neměla přímý vliv.

5.3.4 Záznam jízdy automobilu – okolí Prahy

Celkový záznam trasy (Obrázek 25) je kompletní a kopíruje skutečně projetou trasu. Detailní pohled na počáteční úsek cesty odhalil drobné nepřesnosti v záznamu. V této lokalitě se jednalo o silnici v údolí obklopenou stromy, kde se dá předpokládat zhoršený příjem GPS signálu. I přesto je záznam kontinuální a relativně přesný, ujetá trasa je jednoznačná. Záznam z míst s kvalitním příjmem signálu je již plynulý a precizní.

Obrázek 25 - celková trasa (OpenStreetMap, 2020)

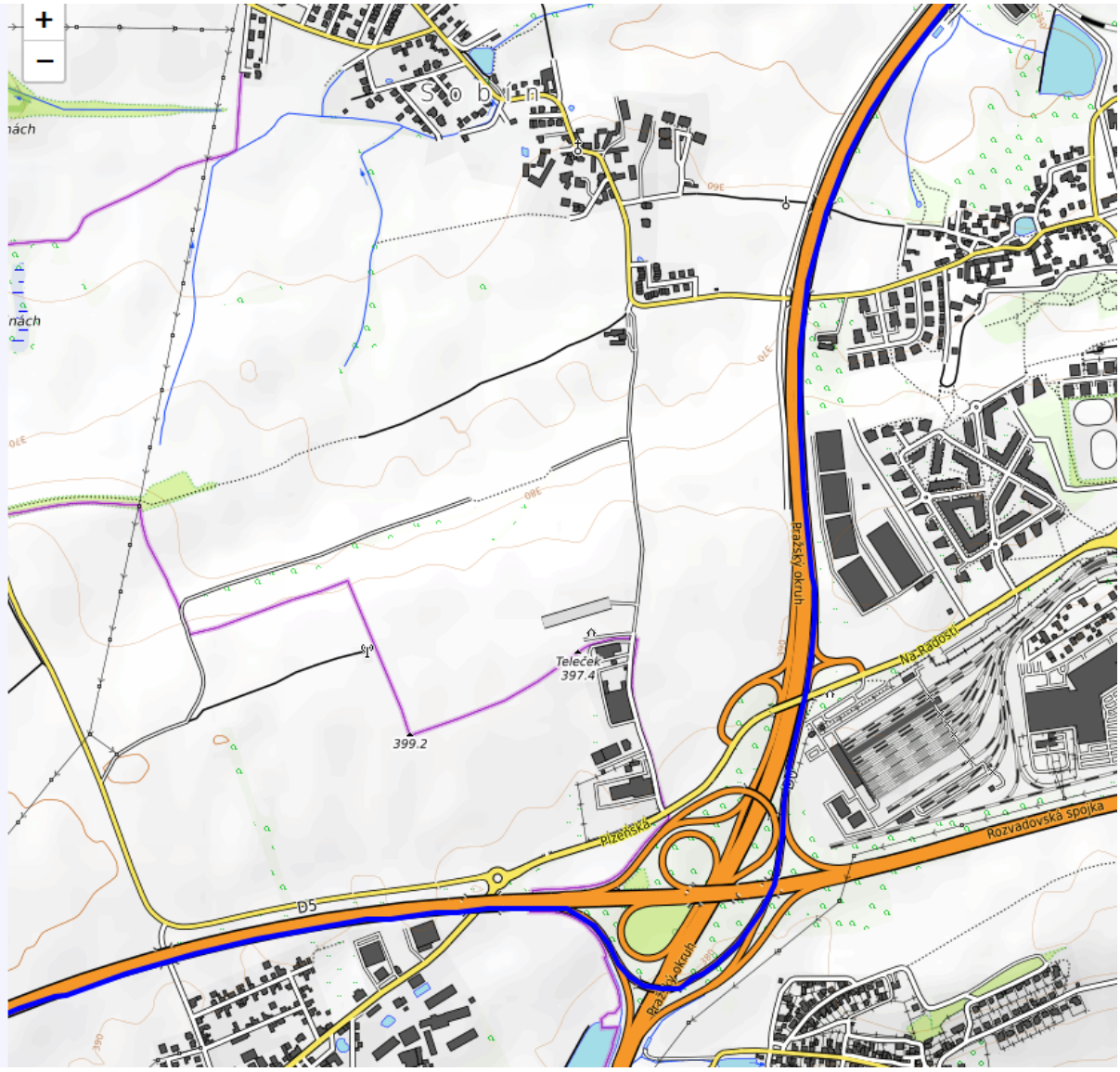


Obrázek 26 - detail záznamu v zalesněném údolí (OpenStreetMap, 2020)

Detailní pohled na záznam v údolí (Obrázek 26) vykazuje drobné odchylky od skutečně ujeté trasy. Ze záznamu je však ujetá trasa jednoznačně rozpoznatelná (Obrázek 27) a odchylky se pohybují v řádu metrů. Záznam kopíruje křivku silnice. Test je tedy v pořádku. I když se během leteckých navigačních soutěží letouny v takovémto zalesněném údolí pohybovat samozřejmě nebudou, kvalita záznamu je dostačující pro použití k vyhodnocení letecké soutěže, což za Leteckou amatérskou asociaci potvrdil i rozhodčí Bc. Marek Velát.

Obrázek 27 - záznam v zalesněném údolí je jednoznačný (OpenStreetMap, 2020)

Během jízdy po dálnici (Obrázek 28), kdy příjem signálu již nebyl stíněn okolním terénem, je záznam dle očekávání kvalitnější a přesnější.



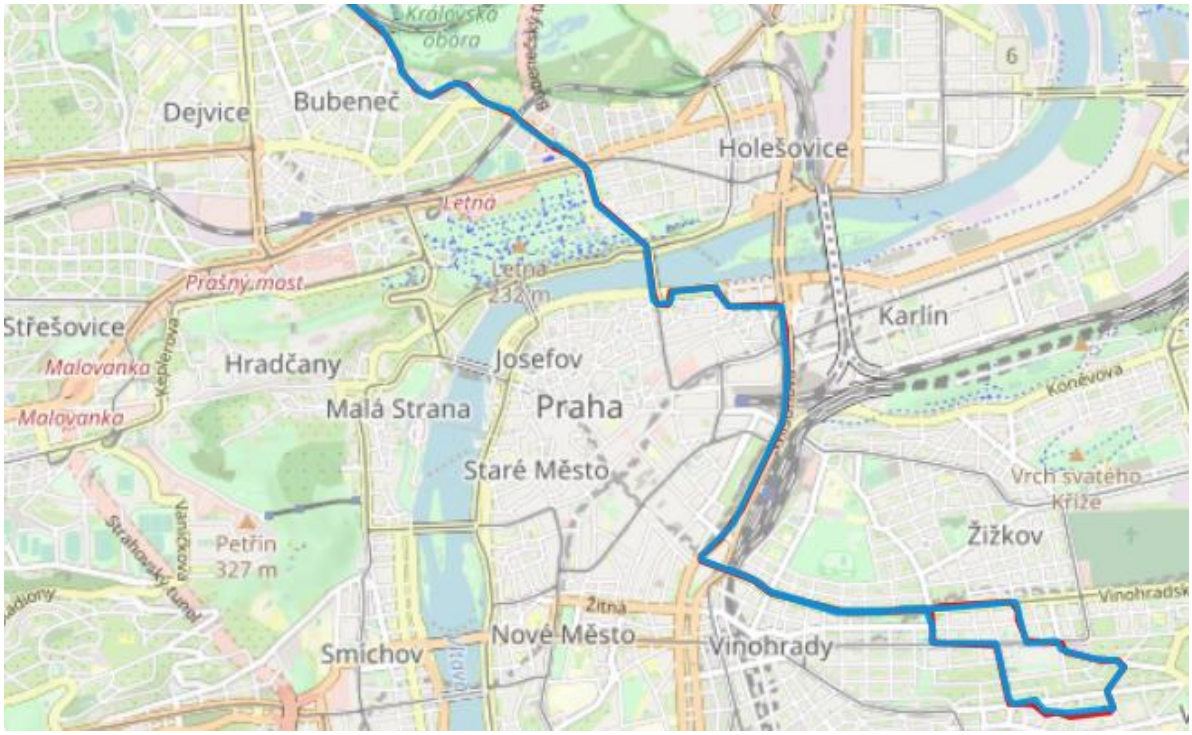
Obrázek 28 - kvalitní záznam během jízdy po dálnici (OpenStreetMap, 2020)

5.3.5 Záznam jízdy automobilu - Praha

Během jízdy automobilem byl srovnáván prototyp loggeru s loggerem LAA. Během cesty automobil projel Letenským tunelem, došlo tedy ke krátkodobému výpadku pozicování a jeho následnému obnovení.

Srovnání prototypu a loggeru LAA

Výsledné záznamy vypadají téměř totožně (Obrázek 29).



Obrázek 29 - srovnání prototypu a loggeru LAA (OpenStreetMap, 2020)

Výjimku tvoří část záznamu ve Vršovicích v pravé spodní části obrázku, kdy se polohování liší. Detailní pohled (Obrázek 30) ukazuje, že realitě přesněji odpovídá červený záznam, patřící právě prototypu.

Obrázek 30 - rozdíl v záznamech prototypu (červená) a loggeru LAA (modrá) (OpenStreetMap, 2020)

Letenský tunel

Během jízdy Letenským tunelem (Obrázek 31) oba loggery shodně ztratily příjem signálu po dobu pohybu v tunelu. Po vyjetí z tunelu se příjem signálu obnovil. Tunelem bylo projížděno od severu na jih (směrem z Letenského náměstí na nábřeží Edvarda Beneše).

Obrázek 31 - srovnání záznamu při projízdění Letenského tunelu – prototyp červeně, LAA logger modře (OpenStreetMap, 2020)

Ačkoli jsou záznamy velmi podobné, s rychlostí opětovného určení pozice po vyjetí z tunelu se zdá lepší prototyp loggeru, značený červenou linkou, který první polohu určil blíže výjezdu z tunelu (Obrázek 32).

Obrázek 32 - obnovení záznamu po vyjetí z tunelu – prototyp červeně, LAA logger modře (OpenStreetMap, 2020)

Výsledek

Ačkoli oba záznamy jsou precizní a v některých částech vychází prototyp ve srovnání přesněji, analýzou souborů se záznamem bylo zjištěno, že v případě prototypu je zaznamenáno výrazně méně pozic za stejnou dobu běhu.

Za dobu mezi 16:58:30 - 17:55:23 (3413 sekund) je v případě prototypu zaznamenáno 2298 pozic, v případě loggeru LAA 3374 pozic. Analýzou souboru se záznamem bylo zjištěno, že v určitých časových úsecích prototyp nezaznamenával pozice, respektive zaznamenal například každou druhou. Analýzou polohy během této doby bylo zjištěno, že se loggery nepohybovaly v místě s výrazně zhoršeným příjmem GPS signálu. Příčina problému se skrývala ve firmwaru loggeru a byla záhy opravena.

5.3.6 Vyhodnocení pozemních testů

Pozemní testy dopadly úspěšně. Záznam je dostatečně kontinuální a přesný. Jelikož na zemi se vzhledem k přítomnosti k překážek, bránících kvalitnímu a nerušenému příjmu GPS signálu dá předpokládat nižší preciznost určování polohy a jelikož testy dopadly úspěšně, mohlo být přikročeno k letovým testům, které by jinak pro úvodní testování byly oproti testům pozemním značně neekonomické.

5.3.7 Letové testy

Testování loggeru proběhlo na letounech, používaných v rámci leteckých navigačních soutěží, a to konkrétně na ultralehkém letadle Ekolot JK05L Junior (Obrázek 33) a letounu Cessna 152 (Obrázek 34). Ultralehký Junior se vyznačuje kompozitovou konstrukcí, zatímco Cessna je celokovová. Ani v jednom typu nemají současně používané soutežní loggery problém s příjmem a kvalitou GPS signálu. Zjištění bylo vhodné ověřit i pro prototyp nového loggeru. Několika provedenými letovými testy bylo potvrzeno, že v obou typech letadel probíhá příjem GPS signálu dobře a kvalitně, jak ilustrují níže analyzované záznamy.

Obrázek 33 – soutěžní Ekolot JK05L OK-UUS90 využitý během testování

Obrázek 34 – soutěžní Cessna 152 OK-JHM využitá během testování

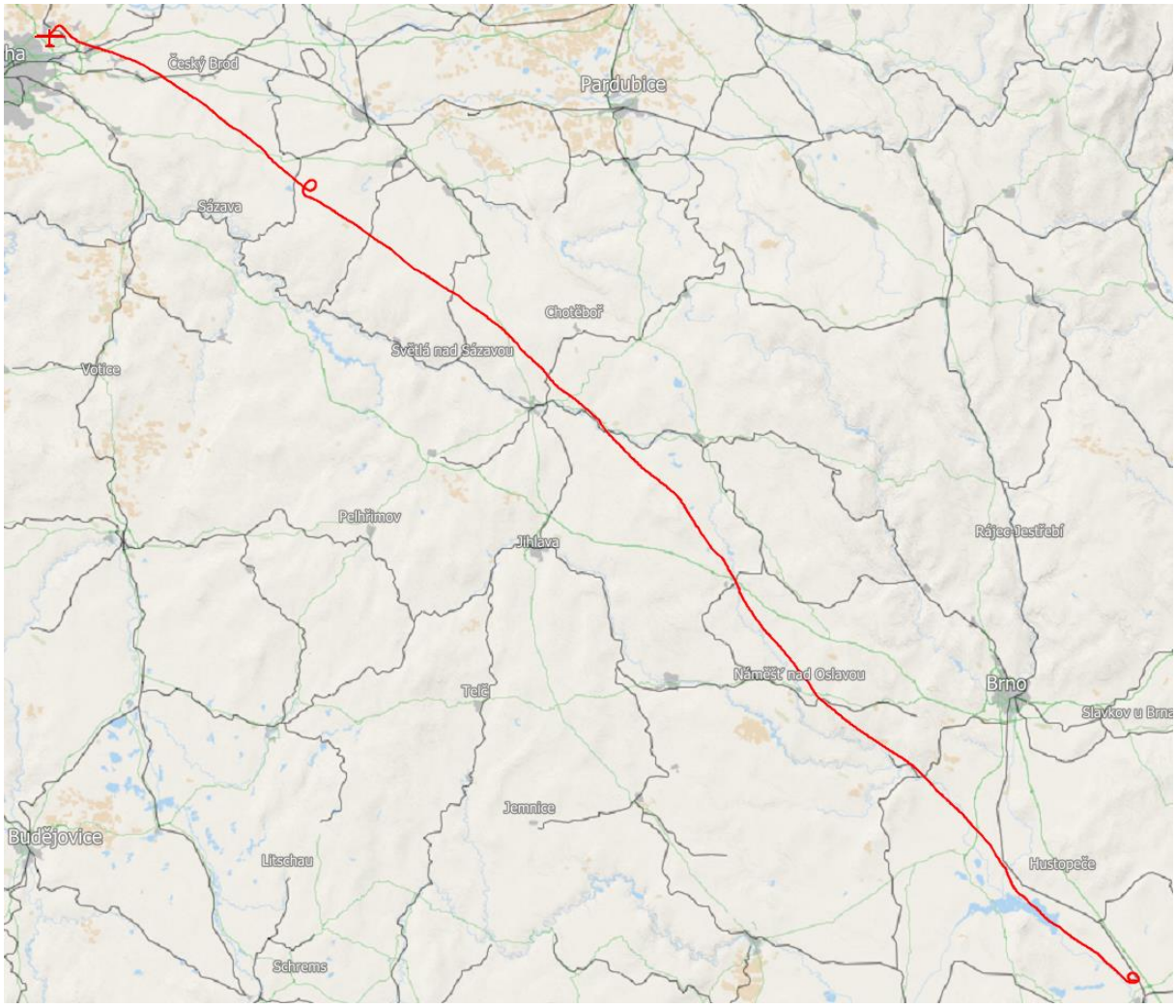
5.3.8 Záznam letu – středa 8. 4. 202

První letová zkouška byla provedena na dlouhém navigačním letu Slaný – Letňany – Břeclav – Slaný, realizovaného v rámci projektu Piloti LIDEM, kdy byly z pražských Letňan do nemocnice v Břeclavi letecky doručovány ochranné zdravotnické masky Covmask, vyvíjené na ČVUT. Celkově se jednalo o 616 kilometrů letu v trvání zhruba čtyř hodin. Záznam letu byl korektní po celou dobu.

Slaný – Břeclav

Testování na trase Slaný – Letňany – Břeclav (Obrázek 35, Obrázek 36) proběhlo v pořádku během celé délky trasy.

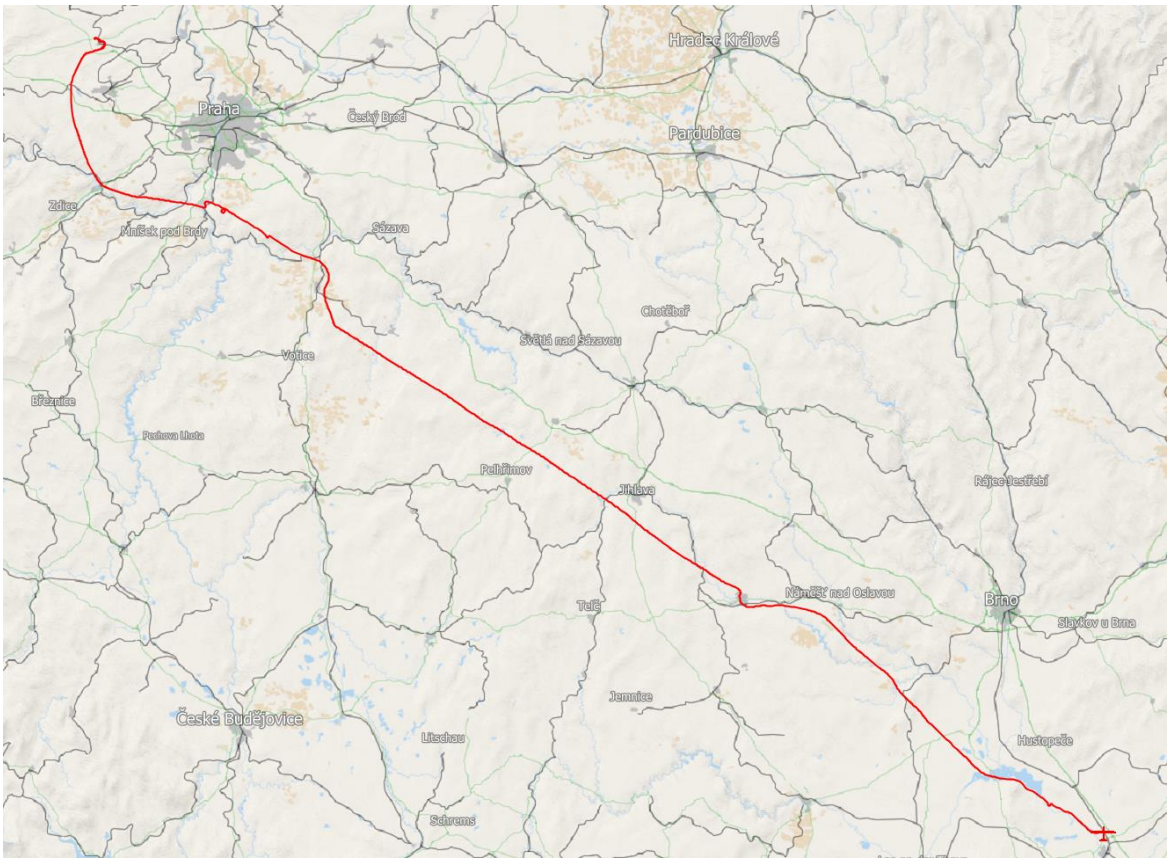
Obrázek 35 - trasa Slaný – Letňany (OpenStreetMap, 2020)



Obrázek 36 - trasa Letňany – Břeclav (OpenStreetMap, 2020)

Břeclav – Slaný

Také během letu na trase Břeclav – Slaný nedošlo k výpadku GPS a pozice jsou korektně zaznamenány (Obrázek 37).



Obrázek 37 - testování na trase Břeclav – Slaný (OpenStreetMap, 2020)

V rámci letu byly testovány i ostré zatáčky – kvůli splnění certifikační podmínky FAI CIMA, vyžadující, že v případě náhlých změn směru nesmí docházet k dopočítávání pozice na základě předchozích pozic, a má být zaznamenávána skutečná trajektorie letu. Test proběhl v pořádku (Obrázek 38).

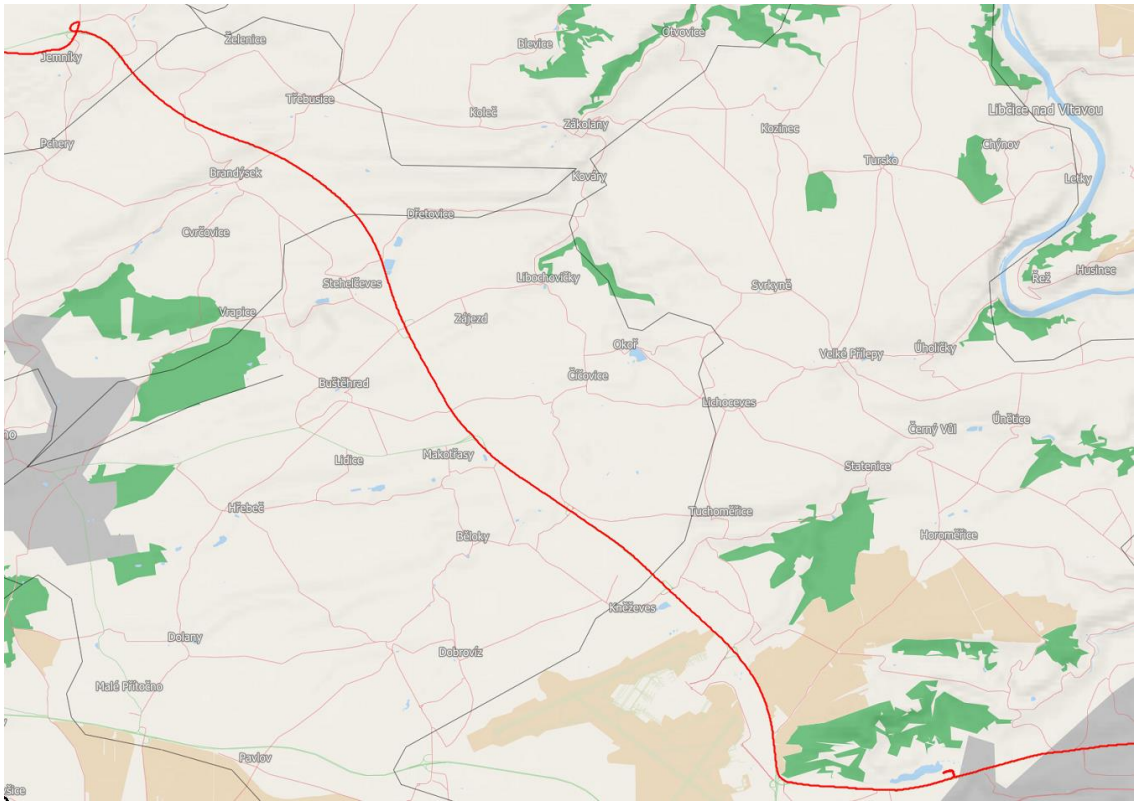
Obrázek 38 - testování v ostré zatáčce (OpenStreetMap, 2020)

5.3.9 Záznam letu – úterý 14. 4. 2020

V úterý 14. 4. 2020 byla zaznamenávána trasa automobilem, pěšky i let samotný. Všechny testy dopadly v pořádku a záznam je kontinuální a přesný.

Trasa automobilem

Zaznamenaná trasa cesty automobilem odpovídá skutečné trase a záznam se přesně drží silnic (Obrázek 39).



Obrázek 39 - záznam trasy automobilem (OpenStreetMap, 2020)

Krátký úsek chůze v Praze – Veleslavíně je rovněž zaznamenán precizně a odpovídá skutečnosti (Obrázek 40).

Obrázek 40 - detail záznamu během jízdy autem a chůze (OpenStreetMap, 2020)

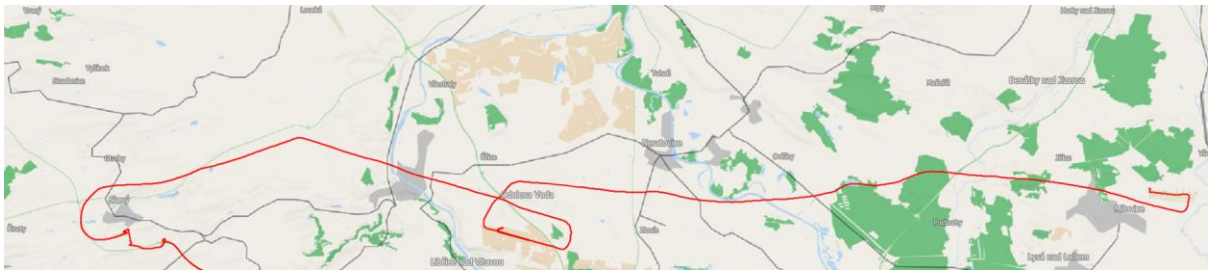
Pohyb pěšky a pojíždění letadlem

Pohyb na letišti je opět přesný (Obrázek 41). Z pravého horního rohu vede záznam příjezdu automobilem, na okraji hangáru je zřetelný počátek chůze a pohyb pěšky. Na ten navazuje počátek pojíždění letadlem na ranvej letiště, rovněž přesný a skutečnosti odpovídající. Logger dokonce správně snímal pozici i uvnitř hangáru, jak je z obrázku zřetelné.

Obrázek 41 - záznam během cestě automobilem, chůze a pojíždění letadlem na letišti Slaný (Google Maps, 2020)

Let Slaný - Milovice

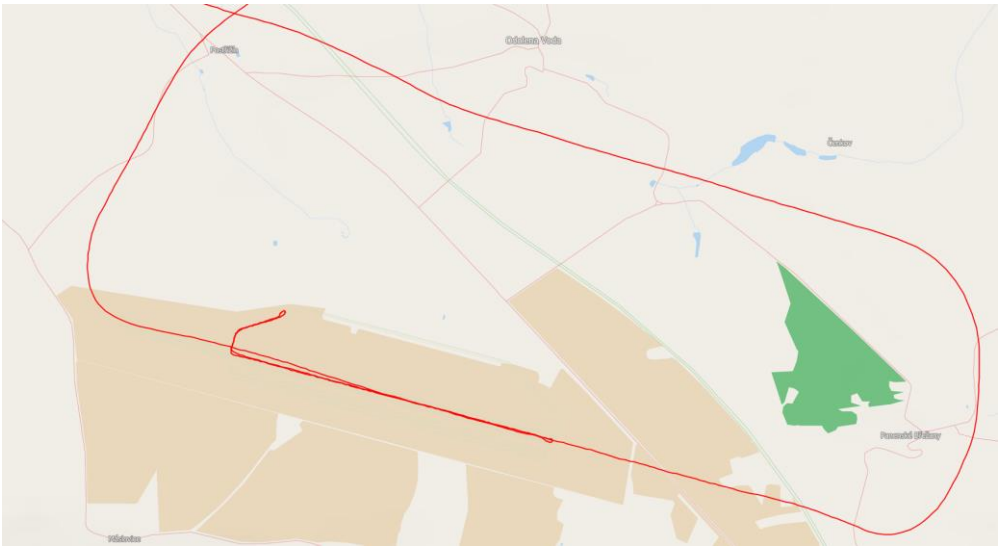
Rovněž průběh letu je v pořádku zaznamenán (Obrázek 42), včetně mezipřistání na letišti Vodochody.



Obrázek 42 - záznam letu ze Slaného do Milovic (OpenStreetMap, 2020)

Letiště Vodochody

Při letu ze Slaného do Milovic bylo provedeno přiblížení a mezipřistání na letišti Vodochody, včetně vyjetí z dráhy na stojánku a opětovný odlet. Všechny fáze letu jsou zaznamenané korektně (Obrázek 43).



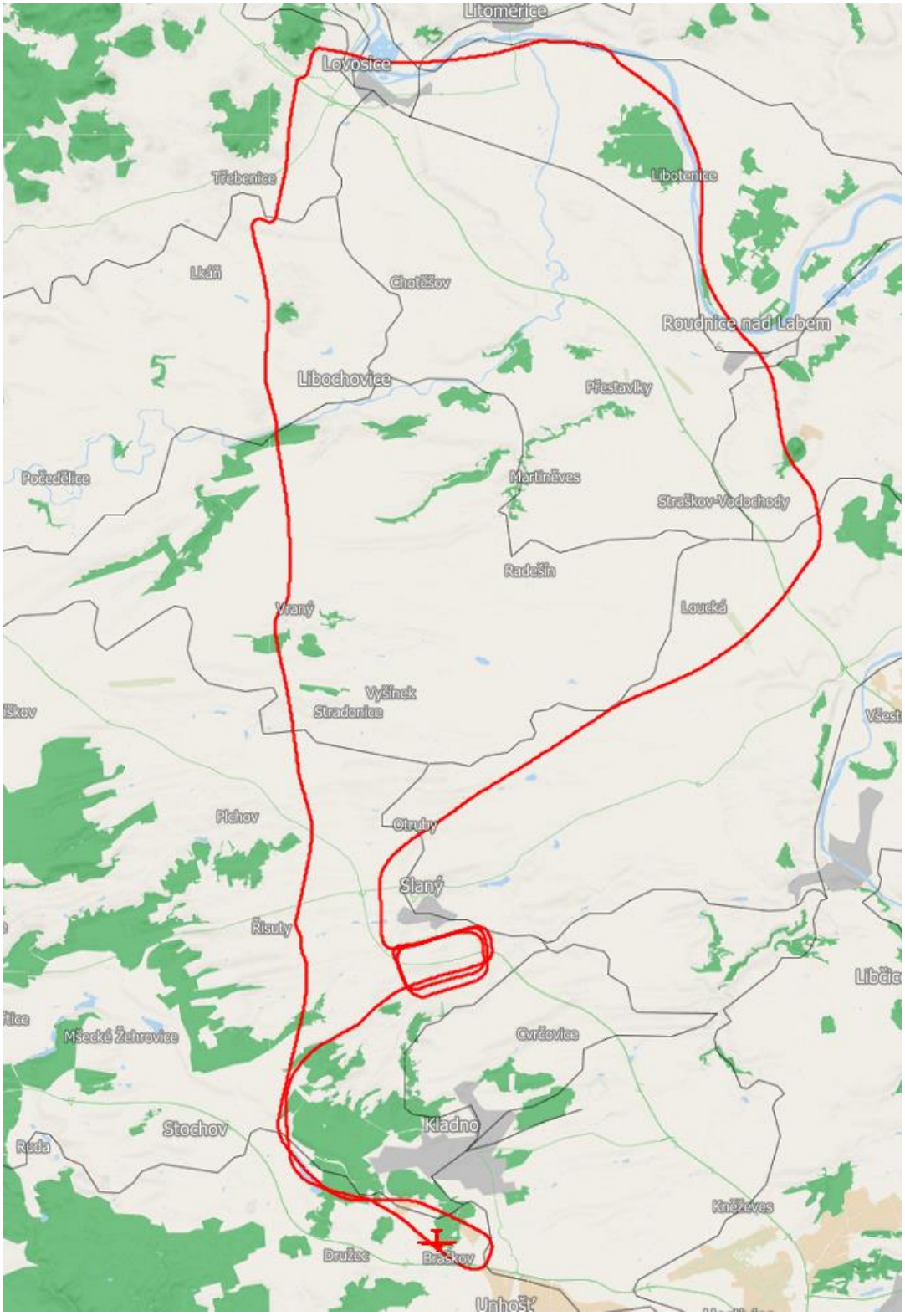
Obrázek 43 - záznam letu po letištním okruhu letiště Vodochody, přistání, pojíždění a vzletu (OpenStreetMap, 2020)

Záznam pojíždění po zemi a zaparkování na stojánce je rovněž precizní a odpovídá skutečnosti (Obrázek 44). Letoun se pohyboval po vyznačených středových čárách dráhy a pojížděcí dráhy, což je ze záznamu patrné. Přesnost záznamu je vysoká. Na obrázku je zaznamenáno vyjetí z dráhy, zaparkování na stojánce a opětovné najetí na dráhu, dále trasa odletu, vedoucí již mimo dráhu.

Obrázek 44 - záznam během pojíždění na letišti Vodochody (Google Maps, 2020)

5.3.10 Záznam letu – Středa 15. 4. 2020

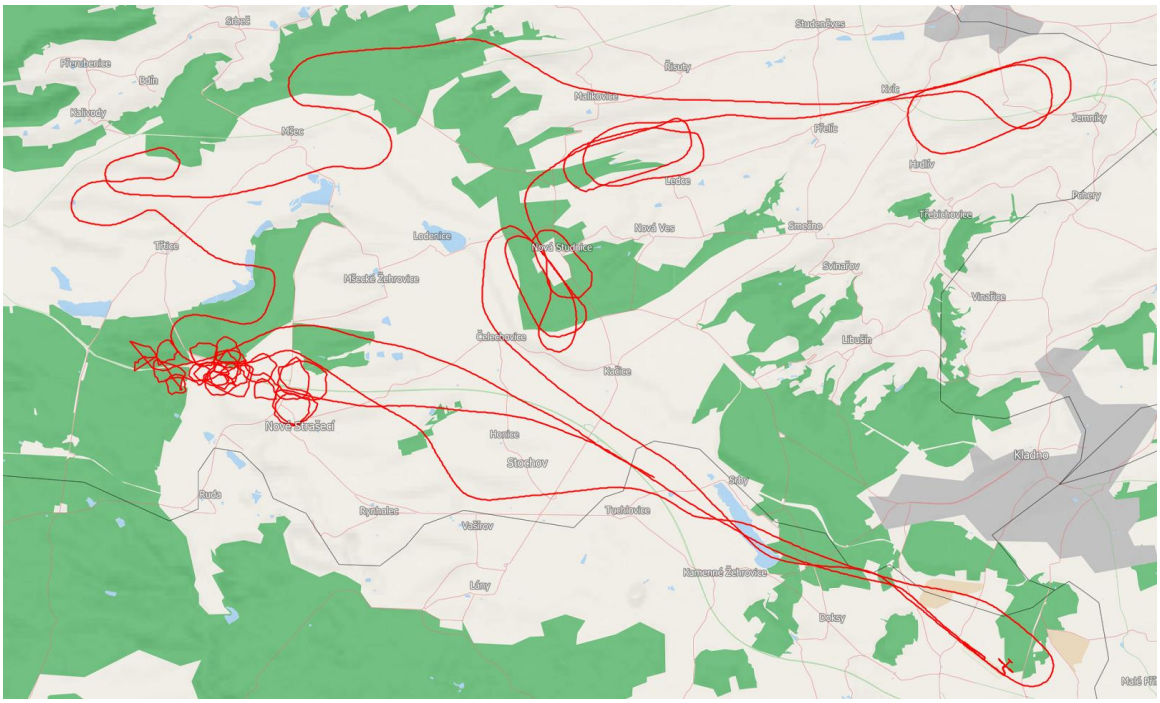
Letový test ve středu 15. 4. 2020 neodhalil žádné nedostatky. Je kontinuální a přesný, odpovídá skutečné trase letu (Obrázek 45). V pořádku je rovněž záznam ostrých zatáček o devadesát stupňů, patrný ve vrchní levé části obrázku.



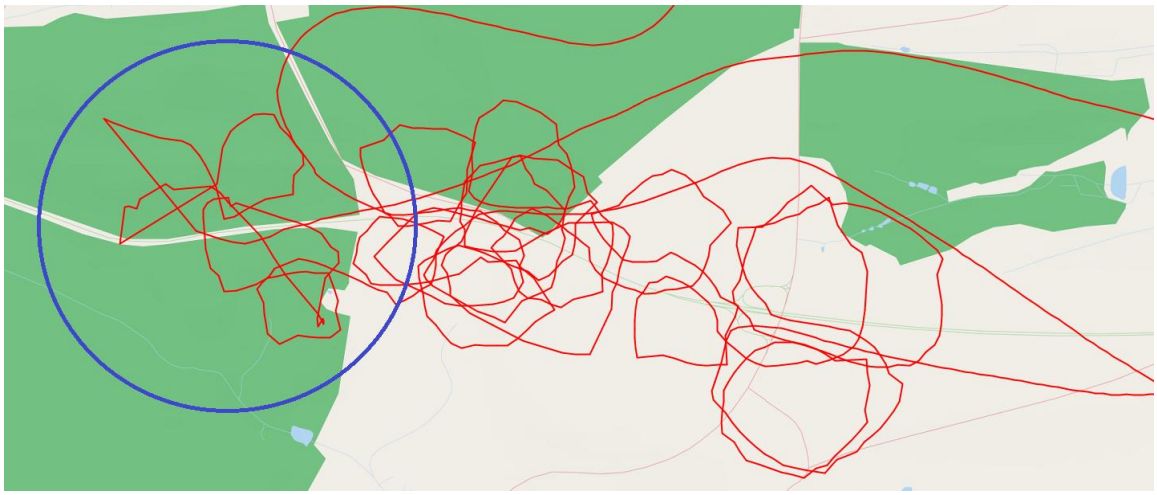
Obrázek 45 - záznam letu ze středy 15. 4. (OpenStreetMap, 2020)

5.3.11 Záznam letu – Čtvrtek 16. 4. 2020

Během testování ve čtvrtek 16. 4. 2020 probíhal záznam celkově kontinuálně a přesně (Obrázek 46). Pouze v případě nácviku ostrých zatáček, jak je vidět v levé části Obrázek 47, došlo k nepřesnostem při vykreslování kružnic. Toto je způsobeno dvěma faktory – zaprvé zatáčka je časově velmi krátká a interval mezi jednotlivými záznamy poloh je jedna sekunda, za kterou se pozice letounu výrazně změní, což vede k naoko hrubé, ostře vypadající čáře záznamu. Druhý faktor je, jak je vidět v úplně levé části detailního pohledu, krátký výpadek (označeno modrým kroužkem) v příjmu GPS signálu, což vedlo ke spojení uložených pozic rovnou čárou. Výpadek příjmu byl pravděpodbně způsoben prudkým obratem, který zapříčinil ztrátu spojení s některými satelity, protože příjem signálu byl stíněn trupem letadla. Tento faktor není možno ovlivnit.



Obrázek 46 - trasa letu 16. 4. 2020 (OpenStreetMap, 2020)



Obrázek 47 - záznam ostrých zatáček z letu 16. 4. 2020 (OpenStreetMap, 2020)

5.3.12 Záznam letu - pátek 17. 4. 2020

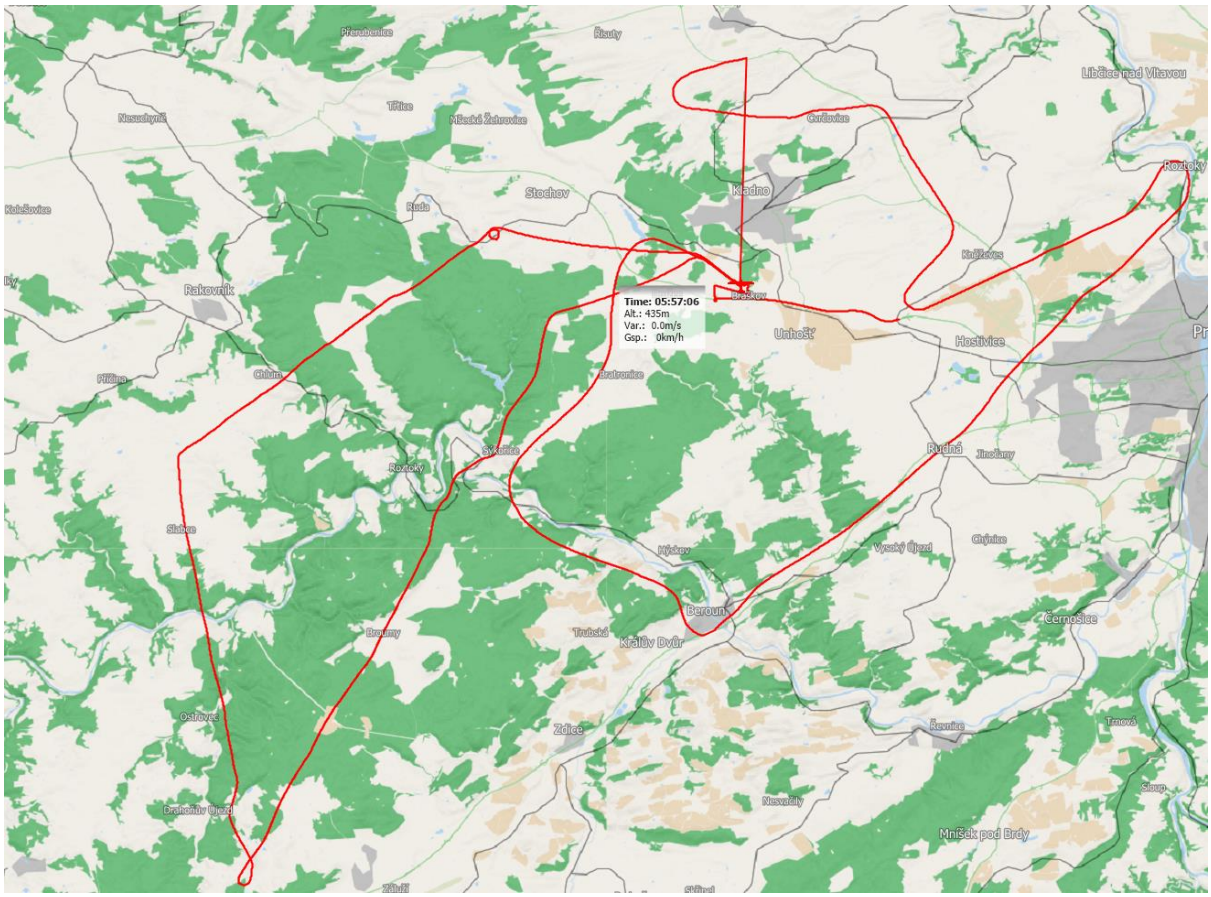
V pátek 17. 4. byly vykonán let za účelem srovnání přesnosti a kvality záznamu z loggerů AMOD, loggerů LAA a nově vyvíjeného prototypu.

Loggery byly umístěny do nákladového prostoru letounu Cessna 152 tak, aby byl minimalizován počet možných překážek příjmu GPS signálu a umožněn „výhled“ na oblohu.

Prototyp

Během provozu loggeru došlo na pozici mezi obcemi Slaný a Kladno k přerušení dodávky ze zdroje energie (powerbanky) a následnému vypnutí loggeru. Tento výpadek je značen spojitou rovnou čárou mezi Slaným a Kladnem ve vrchní částí obrázku, spojující zaznamenané dvě pozice před přerušením napájení a po jeho obnovení.

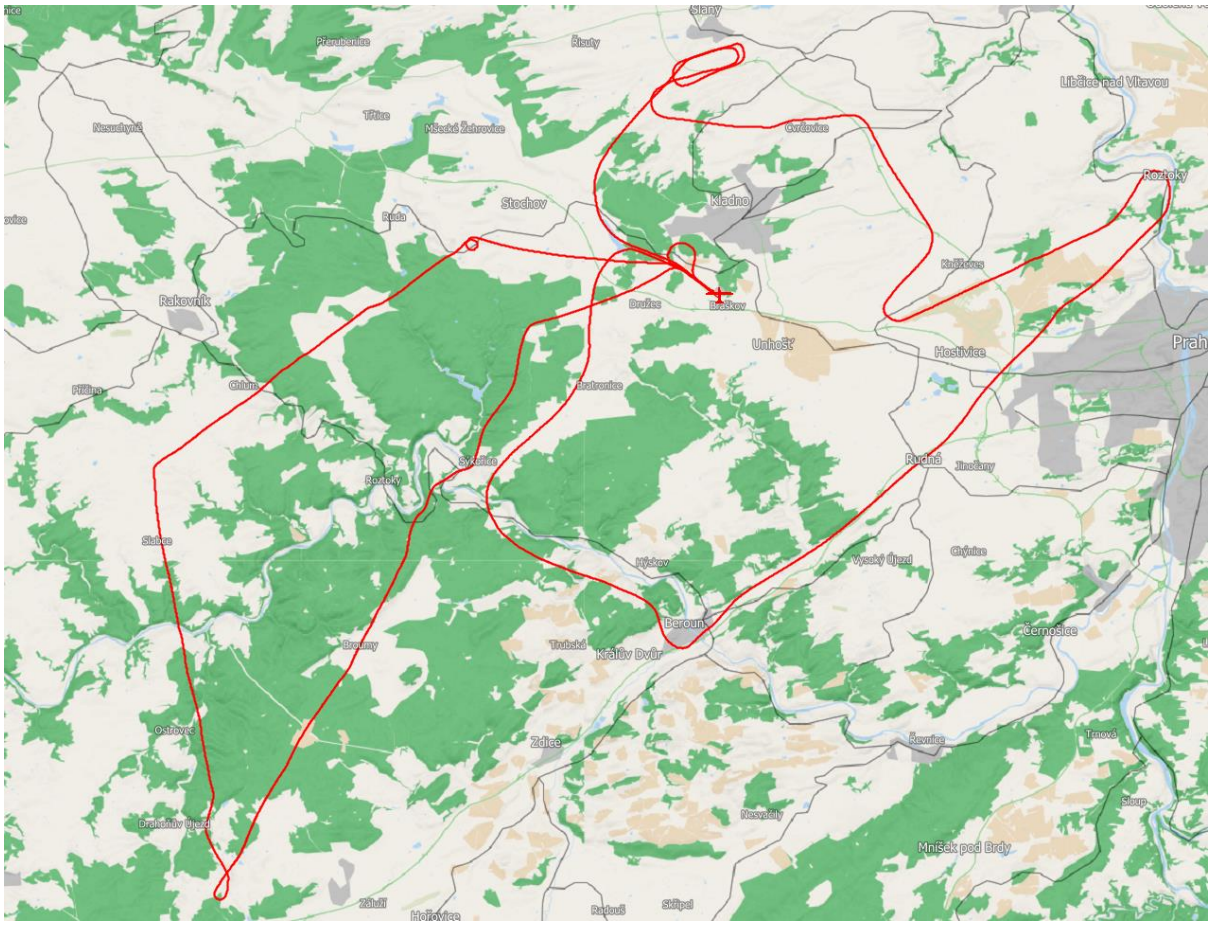
Z hlediska skutečně letěné trati záznam odpovídá realitě (Obrázek 48).



Obrázek 48 - záznam z prototypu (OpenStreetMap, 2020)

AMOD

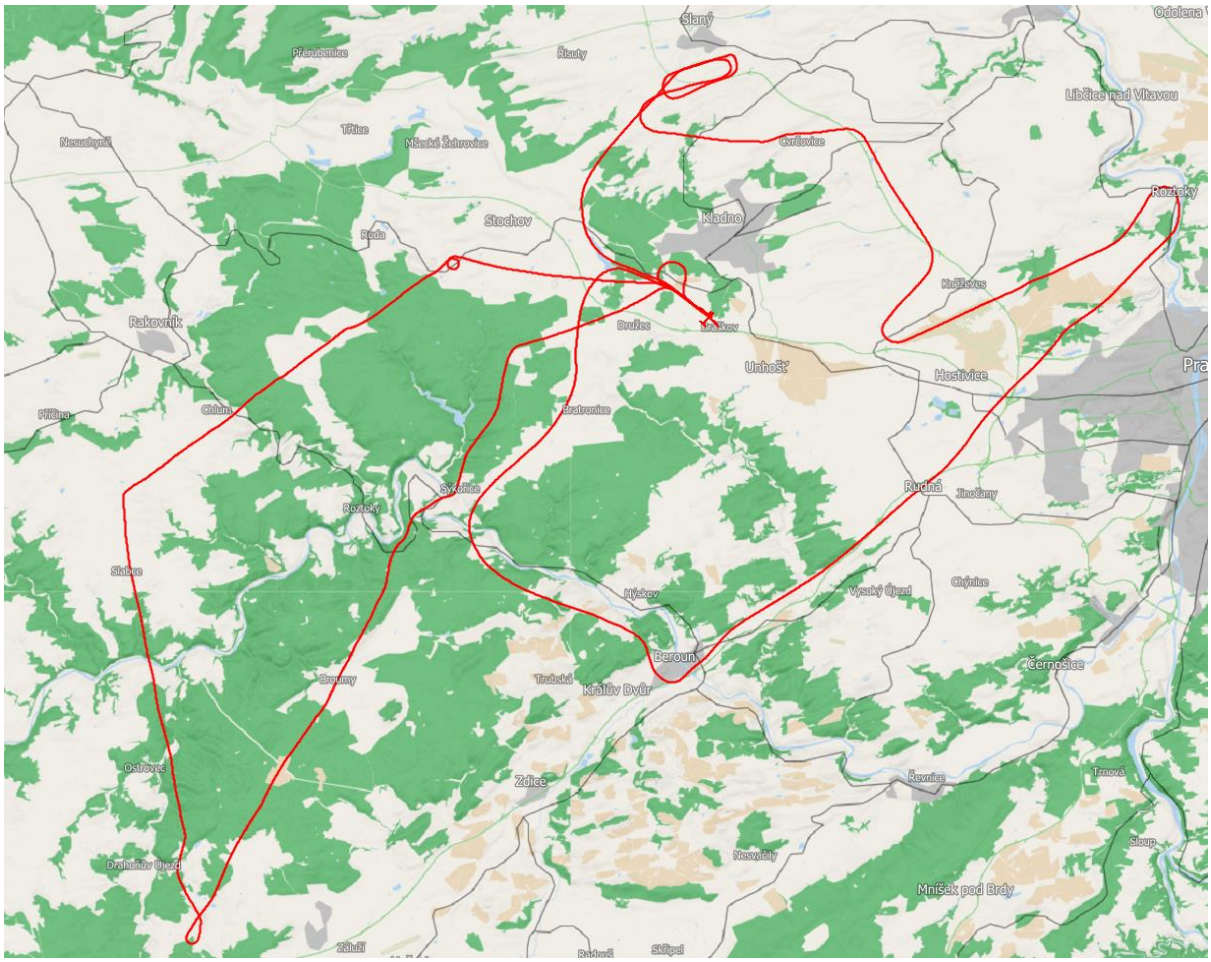
Logger AMOD pracoval po celou dobu letu v pořádku a vyprodukoval korektní záznam, odpovídající realitě (Obrázek 49).



Obrázek 49 - záznam z loggeru AMOD (OpenStreetMap, 2020)

LAA loggery

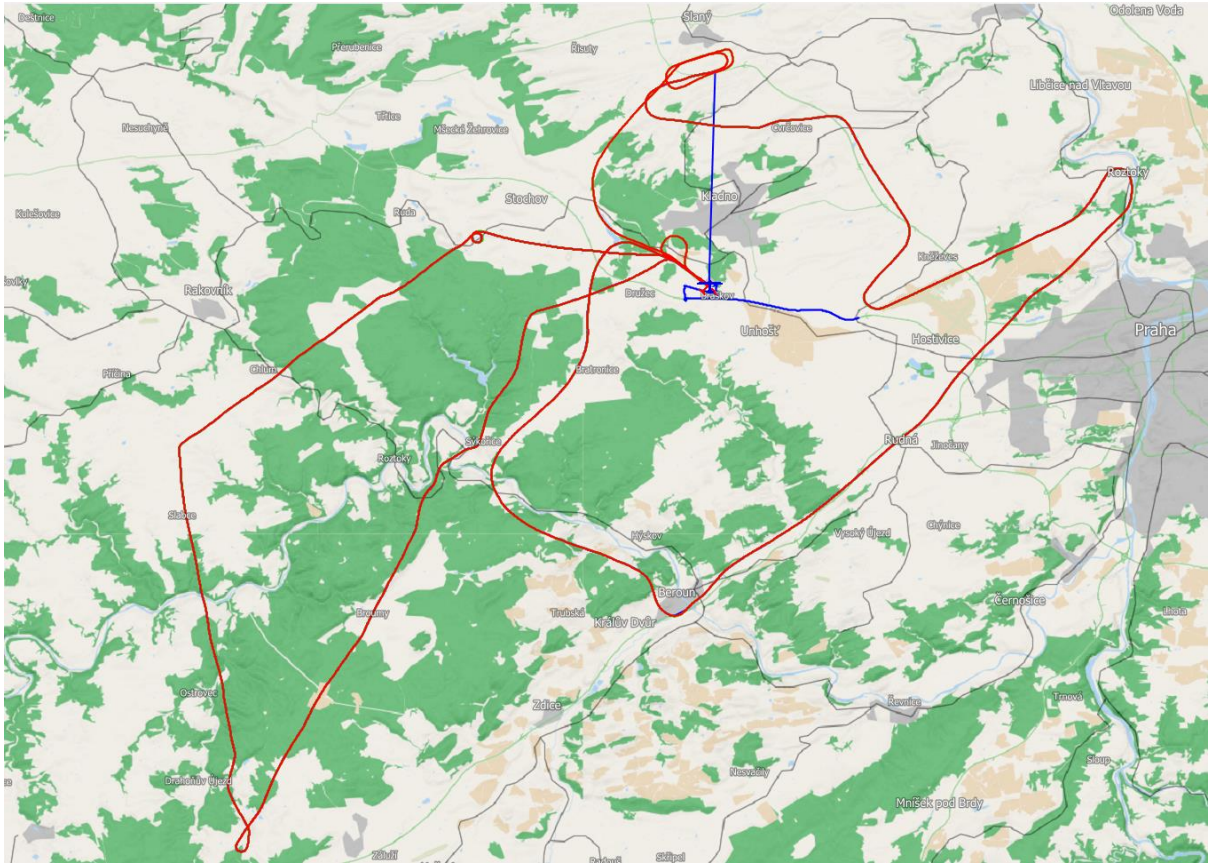
Logger LAA pracoval po celou dobu letu v pořádku a vyprodukoval korektní záznam, odpovídající realitě (Obrázek 50).



Obrázek 50 - záznam z loggeru LAA (OpenStreetMap, 2020)

Srovnání

V následujícím obrázku (Obrázek 51) jsou obsaženy záznamy z loggerů AMOD (zářivě zelený), LAA (červená) a prototypu (modrá). Po většinu doby se záznamy překrývají a je tak vidět jen jeden z nich – zde červený. Na mapě je vidět modrou křivkou signalizovaný výpadek prototypu, popsaný výše, mezi Slaným a Kladnem v severní části. Dále je vidět záznam, kopírující silnici směrem na Prahu. K tomu došlo proto, že zatímco loggery AMOD a LAA byly vypnuty již na letišti, prototyp nového loggeru byl ponechán zapnutý ještě během následné jízdy automobilem za účelem sledování informací pro ladění. Část záznamu, kopírující silnici, je tedy v pořádku. Část mezi Slaným a Kladnem je chybná a byla způsobena náhlým vypnutím loggeru.



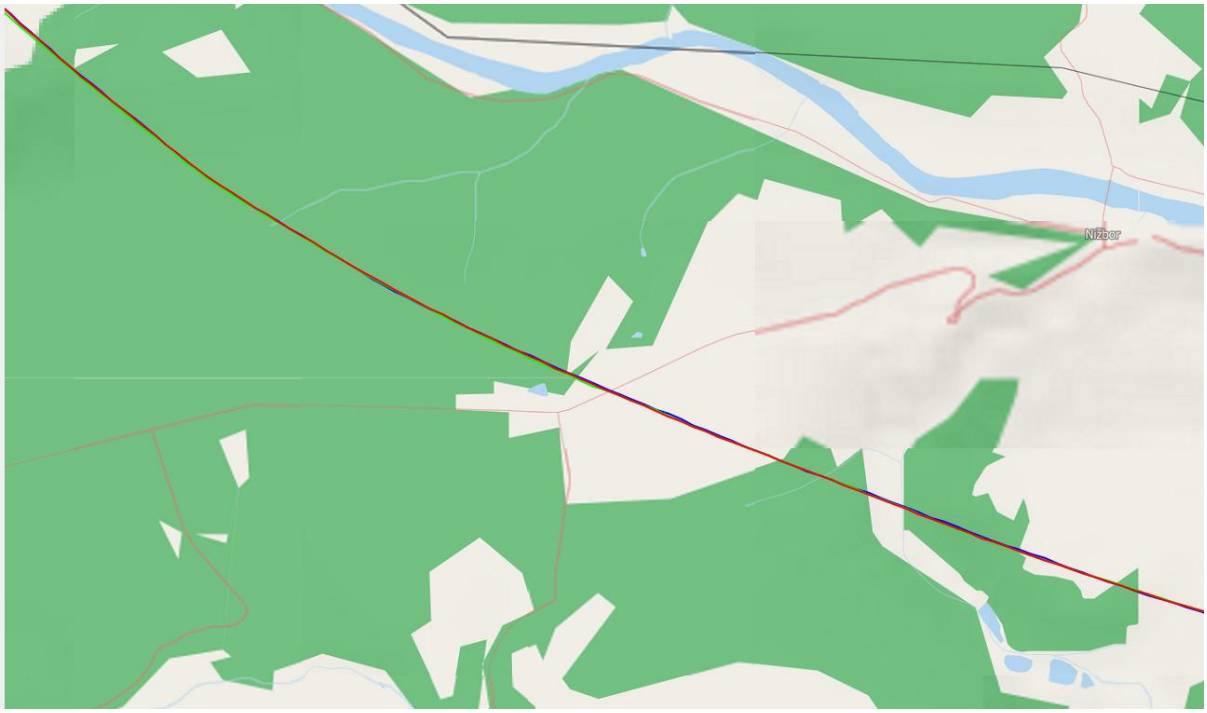
Obrázek 51 - srovnání překryvu záznamu prototypu, loggeru AMOD a loggeru LAA (modrá, zelená a červená křivka) (OpenStreetMap, 2020)

Detail záznamu po vzletu (resp. vzletech) z letiště Kladno je následovný (Obrázek 52). Výsledek záznamů loggerů je srovnatelně přesný. Drobné odchylky mohou být způsobeny i způsobem konverze – zaokrouhlovací chyba při přepočítávání souřadnic. V případě dalšího vývoje budou dále laděny, přesnost je však dostačující.

Obrázek 52 - srovnání záznamu loggerů po vletu z letiště Kladno (OpenStreetMap, 2020)

Během letu jsou pak odchylky minimální, jak značí následující srovnání záznamů (Obrázek 53, Obrázek 54, Obrázek 55, Obrázek 56).

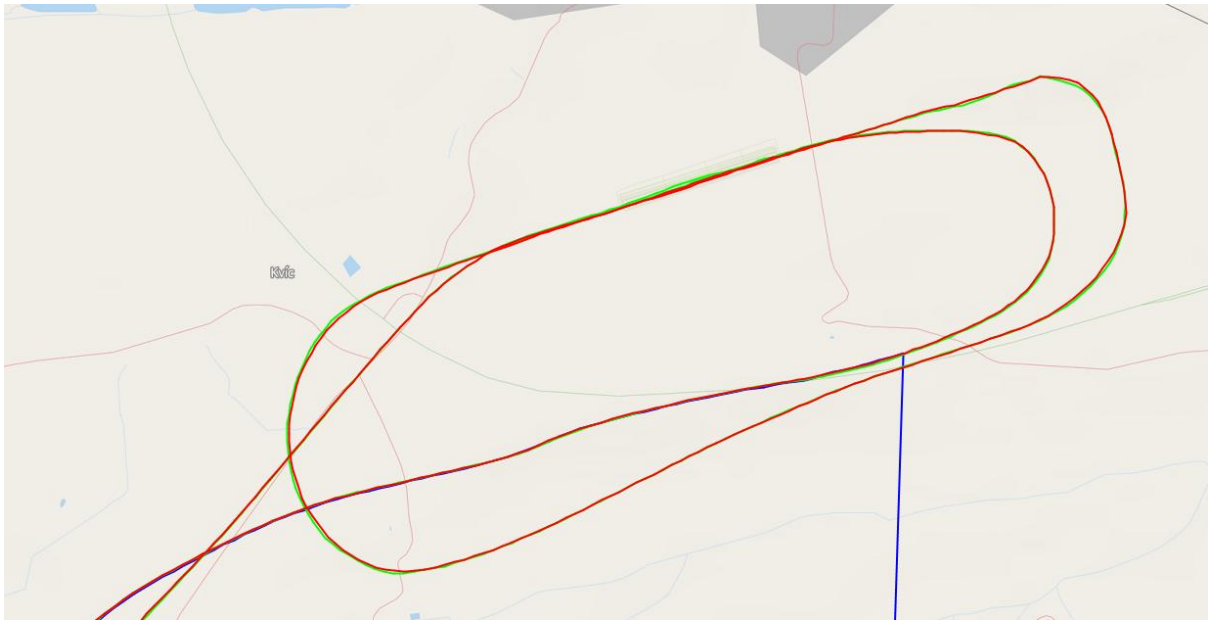
Obrázek 53 - srovnání záznamů během letu (OpenStreetMap, 2020)



Obrázek 54 - srovnání záznamů během letu (OpenStreetMap, 2020)

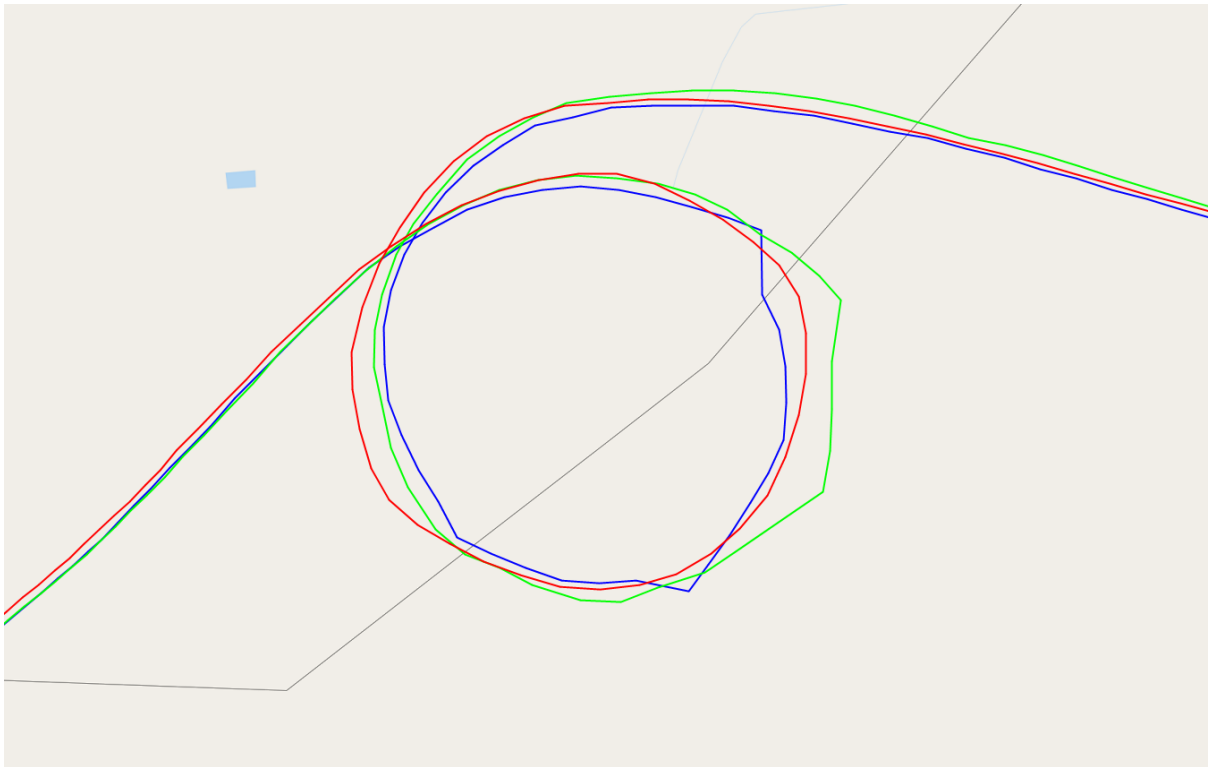
Obrázek 55 - srovnání záznamů během letu (OpenStreetMap, 2020)

I na letištním okruhu letiště Slaný jsou záznamy kvalitativně srovnatelné. Ve spodní části obrázku je zřetelné místo výpadku záznamu prototypu – rovná čára, jejíž začátek je poslední zaznamenaný fix před obnovením záznamu na letišti v Kladně.



Obrázek 56 - srovnání záznamů na letištním okruhu letiště Slaný (OpenStreetMap, 2020)

Během provádění ostřejší zatáčky (Obrázek 57) je patrná odlišnost v záznamech z jednotlivých loggerů. Kvalitativně nejlépe se jeví červený záznam z loggeru LAA, který je spojitý a kopíruje tvar pravidelné ustálené zatáčky. Záznam z prototypu jej až na drobné odchylky kopíruje. Záznam z loggeru AMOD (zelený) vykazuje největší odchylky. Průměr oblouku je cca 300 metrů.



Obrázek 57 - odchylky záznamů během ostřejší zatáčky (OpenStreetMap, 2020)

Mobilní telefon

Let byl zaznamenáván také na mobilní telefon (iPhone XS). Jeho záznam proto byl přidán pro srovnání. Přidáním tohoto záznamu se změnily barvy letěných tras. Červeně je logger LAA, světle modře prototyp, zeleně AMOD a fialově telefon (Obrázek 58).

Záznam z AMOD se jeví jako nejméně přesný kvůli relativně velkým odchylkám. Záznamy z LAA loggeru, z prototypu a z telefonu jsou si podobné. Zajímavé je, že v pravé horní části oblouku nejprve prototyp kopíruje trasu, zaznamenanou na telefon, a poté spíše kopíruje trasu, zaznamenanou LAA loggerem.

Ani srovnání záznamů s mobilním telefonem nepřineslo kýžené rozuzlení. Testování během tohoto manévru tedy bude muset být provedeno opakovaně.

Obrázek 58 - ostrá zatáčka - srovnání prototypu, AMOD, LAA loggeru a mobilního telefonu iPhone XS (modrá, červená, zelená, fialová) (OpenStreetMap, 2020)

Zhodnocení

Záznamy z prototypu i z loggeru LAA se na základě testování ze 17. dubna 2020 jeví srovnatelné či lepší s aktuálně používaným a certifikovaným loggerem AMOD. Prototyp se tedy jeví dostatečně přesný pro použití v leteckých soutěžích i jako nástupce řešení AMOD.

5.4 Product increment 4 – finalizace prototypu

Na poslední Product increment byla plánována optimalizace firmwaru a rezerva na případná zpoždění. Rezerva byla nakonec využita pro uskutečnění letových testů[16], které se, jak již bylo zmíněno výše, musely z důvodu vládních nařízení v reakci na Covid-19 o několik týdnů posunout.

Kromě provedení letových testů probíhala paralelně práce na optimalizaci firmwaru loggeru Ing. Šibravou, úpravy byly vzápětí testovány během jednotlivých letů. Úpravy byly během letů úspěšně otestovány.

Rovněž byla dovyvinuta funkcionalita pro vizualizaci trasy prostřednictvím jednoduché webové aplikace, získávající uložená polohová data z databáze a zobrazující křivku těchto pozic na mapě.

5.4.1 Implementace barometru

V rámci posledního PI byla rovněž realizována implementace barometru, z konstrukčních důvodů v předchozích fázích odložená.

Pro ověření funkčnosti bylo nutno provést dvě zásadní srovnání. Prvním bylo srovnání kontinuality měření tlakové a GPS výšky a ověřit, že záznam je kontinuální a plynulý. Toto srovnání bylo na svou podstatu provedeno během letů. Ve druhém případě bylo nutné ověřit tlakovou výšku s výškou skutečnou. Tento test bylo nutno provést na místě se známou nadmořskou výškou a tlakovou výšku opravovat na aktuální QNH, jak je popsáno v následující kapitole.

5.4.2 Způsob kalibrace barometru

Jak již bylo zmíněno, barometr je určený k měření aktuálního tlaku. Do letového záznamu je nutno uvádět aktuální výšku, kterou je nutno z tlaku vypočítat.

Mezinárodní standardní atmosféra ISA předpokládá, že na úrovni hladiny moře je teplota +15 stupňů Celsia a tlak 1013.25 hPa, který do 500 stop nad mořem klesá s výškou tempem 1 hPA za každých 30 stop výšky (Obrázek 59 - Tabulka závislosti teploty, tlaku a výšky dle standardní atmosféry ISA). Nejprve tedy bylo nutno verifikovat, zda měření tlaku odpovídá skutečným hodnotám. Toto bylo překvapivě jednoduché. Větší řízená letiště, jako je například Praha Ruzyně, poskytují v rámci pravidelných letištních zpráv o počasí (METAR) také informaci o tlaku, přepočítaného na hladinu moře právě dle ISA. Piloti letadel pak seřizují svůj barometrický výškoměr právě dle udaného QNH (Altimeter Pressure Settings, 2020). Tímto způsobem je zajištěno, že na daném letišti bude barometrický výškoměr letadla vždy ukazovat přesnou nadmořskou výšku (v místě tzv. vztažného bodu letiště). Na základě znalosti

[16] Z důvodu zachování konzistence jsou letové testy popsány, spolu s ostatními provedenými testy, v předchozí kapitole.

aktuálního QNH je možné porovnat výšku, vypočítanou na základě měření barometrického senzoru, s výškou skutečnou.

Table 3 International Standard Atmosphere [2]

ALTITUDE (Feet)	TEMP. (°C)	PRESSURE			PRESSURE RATIO $\delta = P/Po$	DENSITY $\sigma = \rho/\rho o$	Speed of sound (kt)	ALTITUDE (meters)
		hPa	PSI	In.Hg				
40 000	- 56.5	188	2.72	5.54	0.1851	0.2462	573	12 192
39 000	- 56.5	197	2.58	5.81	0.1942	0.2583	573	11 887
38 000	- 56.5	206	2.99	6.10	0.2038	0.2710	573	11 582
37 000	- 56.5	217	3.14	6.40	0.2138	0.2844	573	11 278
36 000	- 56.3	227	3.30	6.71	0.2243	0.2981	573	10 973
35 000	- 54.3	238	3.46	7.04	0.2353	0.3099	576	10 668
34 000	- 52.4	250	3.63	7.38	0.2467	0.3220	579	10 363
33 000	- 50.4	262	3.80	7.74	0.2586	0.3345	581	10 058
32 000	- 48.4	274	3.98	8.11	0.2709	0.3473	584	9 754
31 000	- 46.4	287	4.17	8.49	0.2837	0.3605	586	9 449
30 000	- 44.4	301	4.36	8.89	0.2970	0.3741	589	9 144
29 000	- 42.5	315	4.57	9.30	0.3107	0.3881	591	8 839
28 000	- 40.5	329	4.78	9.73	0.3250	0.4025	594	8 534
27 000	- 38.5	344	4.99	10.17	0.3398	0.4173	597	8 230
26 000	- 36.5	360	5.22	10.63	0.3552	0.4325	599	7 925
25 000	- 34.5	376	5.45	11.10	0.3711	0.4481	602	7 620
24 000	- 32.5	393	5.70	11.60	0.3876	0.4642	604	7 315
23 000	- 30.6	410	5.95	12.11	0.4046	0.4806	607	7 010
22 000	- 28.6	428	6.21	12.64	0.4223	0.4976	609	6 706
21 000	- 26.6	446	6.47	13.18	0.4406	0.5150	611	6 401
20 000	- 24.6	466	6.75	13.75	0.4595	0.5328	614	6 096
19 000	- 22.6	485	7.04	14.34	0.4791	0.5511	616	5 791
18 000	- 20.7	506	7.34	14.94	0.4994	0.5699	619	5 406
17 000	- 18.7	527	7.65	15.57	0.5203	0.5892	621	5 182
16 000	- 16.7	549	7.97	16.22	0.5420	0.6090	624	4 877
15 000	- 14.7	572	8.29	16.89	0.5643	0.6292	626	4 572
14 000	- 12.7	595	8.63	17.58	0.5875	0.6500	628	4 267
13 000	- 10.8	619	8.99	18.29	0.6113	0.6713	631	3 962
12 000	- 8.8	644	9.35	19.03	0.6360	0.6932	633	3 658
11 000	- 6.8	670	9.72	19.79	0.6614	0.7156	636	3 353
10 000	- 4.8	697	10.10	20.58	0.6877	0.7385	638	3 048
9 000	- 2.8	724	10.51	21.39	0.7148	0.7620	640	2 743
8 000	- 0.8	753	10.92	22.22	0.7428	0.7860	643	2 438
7 000	+ 1.1	782	11.34	23.09	0.7716	0.8106	645	2 134
6 000	+ 3.1	812	11.78	23.98	0.8014	0.8359	647	1 829
5 000	+ 5.1	843	12.23	24.90	0.8320	0.8617	650	1 524
4 000	+ 7.1	875	12.69	25.84	0.8637	0.8881	652	1 219
3 000	+ 9.1	908	13.17	26.82	0.8962	0.9151	654	914
2 000	+ 11.0	942	13.67	27.82	0.9298	0.9428	656	610
1 000	+ 13.0	977	14.17	28.86	0.9644	0.9711	659	305
0	+ 15.0	1013	14.70	29.92	1.0000	1.0000	661	0
- 1 000	+ 17.0	1050	15.23	31.02	1.0366	1.0295	664	- 305

Obrázek 59 - Tabulka závislosti teploty, tlaku a výšky dle standardní atmosféry ISA

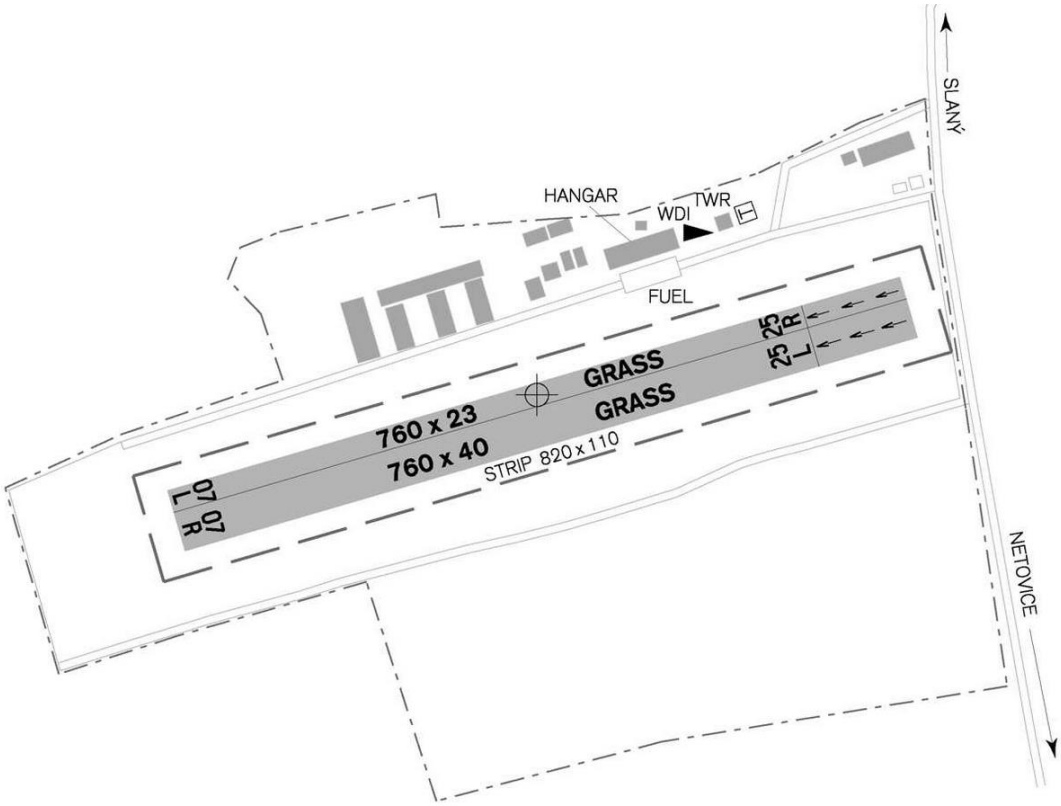
5.4.3 Srovnání známé výšky a naměřené tlakové a GPS výšky

Srovnání měření pomocí GPS a barometru bylo provedeno ráno dne 27. 4. 2019 po osmé hodině lokálního času. V tu dobu bylo QNH na hodnotě 1012 hPa, tedy o 1 hPa níže než je standard ISA. Tlaková výška by tedy měla být o zhruba 10 metrů nižší než skutečná výška. Abych potvrdil tuto teorii a zároveň vyloučil vliv nestandardního průběhu teploty s výškou na velikost tlaku, záznamy jsem srovnával na letišti Slaný (Obrázek 60), které se nachází v těsné blízkosti letiště Ruzyně, vydávajícího pravidelné zprávy o tlaku, a v podobné výšce - Slaný 329 metrů nad mořem, Ruzyně 376 metrů (Sainer, 2020). Letištní zprávy o QNH uvádí pouze celočíselnou zaokrouhlenou hodnotu. Na hodnotu 1012 hPa tedy mohlo být zaokrouhleno číslo v intervalu <1011.5 hPa, 1012.499). To dává možný rozptyl tlakové výšky od skutečné v rozmezí 6.75 až 18 metrů. Za dobu 08:08:00 až 08:09:00 lokálního času byly posbírány hodnoty s průměrnou GPS výškou 326.1 metrů a průměrnou tlakovou výškou 322.3 metrů.

Skutečná výška letiště, respektive jeho vztažného bodu nacházejícího se uprostřed dráhy 07L/25R, je 329 metrů, jak ilustruje plánek níže. Měření bylo prováděno u věže (TWR). Tato se nachází nepatrně níže než vztažný bod. Výšku, naměřená pomocí GPS, tedy lze považovat za správnou. Výška, naměřená barometrem, je po přepočítání tlaku dle udaného QNH též korektní.

Měření by dále šlo zpřesnit umístěním loggeru přmo do vztažného bodu, což by vyžadovalo relativně komplikovanou koordinaci a uzavření přistávacích drah. Další možná odchylka může být způsobena rozdílným tlakem v lokalitě letiště Slaný a letiště Ruzyně. S ohledem na výše uvedenou přesnost měření QNH na 1 hPa, znamenající nepřesnost 30 stop (9 metrů) jen zaokrouhlením, považuji provedené měření s třímetrovou odchylkou GPS výšky za dostatečně přesné, zvlášť s ohledem na fakt, že měření bylo prováděno u věže, která se nachází níže vztažného bodu letiště.

V optimálním případě by se výška mohla měřit pomocí certifikovaného kalibrovaného výškoměru, a tato by se posléze srovnala s naměřenou GPS výškou. Měření barometru by bylo záhodno provádět v kalibrované hypobarické komoře.



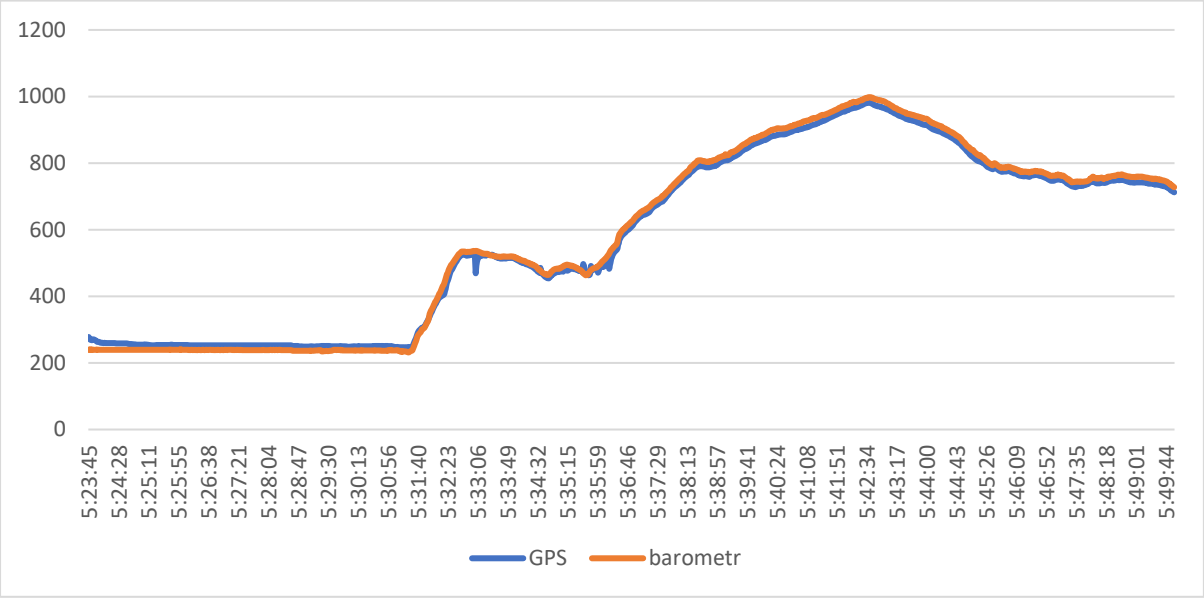
Obrázek 60 - plánek letiště Slaný (Řízení letového provozu České republiky, 2017)

5.4.4 Srovnání GPS a tlakové výšky

V dalším testu bylo nutno ověřit, zda zaznamenaná GPS výška a barometrická výška korelují. Zde již není nutno provádět korekci dle QNH, předpokladem je konstantní QNH v krátkém čase a tedy konstantní rozdíl naměřené GPS a barometrické výšky za identického průběhu křivky výšek v čase.

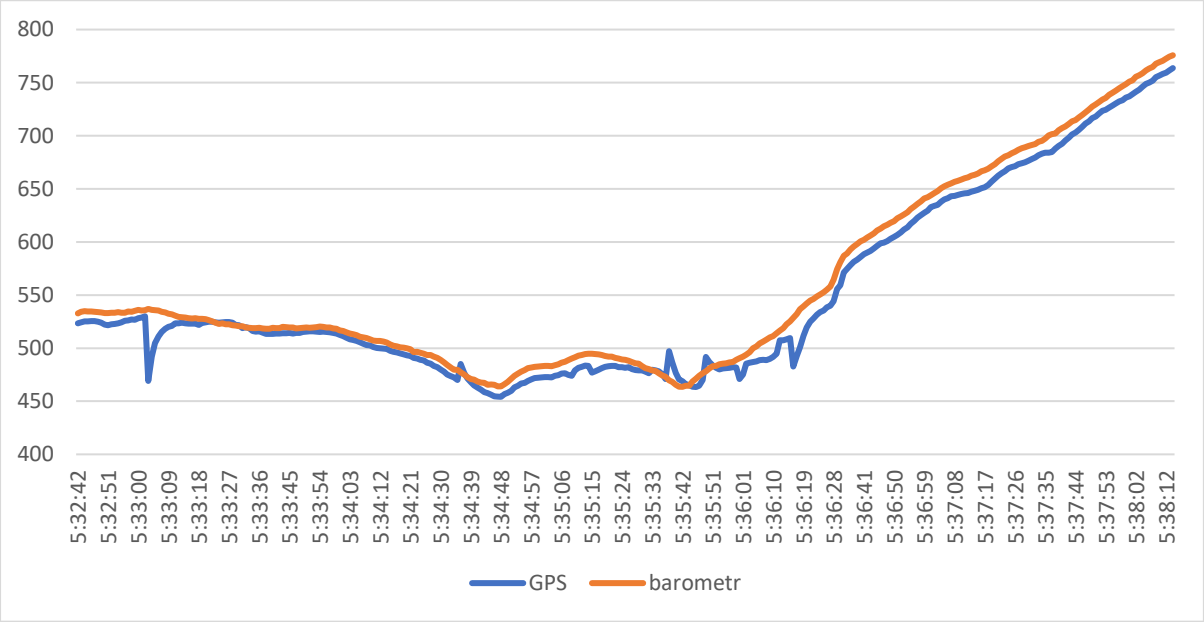
Záznam 1

Záznam z 5:23:45-5:49:44 (Obrázek 61) ukazuje pohyb po zemi, stoupání, let v hladině i klesání. Obě výšky mají stejný průběh a naměřené hodnoty jsou korektní a odpovídající danému letu.



Obrázek 61 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky

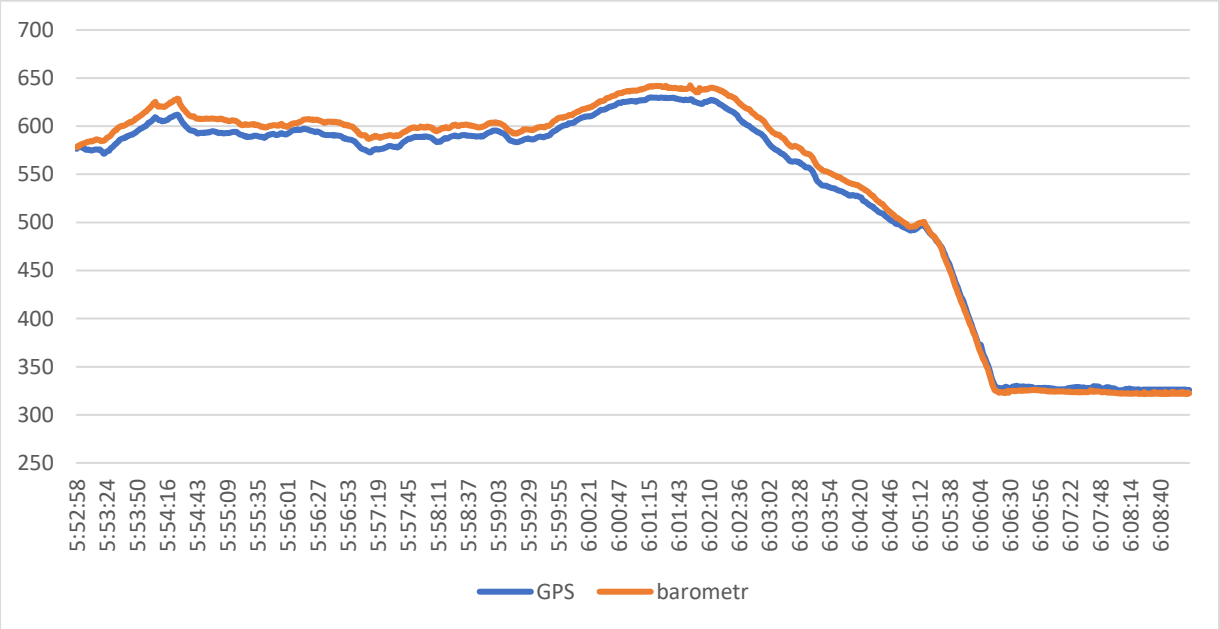
Při pozorném zkoumání si v čase cca 5:32 až 5:38 (Obrázek 62) všimneme odchylek naměřené GPS výšky, které neodpovídají průběhu letu. Tlaková výška je zde naměřena přesněji a odpovídá realitě. Odchylky v naměřené GPS výšce si lze vysvětlit například zhoršeným příjmem GPS signálu (jednotka zpracovávala signál z méně satelitů, což se zejména na přesnosti měření výšky odráží).



Obrázek 62 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky

Záznam 2

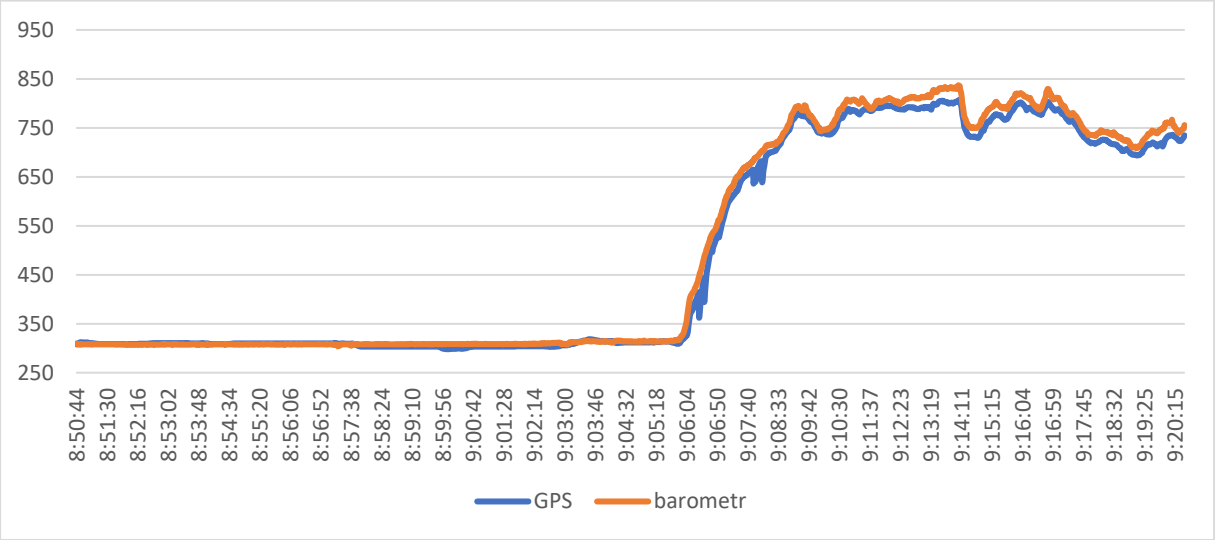
I druhý záznam (Obrázek 63) ukazuje úzkou korelaci naměřené výšky dle GPS a barometru, odpovídající provedenému letu. Překrytí obou křivek v pravé části grafu, respektive jejich rozdíl v levé části, si lze vysvětlit rozdílem skutečného statického tlaku vzduchu v dané výšce a statického tlaku v kabině letadla, kde byl logger umístěn a kde jsou loggery umisťovány standardně. Přesnosti by šlo dosáhnout připojením vedení statického tlaku k barometrickému senzoru. Tato však není v požadavcích pro letecké navigační soutěže a jelikož výška nebývá v těchto soutěžích kritický faktor a pravidla tolerují relativně velké chyby měření výšky, je, alespoň prozatím, toto zpřesňování nadbytečné.



Obrázek 63 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky

Záznam 3

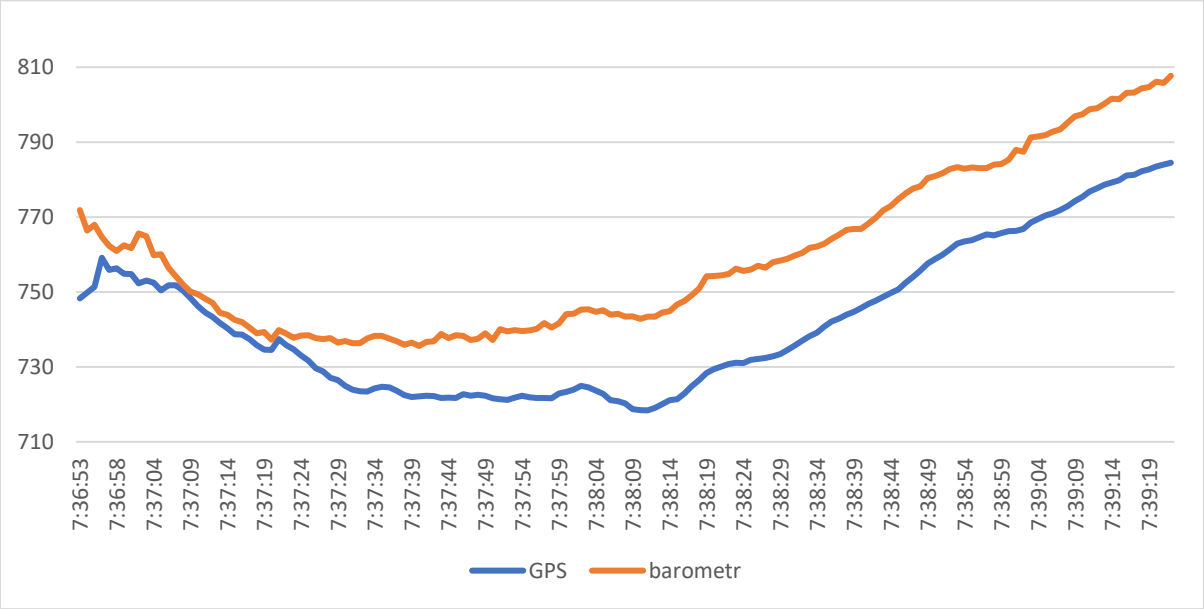
Rovněž v tomto záznamu (Obrázek 64) je patrná korelace GPS a tlakové výšky. Kolem času 9:06-9:10 si můžeme opět povšimnou odchylek naměřené GPS výšky, neodpovídající skutečnosti. Tlaková výška má přirozenější průběh.



Obrázek 64 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky

Záznam 4

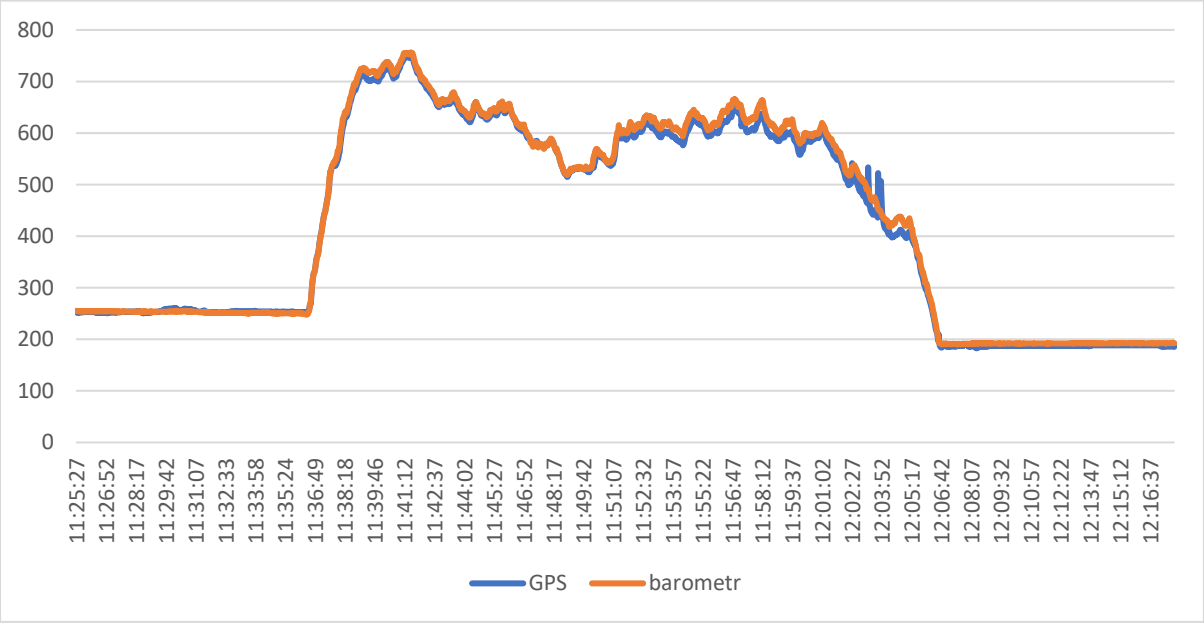
V tomto záznamu (Obrázek 65) si můžeme detailněji prohlédnout rozdíl obou křivek s ohledem na krátký časový interval záznamu a menší rozmezí zaznamenaných výšek. Rozdíl obou křivek odpovídá rozdílu daném nastavení QNH.



Obrázek 65 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky

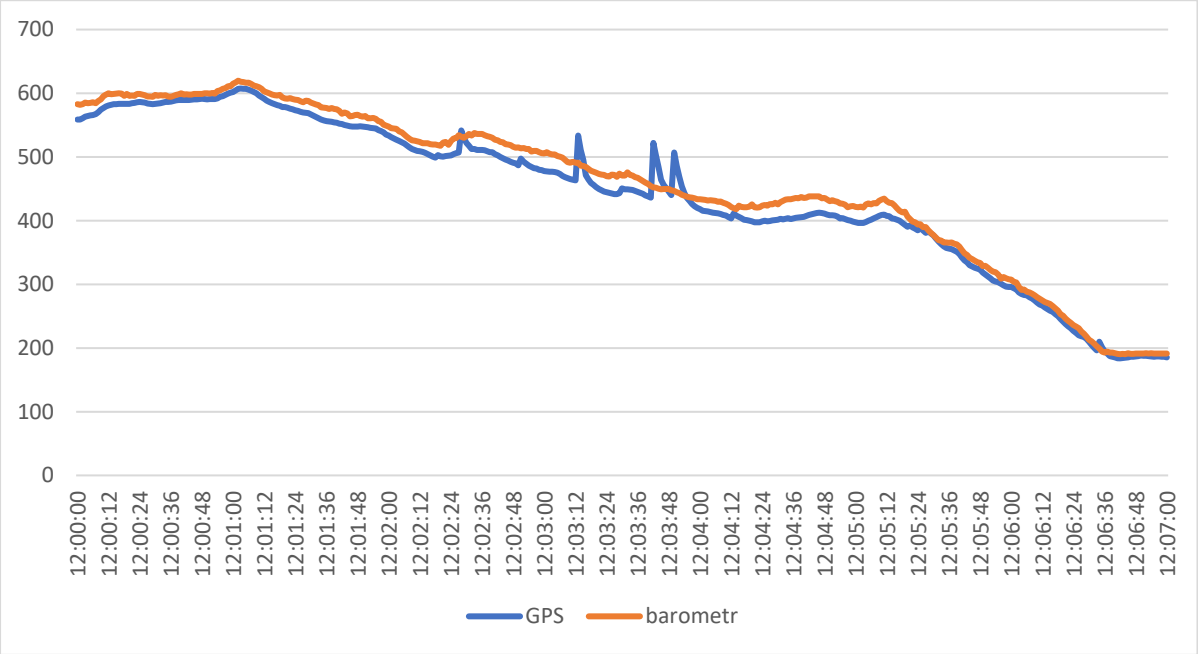
Záznam 5

V posledním srovnávacím záznamu (Obrázek 66), trvajícím bezmála hodinu, si opět můžeme povšimnout úzké korelace obou výšek. Záznam se tedy jeví celkově korektní. Vyobrazen je zde let z Ostravy Mošnova do Kroměříže. Vzhledem k velmi turbulentnímu počasí se výška mění v krátkém čase, toto odpovídá skutečnosti.



Obrázek 66 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky

V čase 12:00:00 – 12:07:00 (Obrázek 67) si můžeme opět povšimnout odchylek naměřené GPS výšky. Tyto jsou ve velikosti desítek metrů za jednu sekundu, což neodpovídá realitě.



Obrázek 67 - srovnání GPS výšky a tlakové výšky

Shrnutí

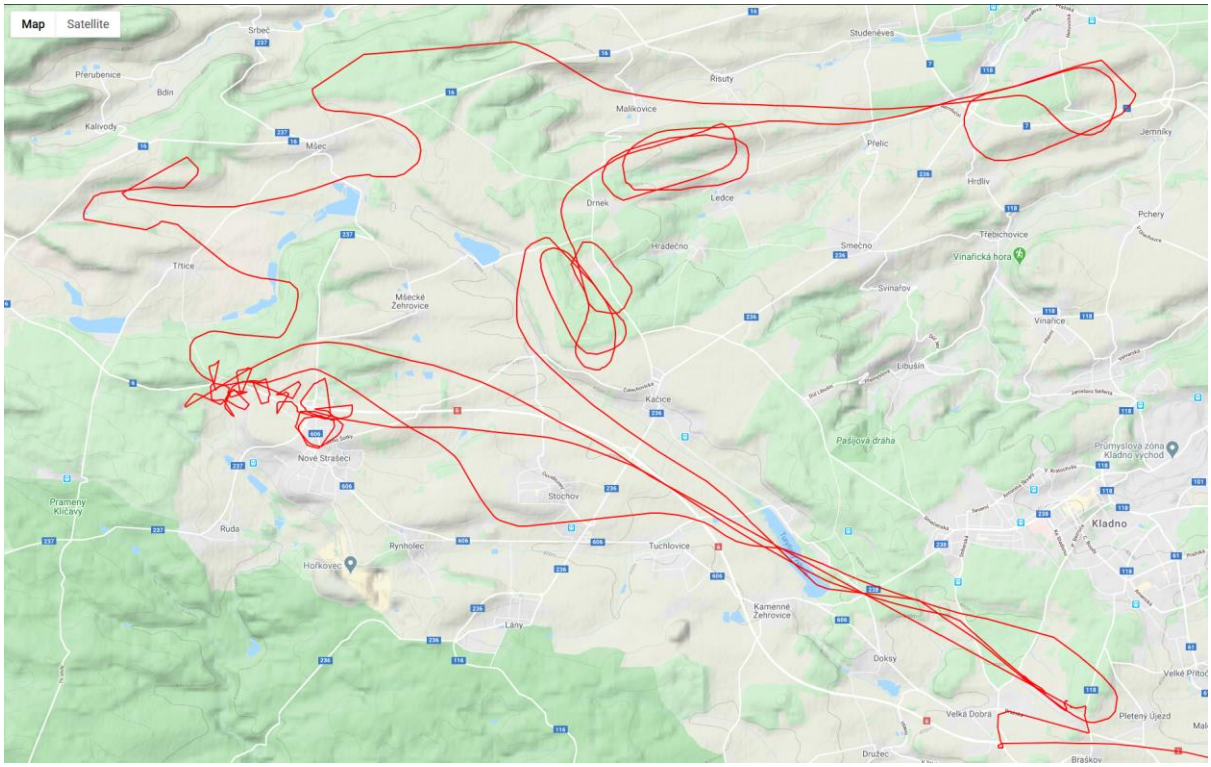
Testování barometrického senzoru dopadlo úspěšně. Senzor měří tlak, potažmo tlakovou výšku přesně. Záznam během letu je kontinuální a plynulý, odpovídající realitě. Odchylky, neodpovídající skutečnosti, vykázalo měření výšky podle GPS, což bylo předpokládatelné chování a jedná se o běžnou vlastnost GPS. Právě z tohoto důvodu je nejen v letectví využíváno měření výšky podle tlaku.

Všechny komponenty prototypu loggeru tedy úspěšně fungují a prototyp je možno prohlásit za dokončený.

5.4.5 Vizualizace live tracking dat

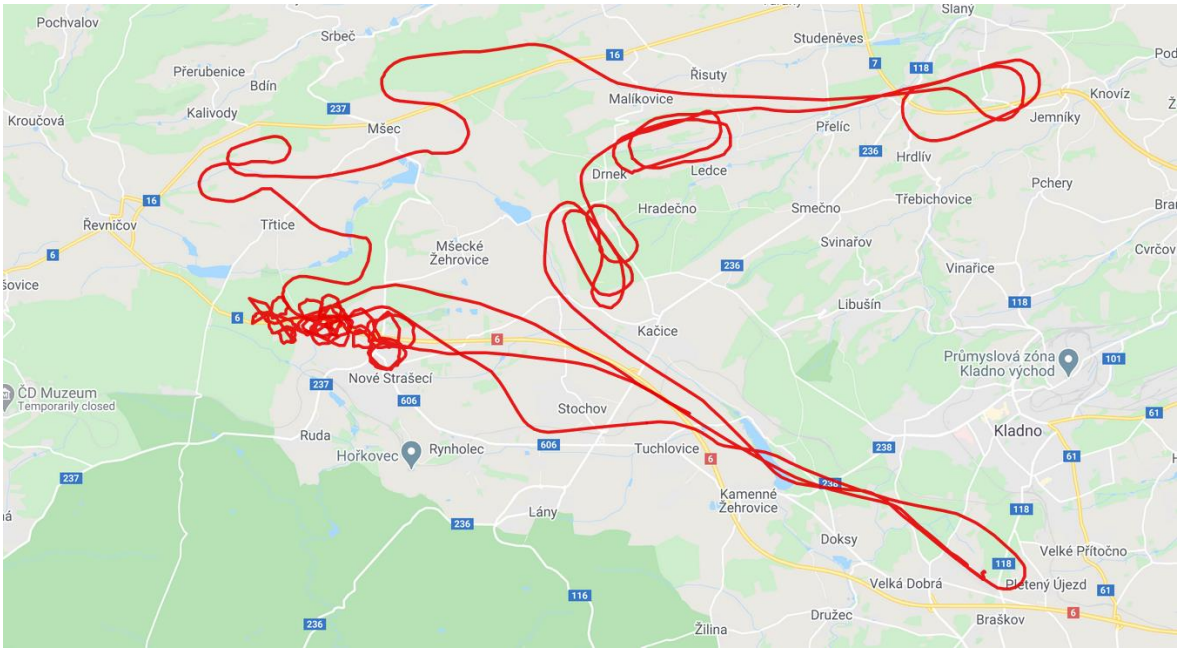
Za účelem demonstrovat realizovatelnost live trackingu byla v rámci posledního PI vyvinuta rovněž funkcionalita, umožňující zobrazovat polohová data v reálném čase na mapě. Pro účely demonstrace ukazuje mapa polohu a denní záznam pohybu vždy jednoho loggeru, střed mapy se nachází vždy v místě posledního záznamu.

První testování funkcionality během letu bylo úspěšné a zaznamenaná trasa je z mapy jasně viditelná (Obrázek 68).



Obrázek 68 - záznam ze serveru

Ve srovnání se záznamem, uloženým v interním úložišti loggeru (Obrázek 69), je však na první pohled vidět rozdíl v menší počtu GPS polohových záznamů, uložených na serveru. Tento se projevuje ostrými hranami záznamu, které se v záznamu získaném z interního úložiště nevyskytují.



Obrázek 69 - záznam z loggeru

V rámci optimalizace a oprav softwaru byla zjištěna a opravena chyba, která způsobovala, že se některé záznamy na server neodesílaly. Záznam po opravě je již daleko plynulejší a přesnější (Obrázek 70).

Obrázek 70 - záznam je po opravě plynulejší

5.4.6 Srovnání záznamů na serveru a v interním úložišti

Za účelem srovnání kvality záznamů, uložených v interním paměťovém úložišti a na serveru, byly analyzovány záznamy poloh za stejné časové období.

Srovnání záznamu ze dne 16. 4. 2020 odhalilo, že zatímco záznam z interního paměťového úložiště obsahuje za období 05:00:00 UTC – 07:00:00 UTC 6267 záznamů polohy, server jich eviduje pouze 4067. Tento počet je dostačující pro potřeby live trackingu, nikoli však pro potřeby přesného skórování. Na základě tohoto zjištění byl Ing. Šibravovi předán požadavek na opravu, kterou provedl.

Test ze dne 26. 4. 2020 za dobu 13:00:00 UTC – 15:30:00 UTC ukazuje, že za tento den je pro logger s IMEI 86632303509812 dostupných 5990 zaznamenanách pozic na serveru a 5990 pozic na SD kartě (rozdělených do dvou záznamů). Jednalo se o statický test provedený na konkrétním místě.

Logger byl umístěný na okně se zhoršeným výhledem na oblohu a tedy pravděpodobně zhoršeným příjmem GPS signálu. Přestože se jednalo o statický test, rozptyl zaznamenaných pozic je relativně malý (Obrázek 71).

Data na serveru tedy s verzí firmwaru ke dni 26. 4. odpovídají datům na SD kartě.

Obrázek 71 - odchylka pozic při stacionárním testu

ZÁVĚR

Sekce 4
Zavedení

6 Fáze Zavedení dle MMSP-AV

Vzhledem k faktu, že se jednalo o vývoj prototypu, nebyla fáze Zavedení prakticky obsažena. Fáze Zavedení se bude v případě prototypu skládat z dalšího testování řešení, hlavně během leteckých navigačních soutěží, pořádaných v České republice, které však budou začínat až po datu odevzdání diplomové práce. Záznamy z prototypu budou srovnávány s ostatními používanými loggery a budou pravděpodobně zkušebně použity i při vyhodnocování soutěží. Poznatky, které vzniknou během provozu při navigačních soutěžích, budou dále zapracovávány. Výhledově bude vyvinuta i komponenta, umožňující záznamy z loggerů stahovat do příslušného formátu přímo ze serveru.

Dále bude vyvinuta zkušební verze webové aplikace, umožňující soutěžní lety v reálném čase skórovat na základě definovaných kritérií a toto skóre společně s pozicemi jednotlivých letadel zobrazovat a průběžně aktualizovat.

V případě dalšího vývoje do podoby produkční verze zařízení je předpokládán plynulý přechod z fáze Zavedení do vývoje výsledného produktu.

7 Závěr a další rozvoj

Byl úspěšně vyvinut prototyp GNSS záznamového zařízení, schopného zaznamenávat let a data spolehlivě předávat na vzdálený server. Výsledné zařízení splňuje požadavky pro soutěžní navigační létání a demonstruje realizovatelnost nového soutěžního loggeru. V rámci diplomové práce též byla vyvinuta komponenta, zobrazující trasu pohybu jednotlivých loggerů na mapě.

V případě dalšího rozvoje loggeru až do fáze produkčního řešení by bylo nutno vyřešit množství dalších výzev. Především by se jednalo o financování dalšího vývoje, jelikož by bylo nutno vyřešit ještě nemalý počet technických výzev, aby byl projekt dotažen do produkční verze. S ohledem na nedostatek certifikovaných loggerů pro soutěžní létání a absenci jejich výroby se do budoucna předpokládá silná potřeba nového loggeru, což by mohlo znamenat ochotu organizacích, zajišťujících soutěžních létání, se na vývoji nového řešení finančně podílet.

Z technického hlediska by se jednalo zejména o eliminaci závislosti řešeních na konkrétních deskách s komponenty a návrh vlastní integrované desky, osazené přímo jednotlivými komponentami, uzpůsobení všem požadavkům a pravidlům soutěžního létání a přípravu na certifikaci loggeru. Dále se předpokládá rozvoj serverové části dle dalších požadavků zainteresovaných stran.

Výroba vlastní desky zabere další nemalé množství prostředků nutných na vývoj a testování, v dlouhodobém hledisku má však mnoho výhod. V první řadě se jedná o hledisko snížení závislosti na dodavatelích vývojových desek, tím pádem i snížení rizika jejich případné nefunkčnosti a nekompatibility. Jednotlivé komponenty samotné bývají výrazně levnější než samostatně kupované vývojové desky s moduly, návrh vlastní desky tedy sníží i výrobní náklady na daný logger. Integrovaná deska má i výhodu z hlediska odolnosti konstrukce – minimálně spoje budou totiž daleko odolnější než propojování několika různých desek drátky.

V neposlední řadě znamená vlastní deska výhodu z hlediska konstrukčního. Může totiž reflektovat i konstrukční potřeby pro návrh krabičky zařízení – do desky mohou například být umístěny přímo zdířky pro upevnění ke krabičce či je možné přesunout například konektor antény na místo, kde se to konstrukčně hodí a kde bude výsledný spoj nejméně namáhaný.

Samozřejmě bude nutno zapracovat na všech komponentech softwaru, a to jak vnitřního firmwaru loggeru, tak serverové části. V rámci firmwaru bude nutno vyvinout podporu pro asymetrické šifrování a počítání bezpečnostních součtů ze záznamu v rámci zajištění autenticity záznamu. V rámci serverové části se předpokládají nutné úpravy za účelem zajištění vizualizace dat a oddělení jednotlivých loggerů či skupin, jelikož není v zájmu pořadatele soutěže zobrazovat všechny loggery, aktuálně provozované ve světě, ale jen ty, které jsoiu používány v rámci daného závodu.

V ideálním případě by do online rozhraní mohl být implementovaný i systém průběžného skórování soutěžních letů na základě aktuálního záznamu a jeho vizualizace, což by přispělo k dalšímu zpřístupnění navigačního závodu divákům.

Podobně jako u loggeru Flymaster se zdá být dobrým počinem implementovat funkcionalitu SOS tlačítka, které by mohlo být používáno v případě nouze, což v případě letectví může působit jako další bezpečnostní prvek. Jeho certifikace a široké uvedení do provozu by bylo v případě letectví extrémně náročné a certifikovat jej jako oficiální prostředek pouze v rámci vývoje loggerů je neúměrně složitý úkol. Nicméně v kombinaci se stávajícími tísňovými frekvencemi a postupy a nouzovými lokátory ELT, vysílající GPS pozici letounu na určených frekvencích v případě havárie, by se jednalo o další bezpečnostní prvek.

Dále bude muset být vyvinut obslužný PC software pro stahování záznamů z loggeru a pro případné změny konfigurace loggeru. Pro tento bude nutno implementovat podporu i v rámci firmwaru loggeru samotného, jelikož komunikace bude pravděpodobně probíhat přes příkazy zasílané sériovým portem. Bude rovněž nutno zajistit, aby přes připojení k počítači nebylo možno nikterak pozměnit software loggeru, což je jeden z kriticky důležitých požadavků na bezpečnost záznamu.

Logger bude rovněž muset být důkladně otestován a připraven na případnou certifikaci pro soutěžní létání ze strany FAI. V rámci přípravy na certifikaci bude nutno kontaktovat kompetentní osoby v komisích CIMA a GAC a zapracovat jejich případnou zpětnou vazbu a náměty, dále bude nutno analyzovat certifikační kritéria a postupy pro soutěžní loggery a v optimálním případě i logger otestovat dle konkrétních certifikačních postupů (byť například testování barometrického senzoru v hypobarické komoře je obtížnější úloha, prakticky nerealizovatelná bez dostupnosti speciálního přístroje).

8 Ukázky kódu

Kromě již některých kódů, zmíněných výše v práci, jsou v této části jsou uvedeny i některé další kódy, řešící problémy, které se během vývoje vyskytly. Ukázky kódu z firmwaru loggeru jsou v C++, serverové komponenty se skládají z JavaScriptu a nástroj pro konverzi záznamů z loggeru do výsledného formátu je psán v Pythonu.

Při vývoji řešení byly využity tyto jazyky:

- C++
- Python
- JavaScript
- NodeJS
- SQL

8.1 Připojení k internetu

Konfigurace připojení k internetu vyžadovala v případě prototypu nastavení přístupového bodu pro daného operátora, zde T-Mobile resp. virtuální operátor Kaktus Mobil[17]. Tento virtuální operátor účtuje data po odeslaných megabajtech a nikoli formou časově omezených balíčků, což se v případě loggeru, který odesílá jen malé množství dat, vyplatilo. Alternativně by šlo využít různých IoT balíčků, nabízených např. operátorem Vodafone[18], při ceně 1 Kč za 1 MB, platné u Kaktus mobil v době psaní diplomové práce, a objemu odesílaných dat v řádu maximálně jednotek megabejtů denně, nedávalo smysl řešit alternativu.

Bylo nutno nastavit přístupový bod internet.t-mobile.cz, což bylo provedeno pomocí AT příkazu, odeslaného na SIM kartu. Toto nastavení probíhá při každé inicializaci loggeru. Nyní je přístupový bod fixní, v rámci budoucího vývoje bude nezbytné umožnit tento přístupový bod modifikovat bez nutnosti změny firmwaru jako takového. Toho bude snadné dosáhnout například uložením do paměti EEPROM[19].

Ukázku zdrojového kódu používaného k nastavení připojení k internetu uvádí Obrázek 72.

[17] https://www.mujkaktus.cz/homepage

[18] https://www.vodafone.cz/firmy-a-korporace/internet-veci/

[19] https://www.arduino.cc/en/Reference/EEPROM

```
/**
Perform initialization, so the SIM module can communicate over MQTT.
**/
void configureConnection()
{

  myserial.println("AT+CIPRXGET=2,1");//clear the incoming packet buffer
  safeFlush();
  sendExpectReply("AT+CGDCONT=1,\"IP\",\"internet.t-mobile.cz\"","OK",100000UL);
  sendExpectReply("AT+CIPMODE=0","OK",100000UL);//non-transparent mode
  sendExpectReply("AT+NETOPEN","OK",100000UL);
  sendExpectReply("AT+CIPRXGET=1","OK",100000UL);//buffer access
}
```

Obrázek 72 - nastavení přístupového bodu pro internet

8.2 Získání identifikátoru zařízení IMEI

Jednoznačný idenfikátor zařízení dokáže zprostředkovat číslo IMEI, obsažené v SIM modulu, které je unikátní pro každé zařízení. Není tak nutno každému loggeru implementovat unikátní číslo do jeho firmwaru. Metoda pro načtení IMEI používá AT příkazy, odesílané na SIM modul (Obrázek 73).

```
uint8_t loadIMEI()
{
    unsigned long startMillis = millis();
    while (millis() - startMillis < 30000)
    {
        myserial.println("AT+SIMEI?");
        readSerialUntil(NULL, 20, ' ');
        char temp[20] = { 0 };
        readSerialUntil(temp, 20, '\r');
        if (strlen(temp) == 15)
        {
            myserial.flush();//the \n character
            strlcpy(imei, temp, 15);
            de_p(imei);
            return 0;
        }
        else
        {
            dptln("FAILED TO LOAD IMEI!!");
            delay(500);
        }
    }
    return 1;
}
```

Obrázek 73 - získání IMEI

8.3 Metody pro posílání záznamů na server

Obrázek 74 ilustruje metody používané k odesílání dat na vzdálený server. Metoda sendLog obsahuje i práci s počítadlem neodeslaných, resp. nedoručených zpráv.

```
/**
Assume the log is the last one, assigning the index to it accordingly, sending it.
**/
int sendLog(struct logEntry _theLog)
{
    de_p(logsCount);
    return sendLog(_theLog, logsCount-1,false);
}

int sendLog(struct logEntry _theLog, uint32_t logIndex, bool resending=false)
{
            Serial.print(">>");
            Serial.println(logIndex);
    char temp[100];
    getLogText(_theLog, temp, 100);
    if (!resending)
    {
        undeliveredLogsCount++;
    }
    char temp2[30];
    snprintf(temp2, 30, "logger/%s", imei);
    return mqttPublish(temp2, temp, strlen(temp), 1, resending, false, logIndex);
}
```

Obrázek 74 - metody odesílání záznamů na server

8.4 Struktura ukládání dat do úložiště

Data jsou do interního úložiště ukládána v binární podobě, definované následující strukturou (Obrázek 75). S ohledem na způsob zpracování desetinných hodnot procesorem AtMega 2560[20] [21] jsou desetinná čísla ukládána v oddělené formě – celá a desetinná část separátně. Jelikož je zajištěno, že desetinná část má vždy stálý počet číslic, je možno čísla korektně zpracovat i v případě, že první číslice desetinné části je nula.

```
struct logEntry {
  uint16_t lat_d;//lattitude degrees
  uint16_t lat_m;//lattitude minutes
  uint32_t lat_md;//lattitude minutes decimals
  char ns;//North/South
  uint16_t lon_d;//longitude degrees
  uint16_t lon_m;//longitude minutes
  uint32_t lon_md;//longitude minute decimals
  char ew;//East/West
  uint8_t day;//the current day of the date
  uint8_t month;//the current month
  uint8_t year;//years from 2000, 0=2000
  uint8_t hour;
  uint8_t min;
  uint8_t sec;
  uint8_t sec_d;//seconds decimal
  uint16_t alt;//altitude
  uint8_t alt_d;//altitude decimal
  uint8_t fixValid;
  uint8_t delivered;
};
```

Obrázek 75 - struktura ukládaných dat

[20] https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
[21] https://stackoverflow.com/questions/41826143/arduino-atmega2560-double-inaccuracy

8.5 Doposlání nedoručených záznamů

Záznam, u kterého server nepotvrdí jeho úspěšné doručení, je uložen v úložišti a při nejbližší příležitosti odeslán znova. Děje se tak v pořadí od nejnovějšího k nejstaršímu, jelikož v případě jakéhokoli výpadku je prioritní především aktuální pozice letounu, ať už z hlediska informaci o aktuální pozici v rámci soutěže, tak z hlediska bezpečnostního. Logiku znovuodesílání ilustruje Obrázek 76.

```
int16_t handleResending(uint32_t _deadLine)
{
    if (logsCount <2)
    {
        return 0;
    }
    unsigned long startMillis = millis();
    static uint32_t logIndex;

    int redeliversCount = 0;
    while (undeliveredLogsCount > 0 && millis() < _deadLine)
    {
        struct logEntry theLog;
        loadLog(theLog, logIndex);
        if (!theLog.delivered)
        {
            redeliversCount++;
            Serial.println("Redelivering: ");
            printLog(theLog);
            sendLog(theLog, logIndex, true);
        }

        if (logIndex == 0)
        {
            logIndex = logsCount - 2;//do not try to resend the last log added
            de_p(redeliversCount);
            return 0;
        }
        logIndex--;
    }
        de_p(redeliversCount);
    return 0;
}
```

Obrázek 76 - doposílání nedoručených záznamů

8.6 Prováděné jednotkové testy

Za účelem otestování správnosti fungování všech jednotlivých komponent jak hardwaru, tak softwaru, byly napsány jednotkové testy. Tyto pokrývají následující oblasti (Obrázek 77):

- Posílání dat přes MQTT na server
- Zaznamenávání pozice
- Odesílání pozice na server
- Opětovné odesílání nedoručených pozic na server

```
// unitTests.h

#ifndef _UNITTESTS_h
#define _UNITTESTS_h

#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100
    #include "arduino.h"
#else
    #include "WProgram.h"
#endif
int doTests();
int testMQTT();
int testPrepareMQTT();
int testMQTTQos0();
int testMQTTQos1();
int testMQTTBigMessages();
int testMQTTPubAck();
int testMQTTPubAckWhenNone();
int testMQTTMultiplePubAck();

int testLogging();
int testLogInit();
int testLogWriteRead();
int testLogWriteMany();
int testLogSend();
int testLogSendAck();
int testLogSendManyAck();
int testHandleDeliveryConfirmations();
int testHandleResending();


#endif
```

Obrázek 77 - jednotkové testy

8.7 Vizualizace na mapě

K vizualizaci na mapě bylo využito Google Maps, konkrétně funkcionality Polyline[22] (Obrázek 78), která umožňuje vykreslit právě dráhu letu – spojuje jednotlivé definované body čárou. Za účelem vizualizace více tras letu stačí vytvořit více objektů Polyline a samozřejmě spojující čáře nastavit jinou barvu pro odlišení.

```
75          var flightPlanCoordinates = [];
76          //process location data
77          for(var i=0, l=locationData.length; i<l; i++){
78            var loc = locationData[i];
79            var position = {
80              lat: loc["LAT_DEGREES"] + (loc["LAT_MINUTES"])/60, //convert degrees&minutes to degrees
81              lng: loc["LON_DEGREES"] + (loc["LON_MINUTES"])/60  //convert degrees&minutes to degrees
82            };
83            if(typeof position["lat"] == "number" && typeof position["lng"] == "number"){
84              flightPlanCoordinates.push(position);
85            }
86          }
87
88
89          if(flightPlanCoordinates.length==0){
90            return !1;
91          }
92
93          //map is centered to the position of first obtained fix
94          mapCenter = flightPlanCoordinates[0] || {lat: 50, lon: 14.4};
95
96          // expected output
97          // var flightPlanCoordinates = [
98          //   {lat: 37.772, lng: -122.214},
99          //   {lat: 21.291, lng: -157.821},
100         //   {lat: -18.142, lng: 178.431},
101         //   {lat: -27.467, lng: 153.027}
102         // ];
103
104
105       // This example creates a 2-pixel-wide red polyline showing the path of
106       // the first trans-Pacific flight between Oakland, CA, and Brisbane,
107       // Australia which was made by Charles Kingsford Smith.
108
109       window.initMap = function() {
110         var map = new google.maps.Map(document.getElementById('map'), {
111           zoom: 12,
112           center: mapCenter,
113           mapTypeId: 'terrain'
114         });
115
116         var flightPath = new google.maps.Polyline({
117           path: flightPlanCoordinates,
118           geodesic: true,
119           strokeColor: '#FF0000',
120           strokeOpacity: 1.0,
121           strokeWeight: 2
122         });
123
124         flightPath.setMap(map);
125       }
126   })();
```

Obrázek 78 - vizualizace trati v mapě pomocí Google Maps - Polyline

[22] https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/examples/polyline-simple

8.8 Konverze záznamů z interního úložiště do IGC

Data v interním paměťovém úložišti jsou ukládána v binární podobě. Pro jejich konverzi je nutno tuto podobu nejdříve načíst a konvertovat do zpracovatelné formy. V Pythonu je tento úkol velmi jednoduchý a je obsažen v knihovně struct[23]. Skutečnou strukturu stačí pouze definovat jednotlivými symboly (H, L, B, C) a metody knihovny se již o úspěšné načtení postarají. Na screenshotu níže (Obrázek 79) je prototyp algoritmu, konvertujícího data z interního paměťového úložiště loggeru do souborů ve formátu IGC.

```
13  filename = sys.argv[1]
14  # define binary structure
15  struct_fmt = '=H H L 1c H H L c B B B B B B B H B B B'
16  struct_len = struct.calcsize(struct_fmt)
17  struct_unpack = struct.Struct(struct_fmt).unpack_from
18
19  outputFile = open(filename+".IGC", "w")
20  # write IGC HEADERS
21  outputFile.write("AXCM5W6FLIGHT:1\n")
22  outputFile.write("HFDTE300518\n")
23  outputFile.write("HFFXA100\n")
24  outputFile.write("HFPLTPILOT:lukas behounek\n")
25  outputFile.write("HFGTYGLIDERTYPE:Testing\n")
26  outputFile.write("HFGIDGLIDERID:Testing\n")
27  outputFile.write("HFDTM100GPSDATUM:WGS-1984\n")
28  outputFile.write("HFRHWHARDWAREVERSION:LiveTracking Loggers\n")
29  outputFile.write("HFRFWFIRMWAREVERSION:0.1\n")
30  outputFile.write("HFFTYFRTYPE:LiveTracking Loggers\n")
31  outputFile.write("HFCIDCOMPETITIONID:423\n")
32  outputFile.write("HFCCLCOMPETITIONCLASS:AL2\n")
33  outputFile.write("I013640GSP\n")
34  outputFile.write("J020810WDI1115WVE\n")
35  outputFile.write("LXCM::VEHICLE:0\n")
36
37  # convert binary data
38  with open(filename, "rb") as f:
39      while True:
40          data = f.read(struct_len)
41          if not data: break
42          s = struct_unpack(data)
43          # write only non-zero records
44          if s[10] > 0:
45
46              igcTime = str(s[11]).zfill(2) + str(s[12]).zfill(2) + str(s[13]).zfill(2)
47              # lat/lon minute decimal parts need to be converted to 6-char form, so that decimal part "45321"
48              #     does not become .45321 but rather .045321; then we strip off first charactes
49              # lat/lon is in form Degree-Degree-Minute-Minute-POINT-Decimal-Decimal-Decimal; N/S and E/W is appended
50              igcLat = str(s[0]).zfill(2) + str(s[1]).zfill(2) + str(s[2]).zfill(6)[0:3] + str(s[3].decode('utf-8'))
51              igcLon = str(s[4]).zfill(3) + str(s[5]).zfill(2) + str(s[6]).zfill(6)[0:3] + str(s[7].decode('utf-8'))
52              igcAlt = "A0015000150"
53              outputFile.write("B"+igcTime+igcLat+igcLon+igcAlt+"\n")
```

Obrázek 79 - konverze binárních záznamů z interního úložiště do formátu IGC

[23] https://docs.python.org/3/library/struct.html

Reference

Acosta, N., & Toloza, J. (2012). Techniques to improve the GPS precision. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 125-130.

Altimeter Pressure Settings. (4. 11 2020). Načteno z skybrary.aero: https://www.skybrary.aero/index.php/Altimeter_Pressure_Settings

AMOD AGL3080 User Manual. (11. 4 2020). Načteno z http://www.canadagps.com/Downloads/AGL3080Manual.pdf

Audin, G. (2018). *Examining IoT Connection Options*. Načteno z nojitter.com: https://www.nojitter.com/examining-iot-connection-options

Data logger AMOD AGL 3080. (1. 4 2020). Načteno z leteckykalendar.cz: http://www.leteckykalendar.cz/AMOD

Dhillon, B. S. (2010). *Life Cycle Costing for Engineers*. CRC Press.

Evropská komise. (1. 5 2020). *The new ecodesign measures explained*. Načteno z European Comission: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_19_5889

FAI CIMA. (01. 01 2020). *Section 10 - Microlights and Paramotors*. Načteno z FAI Sporting Code: https://www.fai.org/sites/default/files/s_10_2020.pdf

FAI GAC. (01. 01 2020). *Requirements for Equipment used for Flight Validation*. Načteno z FAI Sporting Code - General Aviation: https://www.fai.org/sites/default/files/documents/sc2_annex_4_2020.pdf

Fédération Aéronautique Internationale. (2020). *FAI Sporting Code*. Načteno z Fédération Aéronautique Internationale: https://www.fai.org/sites/default/files/documents/fai_sporting_code_gs_2020_v1.1.pdf

Flymaster Avionics Lda. (4. 5 2020). *Flymaster Tracker*. Načteno z Flymaster Avionics: https://www.flymaster.net/tracker

Flymaster Tracker - User Manual. (17. 3 2020). Načteno z Flymaster Avionics: https://dnl.flymaster.net/FlymasterTrackerUserManual2.01r_EN.pdf

Google. (4. 11 2020). *Google Cloud Platform Free Tier*. Načteno z Google Cloud: https://cloud.google.com/free

Google. (11. 4 2020). *Google Compute Engine | Pricing*. Načteno z Google Cloud Platform: https://cloud.google.com/compute/all-pricing

Google Maps. (2020). *Google Maps*. Načteno z Google Maps: https://www.google.com/permissions/geoguidelines/

GPS, UTC, and TAI Clocks. (10. 4 2020). Načteno z leapsecond.com: http://leapsecond.com/java/gpsclock.htm

GPS.gov. (30. 4 2020). *GPS Accuracy* . Načteno z GPS.gov: https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/

Graham, M. (4. 7 2011). *GPS versus barometric altitude: the definitive answer*. Načteno z xcmag.com: https://xcmag.com/news/gps-versus-barometric-altitude-the-definitive-answer/

Hellstrom, M. (1. 3 2020). *What is LoRa?* Načteno z mickmake.com: https://www.mickmake.com/post/what-is-lora-technology/

Hu, J.-m., Li , J., & Li, G.-h. (2012). Automobile Anti-theft System Based on GSM and GPS Module. *2012 Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*.

IGC Approvals for GNSS Flight Recorders. (10. 2 2020). Načteno z FAI.org: https://www.fai.org/sites/default/files/igcapproval_table_history_2020-2-1.pdf

LAA ČR, S. (9. 3 2019). *Sportovní řád LAA ČR pro UL letouny*. Načteno z Letecká amatérská asociace České republiky: http://www.laacr.cz/SvazUL/Documents/SvazUL/2019/190309_Sportovni_rad_UL_fin.pdf

Malý, M. (11. 04 2020). *Protokol MQTT: komunikační standard pro IoT* . Načteno z root.cz: https://www.root.cz/clanky/protokol-mqtt-komunikacni-standard-pro-iot/

Mazur, G. (1. 5 2020). *History of QFD*. Načteno z QFD Institute: http://www.qfdi.org/what_is_qfd/history_of_qfd.html

McClelland, C. (2019). *Types of Network Connectivity for the Internet of Things (IoT)*. Načteno z iotforall.com: https://www.iotforall.com/connecting-the-internet-of-things/

Meredith-Hardy, R. (11. 4 2020). *Flymaster - Testing report*. Načteno z FAI CIMA: http://wiki.fai.org/download/attachments/35651593/Flymaster+WPC+Thailand+report+v1.pdf

Meredith-Hardy, R., & Esteban, J. L. (19. 12 2019). *Flight Recorder Approval Committee (FRAC)*. Načteno z http://wiki.fai.org/pages/viewpage.action?pageId=28606481

Metodika MMSP-AV. (2020). Načteno z MMSP-AV: http://mmsp-av.wz.cz/

nodered.org. (11. 4 2020). *Node-RED, github.com*. Načteno z github.com: https://github.com/node-red/node-red

OpenStreetMap. (2020). *OpenStreetMap*. Načteno z OpenStreetMap: https://www.openstreetmap.org/copyright

qps.nl. (7. 1 2020). *UTC to GPS Time Correction*. Načteno z qps.nl: https://confluence.qps.nl/qinsy/latest/en/utc-to-gps-time-correction-32245263.html

Renfro, B. A., Stein, M., Boeker, N., & Terry, A. (20. 03 2018). *An Analysis of Global PositioningSystem (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance for 2017*. Načteno z GPS.gov: https://www.gps.gov/systems/gps/performance/2017-GPS-SPS-performance-analysis.pdf

Řízení letového provozu České republiky. (22. 6 2017). *LKSN Slaný*. Načteno z VFR manual Czech Republic: https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/pdf/ad-lksn_map_en.pdf

Sainer, P. (2020). *Databáze letišť*.

Schwaber, K. (2004). *Agile Project Management with Scrum*. Redmond: Microsoft Press.

SIM7600 datasheet. (4. 4 2020). Načteno z SIMCom.ee: https://simcom.ee/documents/SIM7600E/SIM7600%20Series%20Hardware%20Design_V1.03.pdf

SIMCom. (2020). *Sim 5320 datasheet*. Načteno z https://www.tinyosshop.com/datasheet/SIM5320_Hardware+Design_V1.07.pdf

Šochová, Z. (2017). *The Great ScrumMaster: #ScrumMasterWay*. Addison-Wesley Professional.

Technical Specifications for GNSS Flight Recorders. (30. 10 2019). Načteno z http://www.ukiws.demon.co.uk/GFAC/documents/tech_spec_gnss.pdf

U-Blox LARA R2. (4. 4 2020). Načteno z DigiKey.com: https://www.digikey.com/product-detail/en/u-blox/LARA-R204-02B-02/672-LARA-R204-02B-02CT-ND/7393558

U-Blox.com. (16. 2 2018). *LTE Cat 1*. Načteno z U-Blox.com: https://www.u-blox.com/en/technologies/lte-cat-1

Verma, P., & Bhatia, S. (2013). Design and Development of GPS-GSM Based Tracking System With Google Map Based Monitoring. *International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCSEA)*.

Verze a cena modulu SIM7600. (4. 4 2020). Načteno z TME.eu: https://www.tme.eu/cz/katalog/?search=SIM7600G&s_field=1000011&s_order=desc

Wechsler, J. (8 1990). The Role of GPS in Precise Time and Frequency Dissemination . *GPSWorld*.

Worth, A. (24. 3 2020). *A Complete Overview of 2G & 3G Sunsets*. Načteno z 1oT.mobi: https://1ot.mobi/resources/blog/a-complete-overview-of-2g-3g-sunsets

„Every time I fly, I experience another dimension of existence, no longer tied to the earth. I feel free - free of gravity, free of everything. It's the greatest feeling in the world."

Robert A. Hoover