

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Zaměřovač skrytého vysílače

Michal Renda

Bakalářská práce

2025

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Michal Renda**
Osobní číslo: **I22061**
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Zaměřovač skrytého vysílače**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a rádiových systémů**

Zásady pro vypracování

Navrhněte a sestavte zařízení pro lokalizaci skrytého vysílače, které bude průběžně zjišťovat svou GPS pozici a orientaci vůči magnetickému poli Země. Na základě informací o azimutu ke skrytému vysílači a informací o vlastní poloze zařízení metodou triangulace dopočítá nejpravděpodobnější místo ukrytí vysílače a bude schopné navigovat obsluhu ke zdroji rádiového signálu.

Práce bude obsahovat jasnou definici požadavků na zařízení, teoretický rozbor zadání a výběr vhodných modulů. V praktické části bude navrženo a vyrobeno vlastní zařízení včetně napájení a krytu.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] ESP8266EX Data Sheet. Espressif, 2018, [cit. 1. 11. 2018]. Dostupné z URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf
[2] HANDLEY, Phil. *Radio Direction Finding Techniques*. Online. Hackaday.io. 2017. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/25995-bloodhound-autonomous-radiolocation-drone/log/63866-radio-direction-finding-techniques>. [cit. 2024-11-18].

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Roleček**
Katedra elektroniky a rádiových systémů

Datum zadání bakalářské práce: **6. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 6. ledna 2025

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem Zaměřovač skrytého vysílače jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Michal Renda

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkovala Ing. Jiřímu Rolečkovi za odborné vedení mé bakalářské práce a za cenné rady a připomínky. Dále patří mé díky Ing. Pavlu Rozsivalovi za konzultaci týkající se digitálního kompasu, která mi pomohla překonat technické výzvy spojené s tímto zařízením a Ing. Martinu Dobrovolnému, Ph.D., za skvělou výuku práce s ESP32, především v oblasti vícevláknového programování, které bylo pro tuto práci klíčové. V neposlední řadě bych rád poděkoval doc. Ing. Janu Pidaničovi, Ph.D. za jeho vstřícnost při řešení různých problémů, které se během zpracování práce objevily.

Děkuji také radioklubu OK1KYP za zapůjčení přijímače a vysílače pro testování.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům za jejich velkou podporu během studia.

Anotace

Tato práce se zaměřuje na návrh a vývoj zařízení pro lokalizaci skrytého vysílače, určeného pro použití při rádiovém orientačním běhu. Cílem je zjednodušit proces zaměřování vysílačů a poskytnout závodníkovi informace o vzdálenosti a azimutu k vysílači. Zařízení využívá GPS modul a elektronický kompas, které jsou propojeny s mikroprocesorem. Práce zahrnuje popis metod zaměřování vysílačů, konstrukční řešení zařízení, popis algoritmů pro odhadování polohy vysílačů a výsledky testování tohoto zařízení v terénu.

Klíčová slova

Triangulace, rádiový orientační běh, globální polohový systém, digitální kompas, ESP32

Title

Locator of hidden radio transmitter.

Annotation

This thesis focuses on the design and development of a device for locating a hidden radio transmitter, intended for use in ARDF. The goal is to simplify the process of locating transmitters and provide the user with information about the distance and azimuth to the transmitter. The device uses a GPS module and an electronic compass, which are connected to a microprocessor. The thesis includes a description of the methods for locating transmitters, the design solution of the device, a description of the algorithms for estimating the location of the transmitters and the results of testing the device in the field.

Keywords

Triangulation, amateur radio direction finding, Global Positioning System, digital compass, ESP32

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	9
Úvod	11
1 Teoretická část	12
1.1 Rádiový orientační běh.....	12
1.2 Přijímače pro rádiový orientační běh.....	12
1.2.1 Přijímač pro pásmo 2 m.....	12
1.2.2 Přijímač pro pásmo 80 m.....	13
1.3 Metoda zaměřování vysílačů.....	14
1.3.1 Běžná metoda – zákresy do mapy.....	14
1.3.2 Digitálně – pomocí vyvíjeného zařízení.....	15
1.4 Požadavky na zařízení.....	15
1.4.1 Zeměpisné souřadnice.....	15
1.4.2 Orientace vůči magnetickému poli Země.....	15
1.4.3 Vstup od uživatele.....	15
1.4.4 Zobrazení informací.....	16
1.4.5 Zpracování dat.....	16
1.4.6 Ostatní požadavky na zařízení.....	16
1.5 Algoritmus pro určování polohy vysílačů.....	16
1.6 Výpočet průsečíku mnohoúhelníku.....	19
1.6.1 Princip algoritmu.....	19
2 Praktická část	21
2.1 Uživatelské rozhraní.....	21
2.2 Komunikace s GPS modulem.....	22
2.3 Kalibrace kompasu.....	23
2.4 Ukládání dat.....	23
2.4.1 Soubor s kompenzačními hodnotami pro kompas.....	23
2.4.2 Soubor waypoints[x].gpx.....	24
2.4.3 Soubor polygons[x].gpx.....	26
2.5 Návrh DPS.....	28

2.6 Návrh pouzdra zařízení.....	31
2.7 Testování při vývoji.....	34
2.8 Testování se skutečným vysílačem.....	37
Závěr	40
Literatura	41

Seznam zkratek

GPS	Global Positioning System
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
TTL	Transistor-Transistor Logic
JSON	JavaScript Object Notation
XML	eXtensible Markup Language
GPX	GPS Exchange Format
VN	Vysoké napětí
AD	Analog to Digital
DPS	Deska plošných spojů
GND	Ground
TX	Transmitter
FDM	Fused Deposition Modeling
I ² C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
SPIFFS	SPI Flash File System
RTOS	Real-Time Operating System
GPIO	General Purpose Input/Output
NMEA	National Marine Electronics Association
GNSS	Global Navigation Satellite System
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
RJ45	Registered Jack 45
PC	Personal Computer

Seznam obrázků

Obrázek 1 - přijímač SUPERFOX 145E (z webových stránek ok2bwn.cz)	12
Obrázek 2 - přijímač SUPERFOX 3,5GX (z webových stránek ok2bwn.cz).....	13
Obrázek 3 - Měření zakreslená v mapě	14
Obrázek 4 - Simulace jednoduchého algoritmu (měřítko mapy přibližně 1:10 000)	17
Obrázek 5 - Původní čtyřúhelník.....	18
Obrázek 6 - Simulace algoritmu, který zohledňuje odchylku kompasu a GPS (měřítko mapy přibližně 1:10 000).....	19
Obrázek 7 - Výsledek Sutherland-Hodgmanova algoritmu	20
Obrázek 8 - Návrh uživatelského rozhraní v Lopaka.app	21
Obrázek 9 - Příklad NEMA věty (z webu MATLAB Help Center).....	22
Obrázek 10 - waypoints.gpx v Mapy.cz.....	26
Obrázek 11 - polygons.gpx v Mapy.cz.....	28
Obrázek 12 - Návrh DPS	29
Obrázek 13 - Schéma zapojení	30
Obrázek 14 - Model pouzdra zařízení	31
Obrázek 15 - Sestavené zařízení.....	33
Obrázek 16 - Sestavené zařízení ze spodu.....	33
Obrázek 17 - Směrnice ze souboru waypoints.gpx	34
Obrázek 18 - výskyt vedení VN v blízkosti místa měření.....	35
Obrázek 19 - Oblast po 1. měření.....	35
Obrázek 20 - Oblast po 2. měření.....	36
Obrázek 21 - Oblast po 3. měření.....	36
Obrázek 22 - Oblast po 4. měření.....	37
Obrázek 23 - Směrnice ze souboru waypoints.gpx	38
Obrázek 24 - Mnohoúhelníky ze souboru polygons.gpx.....	39
Obrázek 25 - Poslední mnohoúhelník ze souboru polygons.gpx	39

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Využití GPIO pinů u ESP32	31
Tabulka 2 - Odchyly od skutečného cíle při testovacím měření	34

Úvod

Práce je zaměřena na návrh a sestavení zařízení, které slouží jako pomůcka pro lokalizaci skrytého vysílače. Je určeno pro použití při soutěžích v rádiovém orientačním běhu. Cílem tohoto sportu je určit polohu několika vysílačů v terénu a tato místa navštívit. Závodníci využívají speciální přijímač, busolu a mapu.

Zařízení má usnadnit proces zaměřování vysílačů a zároveň poskytnout uživateli informace o jejich vzdálenosti a azimutu. K tomu je využito modulu GPS a elektronického kompasu. Tyto moduly jsou propojené s mikroprocesorem, což umožňuje automatizaci výpočtů a zobrazení výsledných dat na displeji zařízení.

Práce vysvětluje princip rádiového orientačního běhu a běžných metod zaměřování vysílačů v tomto sportu. Následně detailně popisuje metodu použitou v navrženém zařízení, včetně algoritmů, které jsou pro tento účel implementovány.

Dále se práce věnuje konstrukčnímu řešení zařízení, a to jak elektrickému, tak mechanickému návrhu.

Závěrečná část obsahuje výsledky testování zařízení, které jsou doplněny analýzou a názorným zobrazením v mapě.

1 Teoretická část

1.1 Rádiový orientační běh

Rádiový orientační běh je sport, při kterém se závodník snaží určit polohu až pěti rádiových vysílačů a v časovém limitu je v libovolném pořadí i nalézt. K dispozici má rádiový přijímač, busolu, psací potřeby a mapu, na které je zakreslený start a cíl. Soutěží se s vysílači v radioamatérském pásmu 80 m (3,5 MHz) a 2 m (145 MHz). Provedení přijímače i metoda zaměřování vysílačů jsou pro každé pásmo rozdílné.

Na klasické trati se nachází pět vysílačů na jedné frekvenci. Vysílají vždy 1 minutu a postupně se střídají. Po pěti minutách, tedy po odvysílání relace všemi vysílači opět běží relace prvního vysílače a celý pětiminutový cyklus se opakuje. V rámci své relace vysílač opakovaně vysílá svoji značku v Morseově abecedě. „MOE“ – 1. vysílač, „MOI“ – 2. vysílač, „MOS“ – 3. vysílač, „MOH“ – 4. vysílač a „MO5“ – 5. vysílač.

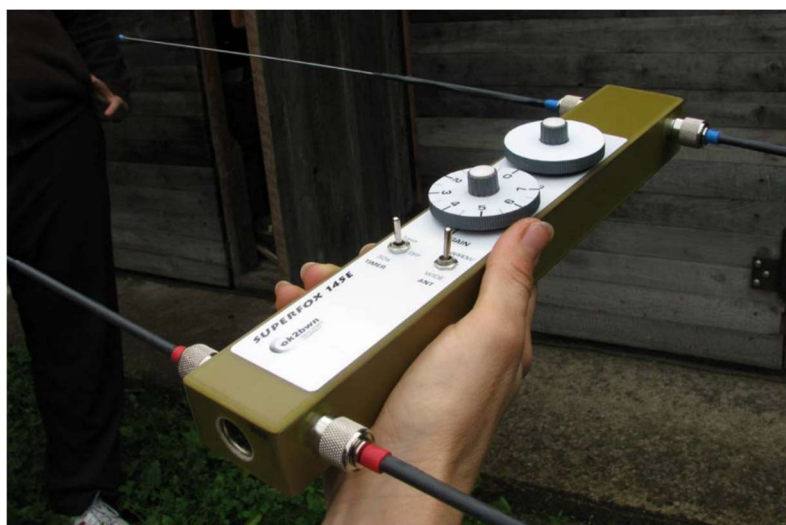
Na trati se také nachází tzv. maják, který slouží k navedení závodníků do cíle, v jehož blízkosti se nachází. Vysílá nepřetržitě na odlišné frekvenci značku „MO“.

1.2 Přijímače pro radiový orientační běh

1.2.1 Přijímač pro pásmo 2 m

K zaměřování vysílačů v pásmu 2 m se běžně používá přijímač s integrovanou směrovou anténou podle HB9CV. Ta vyniká svými kompaktními rozměry, úzkým hlavním lalokem a vysokým předozadním poměrem. Závodník otáčí přijímačem a hledá směr nejsilnějšího signálu.

Hledání vysílačů je však velmi ztíženo podmínkami šíření v tomto pásmu, tj. odrazy od různých terénních prvků, ohyby signálu v blízkosti vodních ploch, oplocenek, vedení VN apod. Toto vše musí závodník brát v potaz a opakovat měření, dokud si není jistý, že signál, který zaměřil, se k němu šířil nejkratší možnou cestou a ne odrazem.



Obrázek 1 - přijímač SUPERFOX 145E (z webových stránek ok2bwn.cz)

1.2.2 Přijímač pro pásmo 80 m

K zaměřování vysílačů v pásmu 80 m se běžně používá přijímač s integrovanou ferritovou anténou, ke které je pomocí tlačítka možné připojit sfázovaný prut a tím změnit vyzařovací resp. „přijímací“ charakteristiku antény. Samotná ferritová anténa má vyzařovací charakteristiku připomínající číslici 8. Má tedy 2 úzká maxima a 2 ještě užší minima. Závodník otáčí přijímačem a hledá směr, resp. směry ze kterých se signál jeví jako nejslabší.

Tyto směry jsou kvůli symetrii vyzařovací charakteristiky ovšem dva. Je tedy potřeba stisknutím tlačítka změnit vyzařovací charakteristiku antény a opakovaným měřením jeden z těchto směrů vyloučit. Stisknutím tlačítka se k ferritové anténě připojí sfázovaný prut, díky čemuž se dosáhne kardioidní vyzařovací charakteristiky. Ta se vyznačuje vysokým předozadním poměrem. Závodník je tedy schopen s jistotou určit ze kterého z dvou směrů přichází silnější signál, tedy kterým směrem by se měl vysílač nacházet.

Tento přijímač je sice náročnější na obsluhu, ale závodník se v tomto pásmu nemusí potýkat s odrazy signálu. Vysílače je tak možné zaměřit přesně a s jistotou jak u vzdáleného vysílače, tak i v bezprostřední blízkosti.



Obrázek 2 - přijímač SUPERFOX 3,5GX (z webových stránek ok2bwn.cz)

Zaměřovač skrytého vysílače, o kterém pojednává tato práce, je konstruován jako „modul“ právě k tomuto přijímači.

1.3 Metoda zaměřování vysílačů

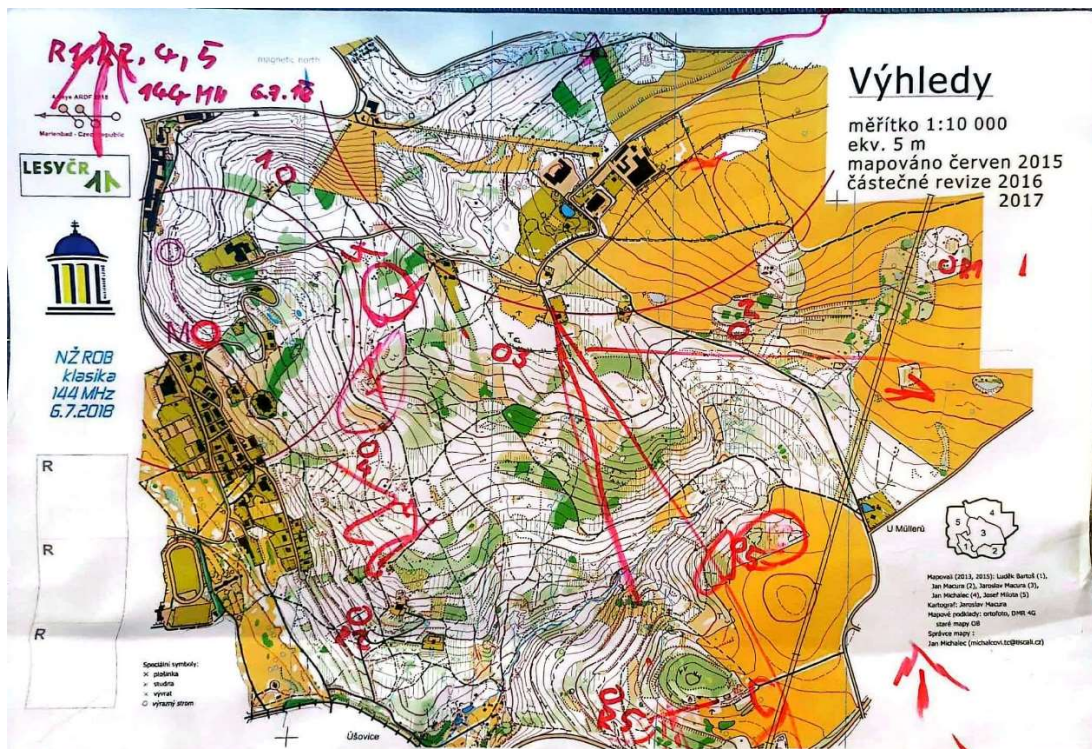
Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1 – relace hledaných vysílačů není trvalá, ale zabírá pouze 1/5 času. Pro závodníka tedy není výhodné, aby pouze zaměřil směr k vysílači a tímto směrem se vydal. Nemůže totiž vědět, jak daleko se vysílač nachází (může se pouze domnívat podle síly signálu). Je také možné, že cestou potká různé nepřekonatelné terénní překážky (příliš hustý porost, útesy, vodní plochy, zastavěné oblasti apod.). Signál daného vysílače se navíc na 4/5 času „ztrácí“. Pokud chce závodník uspět, je také klíčové, aby zvolil správné pořadí, ve kterém vysílače navštíví tak, aby naběhal co nejkratší možnou vzdálenost.

1.3.1 Běžná metoda – zákresy do mapy

Běžně se k odhadování polohy vysílače používá metoda triangulace. Závodník si pomáhá kreslením směrnic do mapy. V praxi celý proces vypadá takto:

1. Závodník pomocí přijímače určí směr k vysílači ze své aktuální polohy.
2. Do mapy zakreslí polopřímku, která vychází z jeho aktuální polohy ve směru, kterým vysílač zaměřil.
3. Opakuje-li zaměřování z různých míst, získá průsečík polopřímek, který ukazuje oblast, kde by se vysílač měl nacházet.

Pokud tento postup opakuje závodník i pro další z pěti vysílačů, získá tím představu o tom, kde se vysílače přibližně nacházejí.



Obrázek 3 - Měření zakreslená v mapě

1.3.2 Digitální metoda – pomocí vyvíjeného zařízení

Zaměřovač skrytého vysílače tyto zákresy automatizuje. Zařízení je mechanicky pevně spojené s přijímačem, tedy je vždy natočené stejným směrem. V praxi celý proces vypadá takto:

1. Závodník pomocí přijímače určí směr k vysílači ze své aktuální polohy a stiskne „spoušť“ – speciální tlačítko na zaměřovači.
2. Zařízení uloží do paměti aktuální zeměpisné souřadnice a azimut k vysílači, resp. své aktuální natočení vůči magnetickému poli Země.
3. Opakuje-li závodník měření z různých míst, zařízení vypočítá oblast možného výskytu vysílače a průběžně zobrazuje vzdálenost a směr k této oblasti, resp. k jejímu středu.

Pokud tento postup závodník opakuje i pro další z pěti vysílačů, zařízení zobrazí směr a vzdálenost ke každému z nich.

1.4 Požadavky na zařízení

Tato kapitola popisuje základní požadavky na zařízení, jaké informace zařízení získává, jakým způsobem je zpracovává a jaké údaje následně předává uživateli.

1.4.1 Zeměpisné souřadnice

Zařízení musí být schopné při stisku „spouště“ zaznamenat své aktuální zeměpisné souřadnice, aby bylo možné, je použít v pozdějších výpočtech. Proto je osazeno GPS modulem. Ten průběžně zjišťuje své aktuální zeměpisné souřadnice a předává je mikroprocesoru přes rozhraní UART.

Pro potřeby zařízení, byl vybrán modul ublox NEO-6M, který pro daný účel dostatečně kvalitní a zároveň nabízí velmi dobrý poměr cena-výkon.

1.4.2 Orientace vůči magnetickému poli Země

Pro zjišťování orientace vůči magnetickému poli Země je použit elektronický kompas LSM303DLHC. Tento modul měří intenzity magnetického pole ve třech osách. Tyto informace poté předává mikroprocesoru přes rozhraní I²C, který je poté schopný vypočítat azimut k severnímu magnetickému pólu Země i s kompenzací pro případný náklon zařízení.

1.4.3 Vstup od uživatele

Pro získání vstupu od uživatele je zařízení osazeno pěti tlačítky. Ta slouží pro změnu různých nastavení v terénu. Hlavní z nich slouží jako „spoušť“. Tímto tlačítkem dává uživatel povel k zaznamenání aktuálních zeměpisných souřadnic a azimutu do paměti.

Stisk tlačítek je doprovázen zpětnou vazbou v podobě pípnutí nebo přehrání jednoduché melodie piezoelektrickým bzučákem.

1.4.4 Zobrazení informací

Zařízení dává uživateli průběžně informace o vzdálenosti a azimutu ke hledaným vysílačům. Také zobrazuje ostatní důležité informace, jako je aktuální azimut, čas, počet zachycených GPS satelitů, napětí baterie a jiné provozní informace.

Pro zobrazení těchto informací je použit OLED displej s rozlišením 256x64 pixelů ovládaným řadičem SSD1322 který s mikroprocesorem komunikuje přes rozhraní 4-Wire SPI. Tento displej byl vybrán hlavně díky své skvělé čitelnosti na slunci i v noci.

1.4.5 Zpracování dat

Ke zpracování dat ze senzorů a následným výpočtům byl vybrán mikroprocesor ESP32, díky své cenové dostupnosti a podpoře freeRTOS, který umožňuje vícevláknové programování.

Konkrétně byl vybrán modul ESP-WROOM-32, který disponuje hlavně dostatkem GPIO pro připojení všech periférií, dostatečným výkonem pro zpracování dat a oproti starším mikrokontrolerům i větší paměti RAM a Flash paměti, která je využívána pro ukládání souborů pomocí SPIFFS.

1.4.6 Ostatní požadavky na zařízení

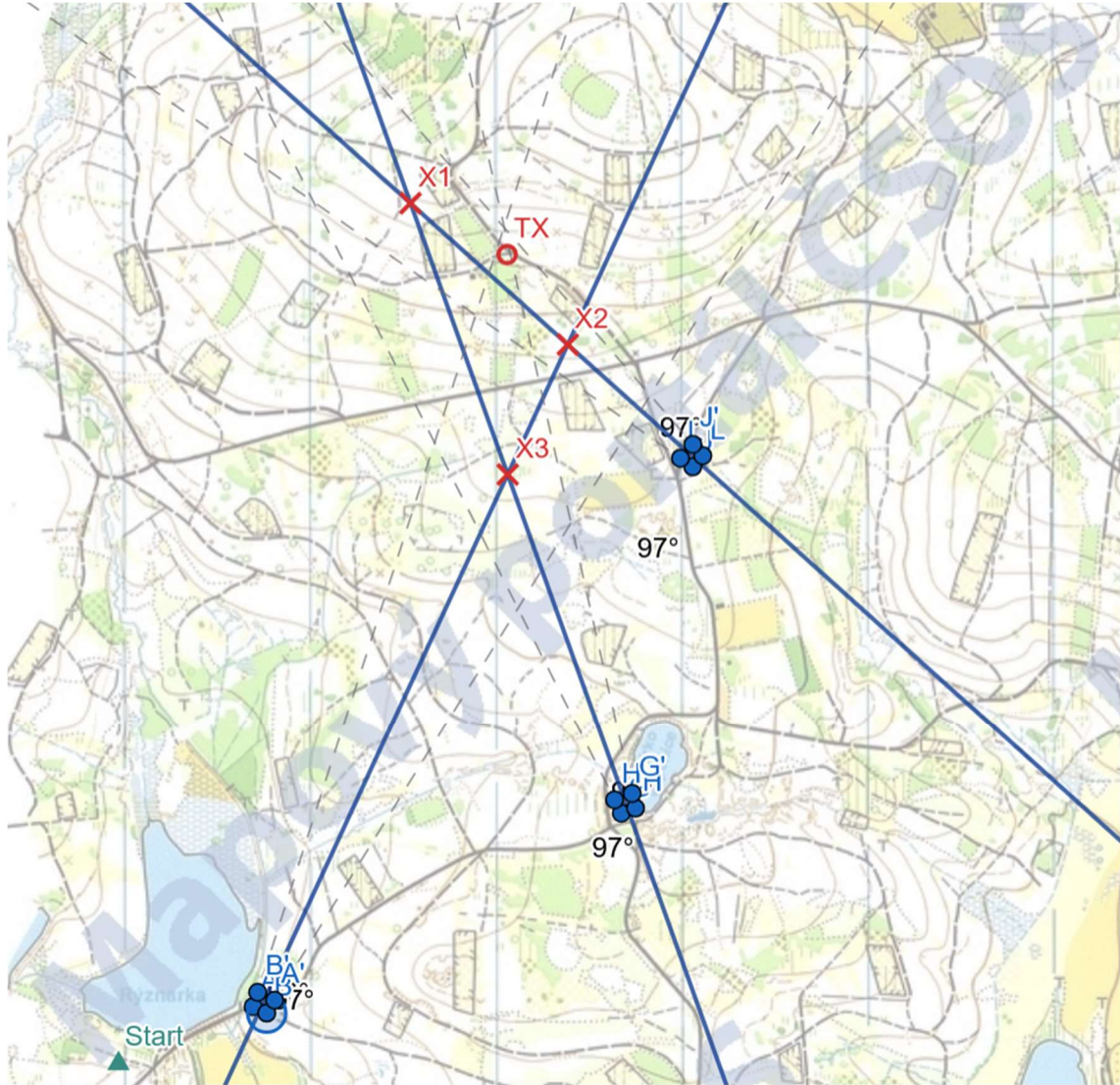
Zařízení musí být schopné pracovat v prostředí lesa po celou dobu závodu (až 2,5h) na baterii. Proto je osazeno Li-ion článkem 18650 s dostatečnou kapacitou. Aby se zabránilo přílišnému vybití článku, je jeho napětí sledováno přes odporový dělič integrovaným AD převodníkem mikroprocesoru.

Je také potřeba, aby zařízení bylo vhodně připevněné k přijímači a jeho provedení bylo ergonomické, tak aby závodníka obsluha zařízení příliš nezdržovala. Návrhem vhodného pouzdra zařízení se zabývá oddíl 2.6.

1.5 Algoritmus pro určování polohy vysílačů

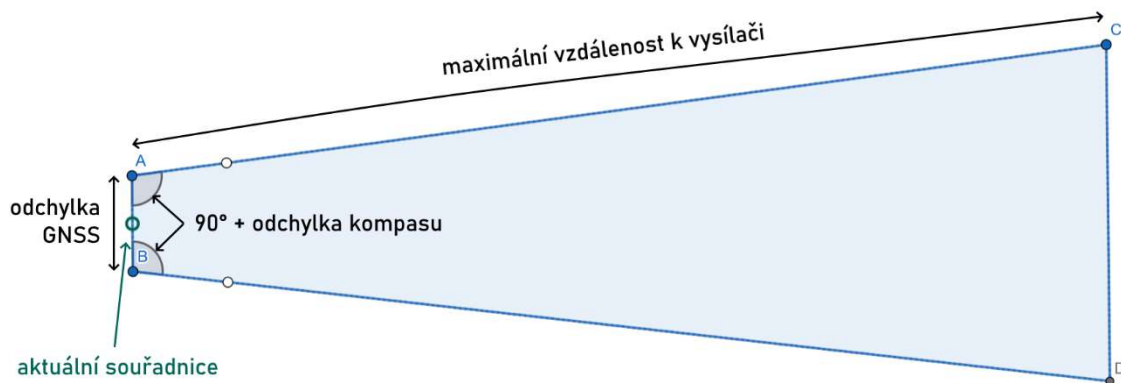
Pro spolehlivé určení polohy vysílačů je potřeba zvolit vhodný algoritmus, který počítá i s odchylkou kompasu a GPS. Pokud by se totiž počítalo s prostými průsečíky směrnic, mohli by vyjít až tři průsečíky už po třetím měření.

Následující obrázek toto demonstruje. Byla nasimulována 3 měření, která ale byla zatížena odchylkou kompasu, v tomto případě $\pm 7^\circ$. Po 3. měření vychází 3 průsečíky X1, X2 a X3. Protože algoritmus ale nepočítá s odchylkou kompasu ani GPS, nemůže určit oblast ve které se s jistotou vysílač, jehož „skutečná“ pozice je reprezentována bodem TX, nachází. Mohl by uživatele navigovat například do oblasti mezi těmito průsečíky, ale jak je z obrázku patrné, vysílač se tam nemusí nacházet.



Obrázek 4 - Simulace jednoduchého algoritmu (měřítko mapy přibližně 1:10 000)

Je tedy potřeba použít algoritmus který zohledňuje odchylku kompasu a GPS. Použitý algoritmus počítá s mnohoúhelníky, které reprezentují oblast možného výskytu vysílače s ohledem na odchylky. Po stisknutí spouště se vypočítá čtyřúhelník definovaný aktuálními souřadnicemi, aktuální odchylkou GPS, zvolenou odchylkou kompasu a zvolenou maximální vzdáleností k vysílači.

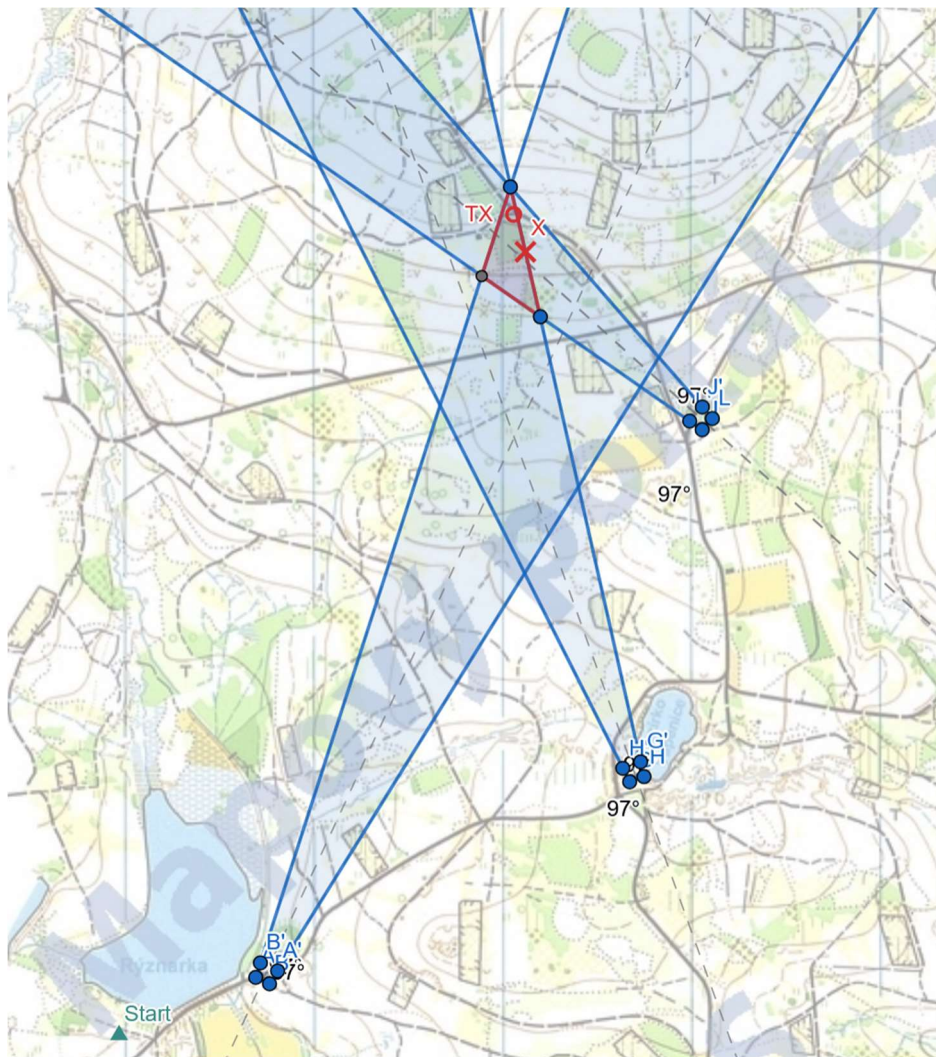


Obrázek 5 - Původní čtyřúhelník

Po druhém měření jsou dostupné už 2 čtyřúhelníky. Jejich průsečík, který je mnohoúhelníkem reprezentuje oblast možného výskytu vysílače. Závodník je poté navigován do středu úsečky mezi dvěma od sebe nejvzdálenějšími body tohoto mnohoúhelníku.

Při každém dalším měření se vypočítá nový průsečík předchozího mnohoúhelníku a nově vzniklého čtyřúhelníku atd.

Následující obrázek zobrazuje stejné měření jako na obrázku 4, ale s použitím algoritmu, který zohledňuje odchylku kompasu a GPS. Červený mnohoúhelník představuje oblast možného výskytu vysílače. Pokud tedy závodník zaměřil směr přijímače správně, může si být jist, že se vysílač někde v této oblasti nachází. Bod X poté představuje střed úsečky mezi nejvzdálenějšími body tohoto mnohoúhelníku, kam je závodník navigován. Bod TX představuje „skutečnou“ polohu vysílače.



Obrázek 6 - Simulace algoritmu, který zohledňuje odchylku kompasu a GPS (měřítko mapy přibližně 1:10 000)

1.6 Výpočet průsečíku mnohoúhelníku

Pro výpočet průsečíku dvou mnohoúhelníků program používá Sutherland-Hodgmanův algoritmus. Tento algoritmus se používá primárně v počítačové grafice, například pro ořezávání obsahu do obdélníkového výřezu zobrazovacího okna. Je funkční pouze pro konvexní mnohoúhelníky, což je ale pro tuto práci dostačující.

1.6.1 Princip algoritmu

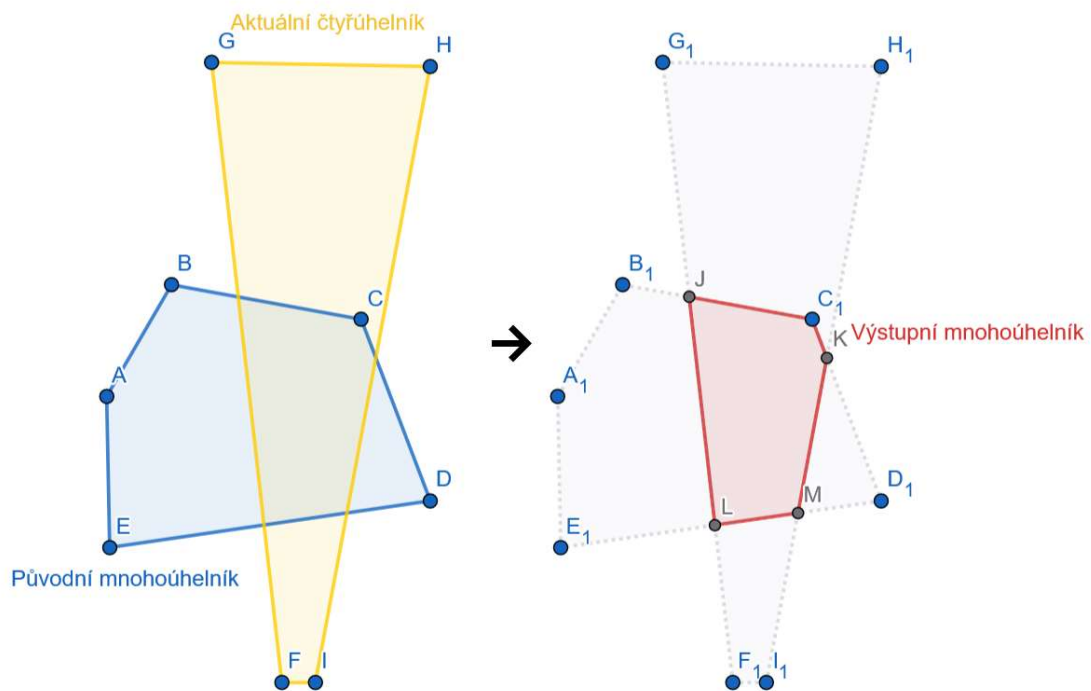
Algoritmus pracuje na principu postupného ořezávání vstupního mnohoúhelníku proti jednotlivým hranám aktuálního čtyřúhelníku.

Pro každou hranu aktuálního čtyřúhelníku se provedou tyto kroky: hrana aktuálního čtyřúhelníku se nekonečně prodlouží a tím se vytvoří hranice, podle které se všechny vrcholy mnohoúhelníku oříznou. Nově vytvořený seznam vrcholů se vždy použije pro ořez další hranou, dokud nejsou využity všechny hrany čtyřúhelníku.

Pro každou hranu mnohoúhelníku vůči aktuálnímu čtyřúhelníku, může vždy nastat jeden z těchto případů:

- Oba vrcholy jsou uvnitř – druhý vrchol se přidá do výstupního seznamu
- První vrchol je vně, druhý uvnitř – průsečík hrany mnohoúhelníku s hranou čtyřúhelníku se přidá do výstupního seznamu a druhý vrchol se přidá do výstupního seznamu
- První vrchol je uvnitř, druhý vně – pouze průsečík hrany mnohoúhelníku s hranou čtyřúhelníku se přidá do výstupního seznamu
- Oba vrcholy jsou vně – do výstupního seznamu se nic nepřidá

Po zpracování všech hran čtyřúhelníku algoritmus vrací výstupní mnohoúhelník, který představuje průsečík předchozího mnohoúhelníku s čtyřúhelníkem. [1]



Obrázek 7 - Výsledek Sutherland-Hodgmanova algoritmu

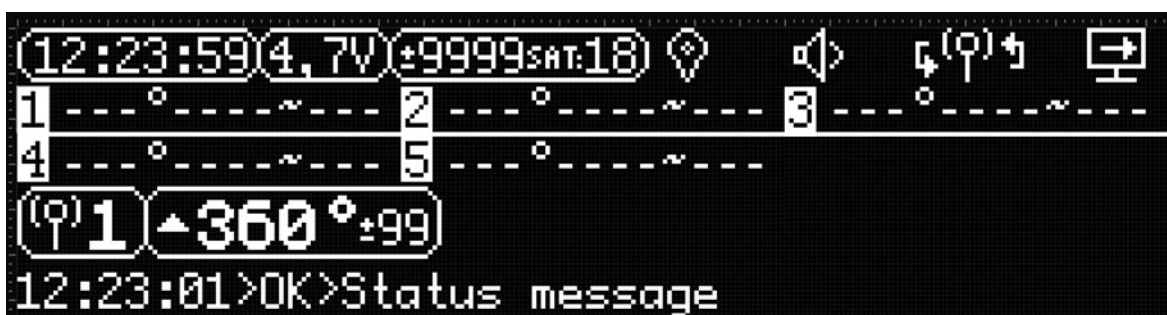
2 Praktická část

2.1 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní se skládá z pěti tlačítek, bzučáku pro zpětnou vazbu a displeje. Tento oddíl popisuje jeho podobu a proces vývoje.

Pro zobrazení všech potřebných informací byl vybrán monochromatický displej o rozlišení 256 bodů na šířku a 64 na výšku. Aby zobrazení na displeji bylo přehledné, je použito množství grafických prvků. To umožňuje knihovna U8g2, která proces obsluhy displeje velmi zjednodušuje. Jedná se o knihovnu pro monochromatické displeje, která podporuje renderování textu různých fontů, vykreslování grafických prvků, jako jsou obdélníky, čáry atd., i vykreslování vlastních obrázků, tedy například i ikon. [2]

Pro grafický návrh uživatelského rozhraní byl použit nástroj Lopaka.app, což je webová aplikace navržená specificky pro knihovnu U8g2. Umožňuje přípravu rozvržení různých grafických prvků a textů na displeji v jednoduchém editoru. Výstupem je kód, který definuje souřadnice prvků na displeji a jejich typ. Tento kód je pak s lehkými úpravami, například dosazení vlastních proměnných, možné použít.



Obrázek 8 - Návrh uživatelského rozhraní v Lopaka.app

V horní části obrazovky je uživatel informován o aktuálním čase, napětí baterie, odhadované odchylce GPS a počtu přijatých satelitů. Ikonky v pravé horní části uživatele informují o funkci tlačítek.

V prostřední části se nachází aktuální informace k jednotlivým cílům, resp. vysílačům jako je azimut, vzdálenost a průměr oblasti možného výskytu vysílače.

Ve spodní části uživatel nalezne informace o tom, jaký z vysílačů je právě vybrán a o aktuálním azimutu zařízení. Součástí uživatelského rozhraní je i řádek, kde se zobrazují jak různé informace o procesech, které v zařízení probíhají, tak i chybové hlásky.

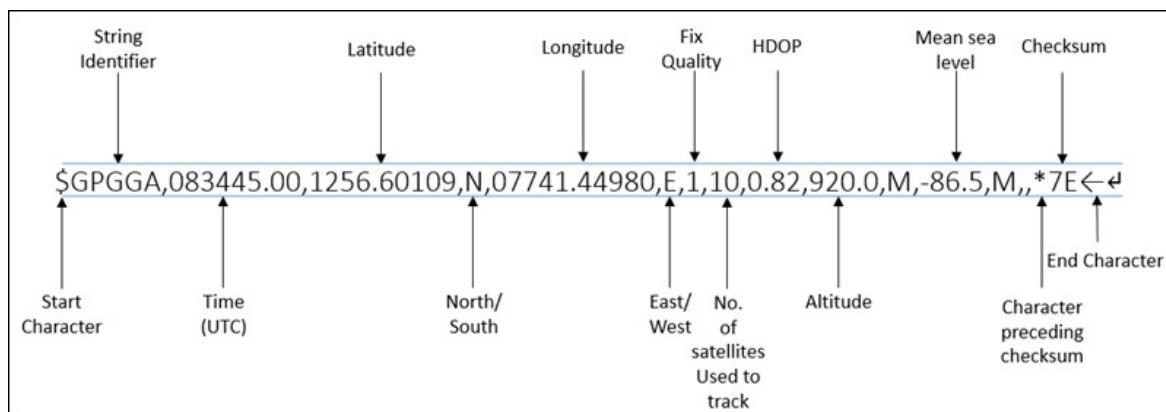
Obsluha uživatelského rozhraní je dobrým příkladem potřeby využít vícevláknové programování, které ESP32 díky freeRTOS podporuje. Pro obsluhu uživatelského rozhraní je vyhrazeno jedno z vláken, které neustále překresluje hodnoty na ty aktuální a vyhodnocuje stisky tlačítek. V pozadí pak běží další vlákna, která se zabývají například výpočtem těchto hodnot, ukládáním dat do paměti apod.

2.2 Komunikace s GPS modulem

Komunikace mikroprocesoru s GPS modulem probíhá pomocí rozhraní UART. K přenosu dat se využívá běžně používaný formát NMEA 0183. Tento datový protokol definuje způsob, jakým se předávají informace ve formě textových zpráv zvaných NMEA věty, které obsahují informace o zeměpisné poloze, aktuálním čase, počtu viditelných satelitů, rychlosti, kurzu, nadmořské výšce atd.

Každá NMEA věta začíná znakem \$, pokračuje identifikátorem typu zprávy a jednotlivými hodnotami oddělenými čárkami. Na konci věty je tzv. kontrolní součet, který slouží ke kontrole integrity přenášených dat uvozený znakem *. [3]

Zde je jako příklad uvedena věta typu \$GPGGA, která obsahuje základní informace o poloze a kvalitě GPS signálu [4]:



Obrázek 9 - Příklad NEMA věty (z webu MATLAB Help Center)

Užitečnou funkcí je také možnost připojit modul přímo k počítači pomocí TTL převodníku a ve speciálním programu u-center ověřit jeho funkčnost. Také je možné měnit nastavení, jako může být např. frekvence odesílání dat o poloze, aktivace či deaktivace některých NMEA vět, nebo přepnutí mezi různými GNSS systémy (např. GPS, Galileo, GLONASS), pokud to modul podporuje. To výrazně usnadňuje ladění systému a přizpůsobení GPS modulu konkrétním požadavkům zařízení, například snížení objemu přenášených dat nebo zvýšení frekvence aktualizace polohy.

Pro příjem a zpracování NMEA vět v mikroprocesoru byla využita knihovna TinyGPS++, která dokáže jednotlivé věty analyzovat a poskytuje uživateli přímý přístup k přijatým hodnotám jako je zeměpisná šířka, délka, rychlost, kurz či nadmořská výška bez nutnosti manuálního dělení NMEA řetězců. [5]

2.3 Kalibrace kompasu

Modul kompasu, který byl vybrán, nepřichází z výroby zkalibrován, proto po prvotním zapojení vycházejí nesmyslné hodnoty azimutu. Aby kompas správně fungoval, je potřeba provést základní kalibraci.

Měření může být ovlivněno zkreslením magneticky tvrdými a magneticky měkkými materiály. Zkreslení magneticky tvrdými materiály je konstantní a může ho způsobovat přítomnost různých feromagnetických materiálů v okolí senzoru nebo i přítomnost vodičů, kterými protékají větší proudy v okolí senzoru. Aby bylo zařízení schopné se dopočítat smysluplných hodnot, je toto zkreslení potřeba odstranit. Tento proces ale není složitý a lze ho provádět i v terénu. Je vhodné kompas zkalibrovat vždy po manipulaci s umístěním senzoru, například při odmontování a přimontování zařízení k přijímači.

Pro kalibraci je potřeba zařízení s magnetometrem otáčet v rozsahu 360° ve všech třech osách. Během tohoto procesu se zaznamenávají surové hodnoty síly magnetického pole. Poté je potřeba určit minimální a maximální hodnoty pro každou osu. Hodnota středu mezi těmito extrémy pak představuje kompenzační hodnotu, kterou je potřeba před zpracováním surových dat odečítat. Tímto lze dosáhnout relativně přesného měření azimutu. [6]

Kompenzační hodnoty se také ukládají do nevolatilní paměti zařízení, aby uživatel nemusel znovu provádět kalibraci při každém zapnutí, nebo například při případné ztrátě napájení vlivem ztráty kontaktu baterie při pohybu.

2.4 Ukládání dat

Ukládání dat do nevolatilní paměti zařízení ve vhodném formátu je jednou z důležitých funkcí, které usnadňují jak testování zařízení, tak i zpracování dat po závodu například pro tréninkové účely.

V integrované paměti flash je přiděleno asi 1,5 MB pro tzv. SPI Flash File Storage neboli SPIFFS. To umožňuje nahrávat textové či jiné soubory za běhu programu i pomocí vývojového prostředí. [7]

Zařízení do paměti ukládá tři druhy souborů, které jsou popsány v následujících oddílech.

2.4.1 Soubor s kompenzačními hodnotami pro kompas

Po každé úspěšné kalibraci kompasu má uživatel možnost hodnoty extrémů uložit do souboru *calibration.json* pro pozdější použití. Při zapnutí zařízení se z tohoto souboru tyto hodnoty vyčtou, a použijí se pro nastavení kompenzace kompasu. Obsah souboru může vypadat takto:

```
{
  "min": {
    "x": -694,
    "y": -542,
    "z": -459
```

```

    },
    "max": {
      "x": 343,
      "y": 532,
      "z": 525
    }
  }
}

```

Standard JSON byl zvolen pro jeho dobrou čitelnost a jednoduchost použití v programu s pomocí knihovny ArduinoJson.

2.4.2 Soubor waypoints[x].gpx

Do tohoto souboru jsou při stisku spouště ukládány body jednotlivých směrnic ke zvolenému vysílači x. Tento soubor slouží pro vizualizaci směrnic bez započítání odchylky kompasu a GPS.

Pro soubory s geografickými daty byl zvolen formát GPX. Je to formát pro ukládání zeměpisných souřadnic. Je možné ukládat body v mapě, tzv. waypoints a různé druhy tras. Tento formát je založený na formátu XML, který je jednoduchý na zpracování v programu. [8]

Hlavní výhodou je možnost soubor zobrazit v různých mapových aplikacích včetně Mapy.cz. Je možné tak přehledně vizualizovat data na mapovém podkladu jak při testování, tak například při rozboru postupu závodníka.

Do souboru se vždy ukládají směrnice jako trasy o dvou bodech. Bod A je bod, ze kterého bylo měření provedeno a bod B je bod vzdálený o nastavenou maximální vzdálenost vysílače směrem aktuálního azimutu při měření.

Samotný soubor může vypadat takto:

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<gpx xmlns="http://www.topografix.com/GPX/1/1" version="1.1" creator="ESP32">
  <trk>
    <trkseg>
      <trkpt lat="49.897587" lon="14.489058">
        <time>2025-04-14T17:51:03Z</time>
        <name>A</name>
      </trkpt>
      <trkpt lat="49.869247" lon="14.467793">
        <time>2025-04-14T17:51:03Z</time>
        <name>B</name>
      </trkpt>
    </trkseg>
  </trk>
  <trk>
    <trkseg>
      <trkpt lat="49.893543" lon="14.476468">

```

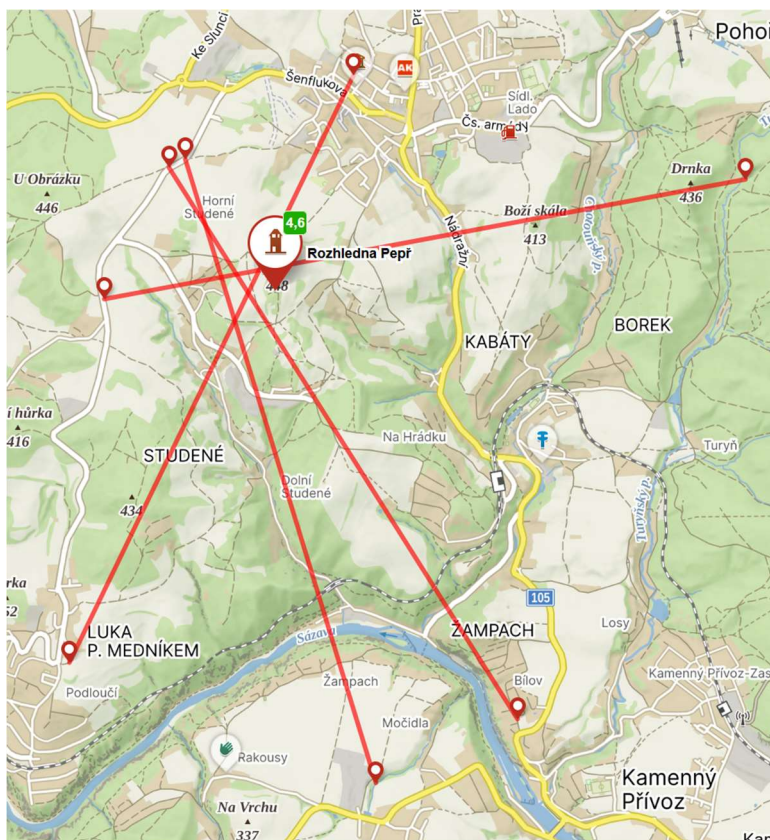
```

        <time>2025-04-14T17:58:22Z</time>
        <name>A</name>
    </trkpt>
    <trkpt lat="49.863438" lon="14.490745">
        <time>2025-04-14T17:58:22Z</time>
        <name>B</name>
    </trkpt>
</trkseg>
</trk>
<trk>
    <trkseg>
        <trkpt lat="49.893135" lon="14.475249">
            <time>2025-04-14T17:59:42Z</time>
            <name>A</name>
        </trkpt>
        <trkpt lat="49.866520" lon="14.501344">
            <time>2025-04-14T17:59:42Z</time>
            <name>B</name>
        </trkpt>
    </trkseg>
</trk>
<trk>
    <trkseg>
        <trkpt lat="49.886787" lon="14.470391">
            <time>2025-04-14T18:01:35Z</time>
            <name>A</name>
        </trkpt>
        <trkpt lat="49.892567" lon="14.518414">
            <time>2025-04-14T18:01:35Z</time>
            <name>B</name>
        </trkpt>
    </trkseg>
</trk>
</gpx>

```

Soubor obsahuje čtyři záznamy směrnic, které je pro správné zobrazení pomocí GPX souboru definovat jako trasy *<trk>*. Každá z nich zahrnuje jeden úsek *<trkseg>* složený ze dvou bodů *<trkpt>*. Každý bod je definován zeměpisnou šířkou a délkou, časem pořízení *<time>* a označením *<name>*.

Po načtení souboru do mapy.cz vypadají směrnice takto:



Obrázek 10 - waypoints.gpx v Mapy.cz

Tento soubor je součástí i testovacího měření, které je popsáno v oddíle 2.7.

2.4.3 Soubor polygons[x].gpx

Do tohoto souboru jsou ukládány souřadnice mnohoúhelníků, které postupně vznikají. Soubor také používá formát GPX, je ho tedy také možné načíst do Mapy.cz a data tak vizualizovat. Na rozdíl od souboru *waypoints.gpx* si z tohoto souboru program průběžně data i načítá. Program si při výpočtu nového mnohoúhelníku vždy načte ten předešlý, tedy ten s nejvyšším číslem v názvu, místo toho, aby použil ten uložený ve volatilní paměti. Cílem je zabránit stavu, kdy se, např. po ztrátě napětí, volatilní paměť vymaže a program začne výpočet mnohoúhelníků od začátku, místo toho, aby počítal s již existujícími mnohoúhelníky.

Samotný soubor může vypadat takto:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<gpx xmlns="http://www.topografix.com/GPX/1/1" version="1.1"
creator="ESP32">
  <trk>
    <name>1</name>
    <trkseg>
      <trkpt lat="49.897575" lon="14.489089"/>
```

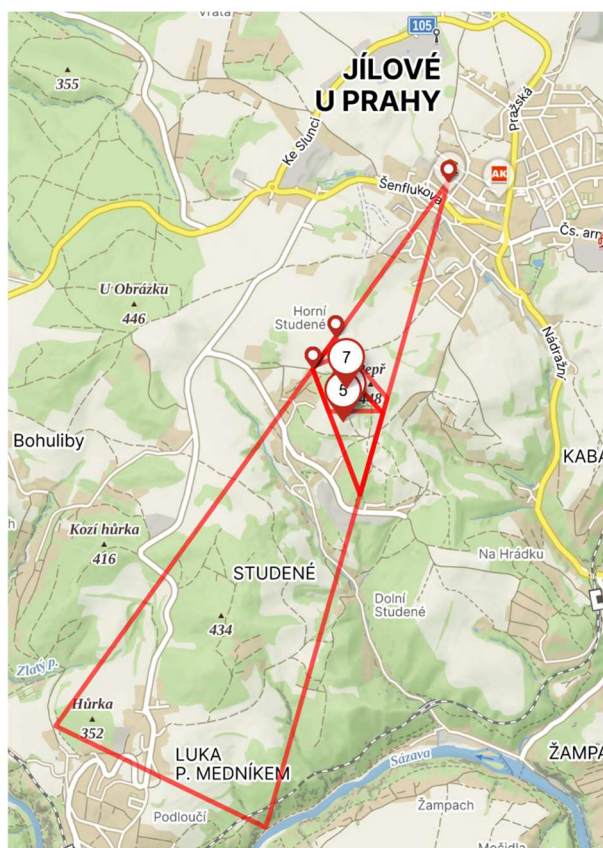
```

        <trkpt lat="49.867287" lon="14.475780"/>
        <trkpt lat="49.872063" lon="14.460448"/>
        <trkpt lat="49.897594" lon="14.489027"/>
        <trkpt lat="49.897575" lon="14.489089"/>
    </trkseg>
</trk>
<trk>
    <name>2</name>
    <trkseg>
        <trkpt lat="49.890289" lon="14.480852"/>
        <trkpt lat="49.887455" lon="14.484642"/>
        <trkpt lat="49.882938" lon="14.482656"/>
        <trkpt lat="49.888821" lon="14.479204"/>
        <trkpt lat="49.890289" lon="14.480852"/>
    </trkseg>
</trk>
<wpt lat="49.886612" lon="14.481754">
    <name>2</name>
</wpt>
<trk>
    <name>3</name>
    <trkseg>
        <trkpt lat="49.888817" lon="14.479203"/>
        <trkpt lat="49.889675" lon="14.480165"/>
        <trkpt lat="49.886734" lon="14.484324"/>
        <trkpt lat="49.882938" lon="14.482655"/>
        <trkpt lat="49.888817" lon="14.479203"/>
    </trkseg>
</trk>
<wpt lat="49.886307" lon="14.481410">
    <name>3</name>
</wpt>
<trk>
    <name>4</name>
    <trkseg>
        <trkpt lat="49.888821" lon="14.479203"/>
        <trkpt lat="49.888988" lon="14.479393"/>
        <trkpt lat="49.889305" lon="14.480692"/>
        <trkpt lat="49.886856" lon="14.484148"/>
        <trkpt lat="49.886829" lon="14.480371"/>
        <trkpt lat="49.888821" lon="14.479203"/>
    </trkseg>
</trk>
<wpt lat="49.887840" lon="14.481676">
    <name>4</name>
</wpt>
</gpx>

```

V tomto souboru můžeme kromě značek, které byly již popsány v předešlém oddíle, navíc nalézt i body v mapě `<wpt>` které značí střed úsečky mezi nejbližšími body předchozího mnohoúhelníku, tedy souřadnice místa, kam je závodníka potřeba navigovat. Tyto souřadnice se na začátku programu načtou do paměti a jedno z vláken je pak používá k výpočtu vzdálenosti a směru.

Po načtení souboru do mapy.cz vypadají směrnice takto:



Obrázek 11 - polygons.gpx v Mapy.cz

Na obrázku jsou vidět postupně se zmenšující mnohoúhelníky. Tento soubor je součástí testovacího měření, které je podrobněji popsáno v oddíle 2.7.

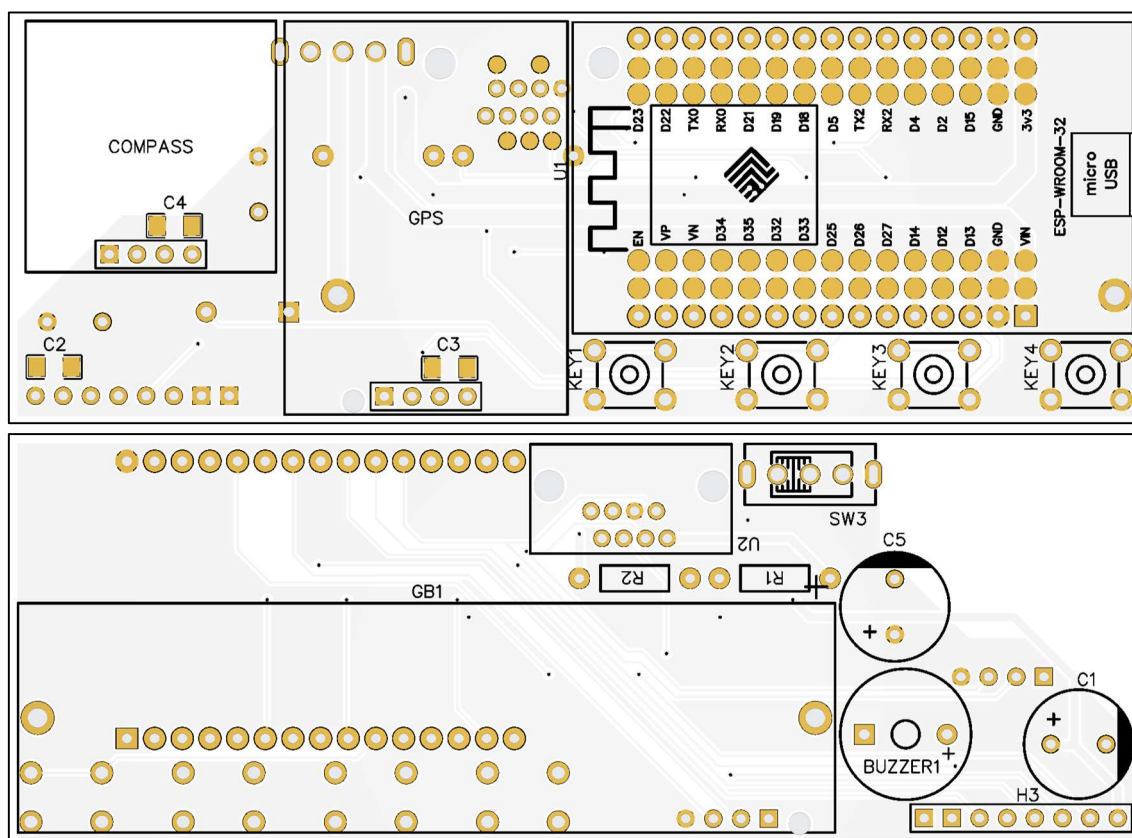
Soubory se v souborovém systému vytváří automaticky podle potřeby. Obsah všech souborů se ve funkci `setup()` vždy vypíše do konzole, aby bylo možné je převést do počítače. Je také možné soubory podle potřeby vymazat v uživatelském rozhraní zařízení.

2.5 Návrh DPS

Navržená deska plošných spojů slouží převážně jako propojovací deska mezi jednotlivými moduly. Jejím cílem je zjednodušit zapojení a zvýšit mechanickou odolnost celku. Integruje také základní podpůrné komponenty, jako jsou kondenzátory pro vyhlazení zvlnění napájecí větve a odstranění šumu.

Dále se na desce také nachází držák článku 18650 (označený GB1), jehož napětí je sledováno pomocí AD převodníku mikrokontroleru přes odporový dělič (R1, R2). Baterii je možné odpojit pomocí spínače (SW3).

Deska je osazena konektorem RJ45 (U2), na který jsou vyvedeny signály potřebné pro komunikaci přes I²C, vstup pro tři tlačítka, vodič přímo vedoucí k baterii (pro případné připojení nabíječky) a v neposlední řadě větev 3,3V a GND.



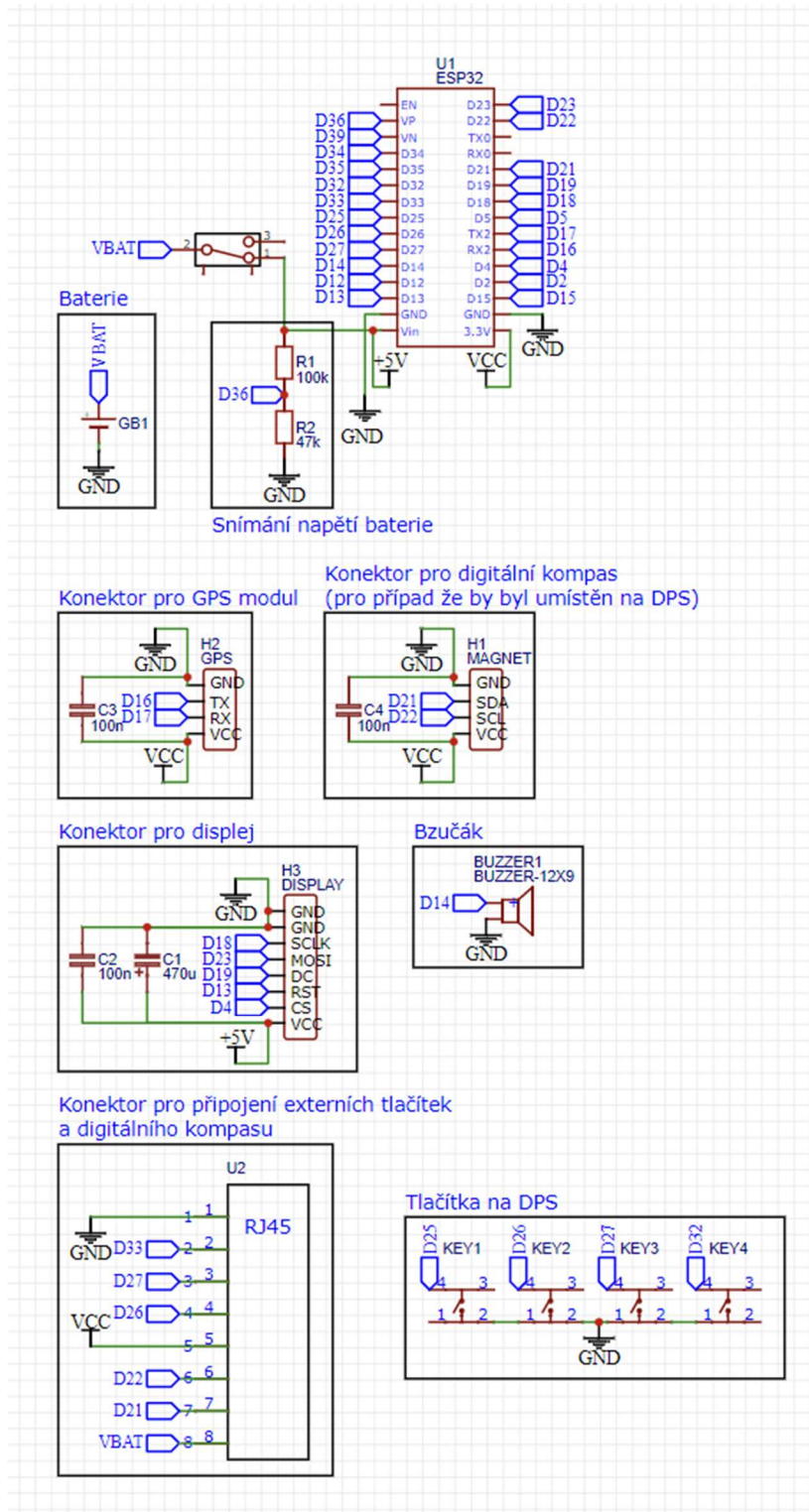
Obrázek 12 - Návrh DPS

Původně bylo zamýšleno, že modul kompasu bude umístěn přímo na navržené propojovací desce v místě označeném *COMPASS*. Během testování se však ukázalo, že v této konfiguraci vykazoval nepřesné a nestabilní hodnoty směru, pravděpodobně v důsledku rušení způsobeného blízkostí kondenzátorů a dalších součástek.

S touto možností bylo při návrhu zařízení do určité míry počítáno již v průběhu vývoje. Z tohoto důvodu jsou signály sběrnice I²C vyvedeny na konektor, který umožňuje umístit magnetometr na vhodnější místo mimo hlavní DPS, kde nebude vystaven elektromagnetickému rušení. Stejný konektor zároveň slouží i pro připojení tlačítka spouště, které tak může být umístěno v lepším dosahu uživatele, například na ergonomicky výhodném místě při držení zařízení v ruce.

Zajímavostí návrhu je, že pro každý konektor vývojového modulu s ESP32 byl na DPS vyvedena také pájecí ploška, která umožňuje v případě potřeby připojit různé vodiče. Toto

poskytuje možnost přístupu k signálům, například pro účely ladění, připojení měřicích přístrojů nebo jako pojistka pro případ, že by se vyskytla nějaká chyba, kterou by bylo nutné operativně obejít.



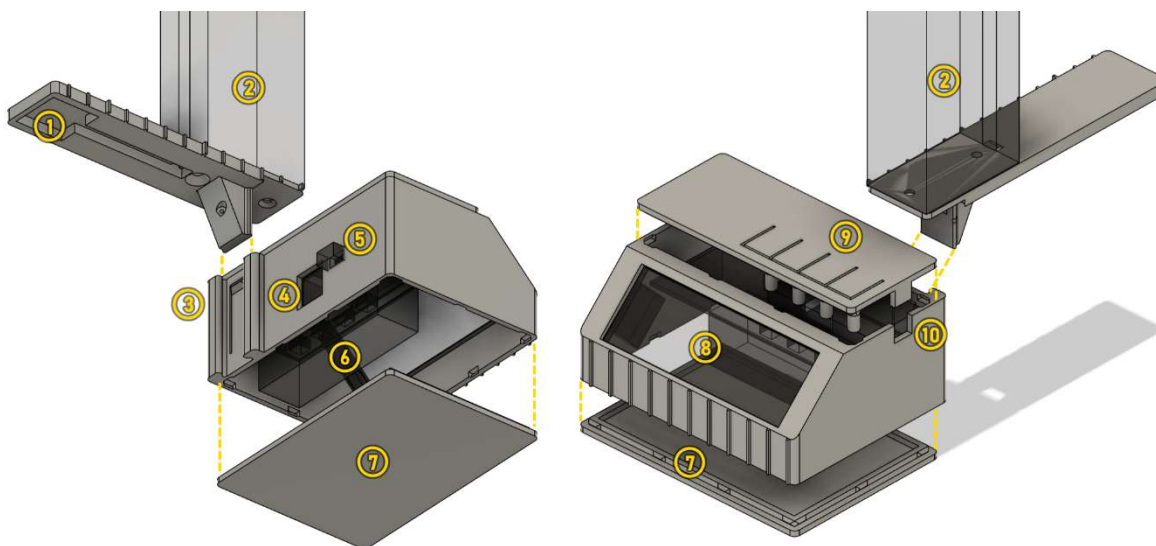
Obrázek 13 - Schéma zapojení

Tabulka 1 - Využití GPIO pinů u ESP32

GPIO	Využití
4	Výběrový signál SPI sběrnice pro displej
13	Resetovací signál SPI sběrnice pro displej
14	Signál pro bzučák
16	Sériový datový výstup z GPS modulu
17	Sériový datový vstup do GPS modulu.
18	Hodinový signál SPI sběrnice pro displej
19	Řídicí signál SPI sběrnice data/příkaz pro displej
21	Datový signál I ² C sběrnice pro digitální kompas
22	Hodinový signál I ² C sběrnice pro digitální kompas
23	Datový signál SPI sběrnice pro displej
25	Signál tlačítka 1
26	Signál tlačítka 2
27	Signál tlačítka 3
32	Signál tlačítka 4
33	Signál tlačítka „spoušť“
36	Snímání napětí baterie (ADC1 kanál 0)

2.6 Návrh pouzdra zařízení

Při návrhu pouzdra zařízení bylo cílem vytvořit konstrukci optimalizovanou pro výrobu metodou FDM na 3D tiskárně. Důraz byl kladen na ergonomii při používání, snadnou montáž a demontáž a zajištění přístupu k důležitým komponentům. Konstrukce krabičky umožňuje jednoduchou výměnu baterie a připojení zařízení k PC.



Obrázek 14 - Model pouzdra zařízení

Pouzdro se skládá ze dvou hlavních částí – pravítka a pouzdra ostatní elektroniky, které jsou vzájemně mechanicky propojeny pomocí kolejničky (3).

K pravítku je trvale připevněn modul kompasu na místě označeném v obrázku číslem 1. Rádiový přijímač (2) je uchycen pomocí šroubů, což zajišťuje stabilní spojení kompasu s přijímačem. Tímto řešením se minimalizuje riziko posunu kompasu vůči přijímači, například vlivem otřesů, a tím i vzniku dalších odchylek v měření.

Signály I²C z kompasu a signály z tlačítek (ta jsou zobrazena až na následujícím obrázku) jsou přenášeny prostřednictvím kabelu, který je připojen do konektoru RJ45. Otvor pro konektor je na obrázku označen číslem 4.

Pouzdro pro další elektroniku je navrženo s horním krytem, pod kterým je umístěn mikroprocesor a GPS modul. Tento kryt je vybaven výřezy, které slouží jako ovládací prvky tlačítek. Každý z těchto výřezů má ve spodní části vestavěnou tyčku, která při stisknutí přenáší tlak na tlačítka umístěná na DPS. Výřezy sloužící pro ovládání tlačítek jsou na obrázku označeny číslem 9.

Za spodním krytem (7) je umístěna baterie (6), kterou lze odpojit pomocí spínače (5). Hlavní pouzdro je dále opatřeno otvorem pro displej (8) a otvorem pro připojení kabelu k počítači (10).

Kryty i jednotlivé části jsou aretovány pomocí plastových výstupků, které zapadají do odpovídajících drážek, což zajišťuje stabilní uchycení bez nutnosti použití nástrojů. Pravítko je možné ještě dodatečně zajistit šroubem.

Výhodou tohoto vícedílného designu je jeho dobrá skladnost a možnost snadno odpojit ostatní elektroniku a používat přijímač samostatně pouze s pravítkem.



Obrázek 15 - Sestavené zařízení

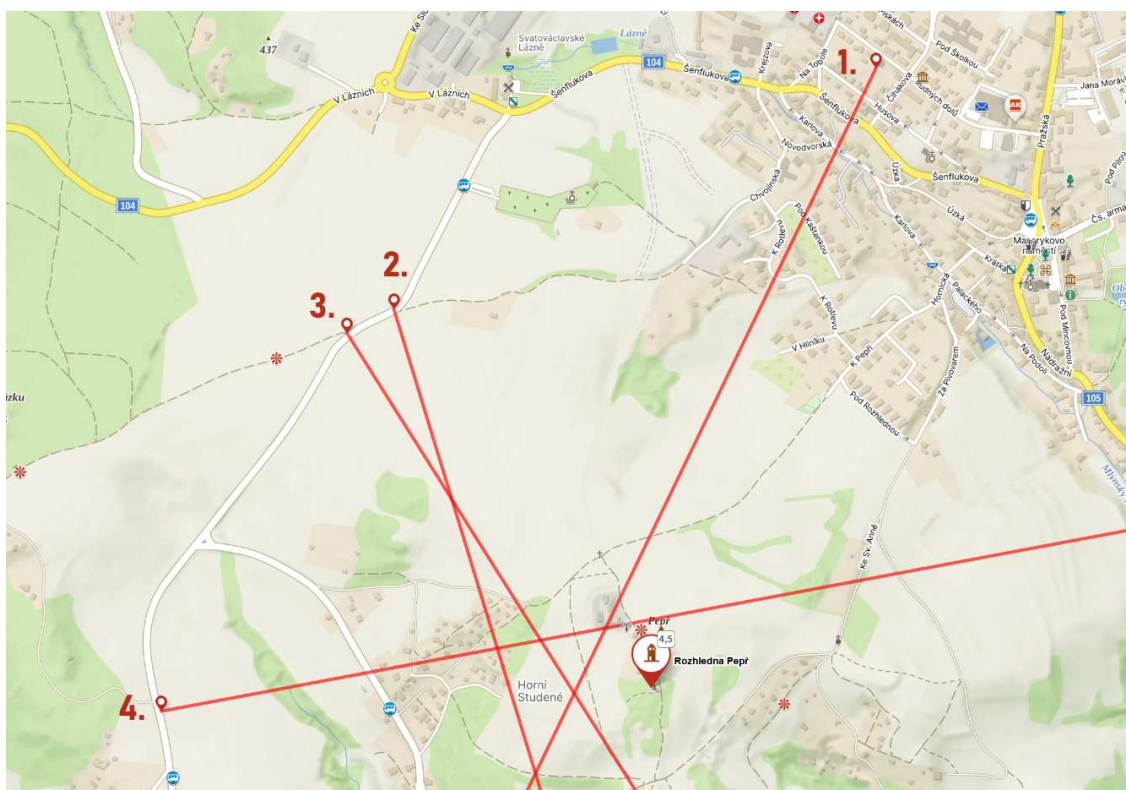


Obrázek 16 - Sestavené zařízení ze spodu

2.7 Testování při vývoji

Pro účely testování zařízení nebyl využit skutečný rádiový vysílač, nýbrž statický a z dálky dobře viditelný bod v terénu, který sloužil jako referenční cíl. Toto řešení bylo zvoleno z praktických důvodů. Umožnilo provádět opakovaná měření bez nutnosti nastavování vysílače, který navíc nebyl v dané fázi vývoje k dispozici. Zároveň tímto způsobem došlo ke snížení vlivu nepřesností rádiového přijímače. Bylo tedy možné lépe vyhodnotit funkčnost samotného principu lokalizace.

Jako referenční bod byla využita rozhledna Pepr, která je z míst měření dobře viditelná. Díky své výšce a jednoznačné poloze v terénu poskytuje spolehlivý cíl.



Obrázek 17 - Směrnice ze souboru waypoints.gpx

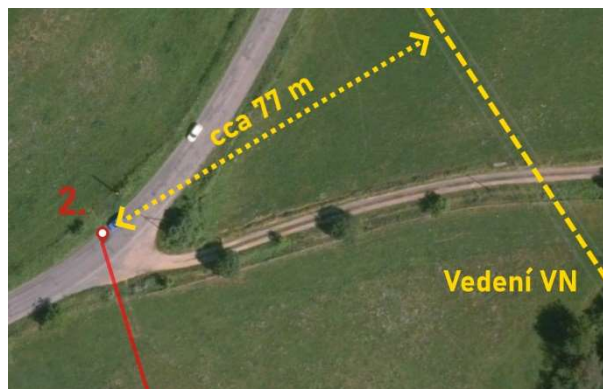
Celkem byla provedena čtyři měření z různých míst. Zařízení bylo namířeno přibližně směrem k rozhledně Pepr. Úhel natočení byl určen „od oka“, což postačuje to pro základní ověření funkčnosti zařízení.

V následující tabulce jsou uvedené odchylky od skutečného cíle při jednotlivých měřeních:

Tabulka 2 - Odchylky od skutečného cíle při testovacím měření

Číslo měření	Odchylka
1	6°
2	16°
3	8°
4	7°

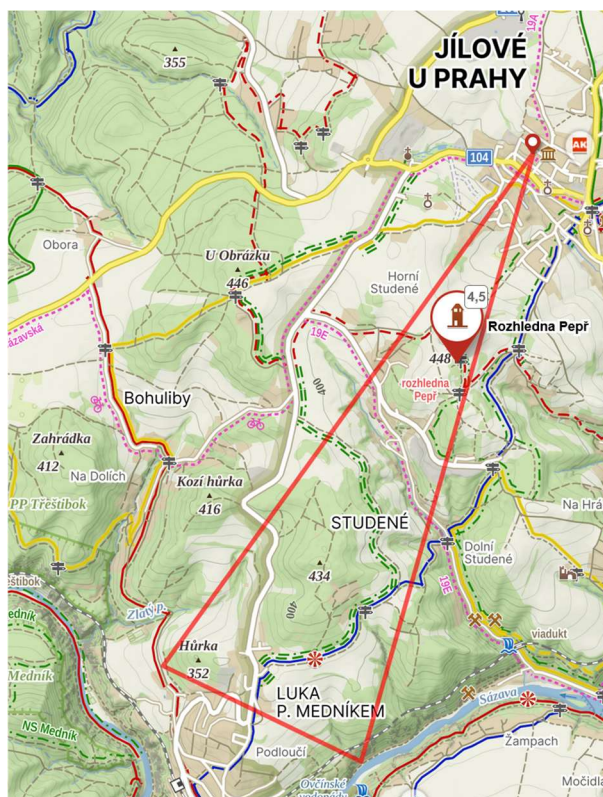
Odchytky při měření mohly být způsobeny kombinací nepřesností magnetometru a zjednodušenou metodou zaměřování cíle „od oka“. Výjimečně vysokou odchylku u 2. měření pravděpodobně způsobil výskyt vedení VN, které se nacházelo příliš blízko místu měření.



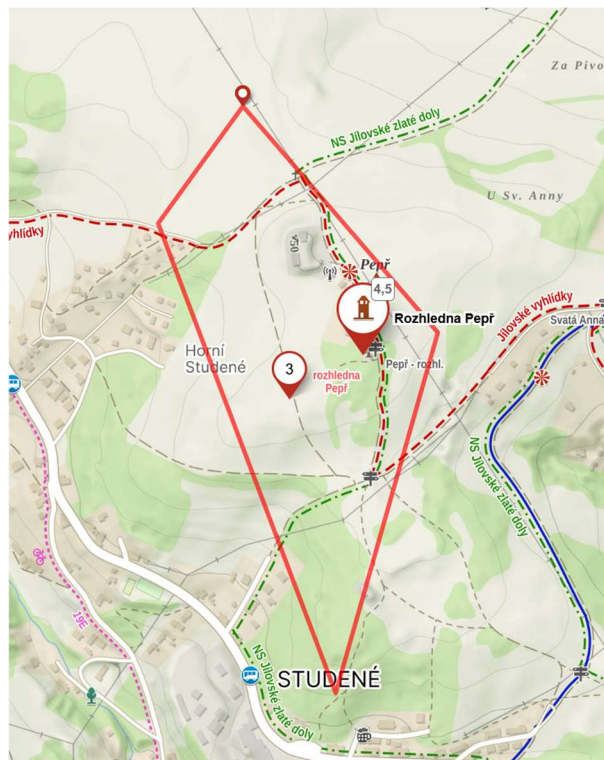
Obrázek 18 - výskyt vedení VN v blízkosti místa měření

Výpočet čtyřúhelníků byl prováděn s nastavenou odchylkou kompasu $\pm 10^\circ$ a maximální vzdálenosti k cíli 3500 m.

Následující obrázky zobrazují postupně se zmenšující mnohoúhelníky reprezentující oblast možného výskytu cíle s každým dalším měřením.

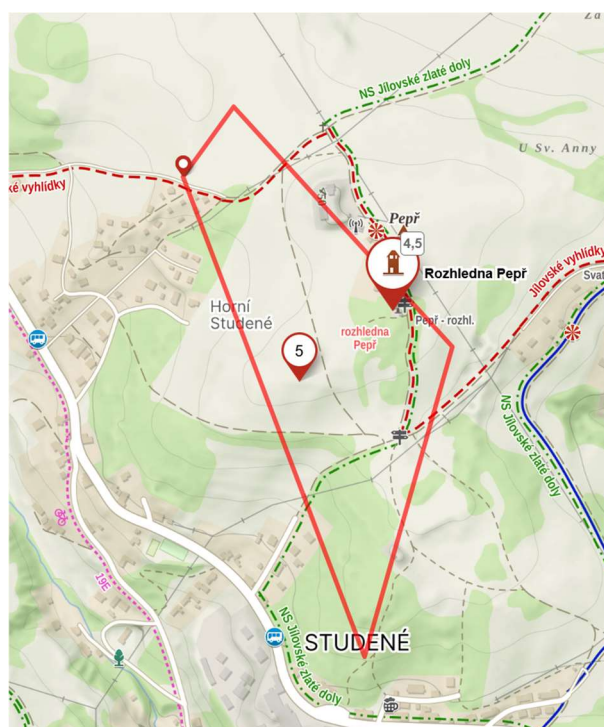


Obrázek 19 - Oblast po 1. měření



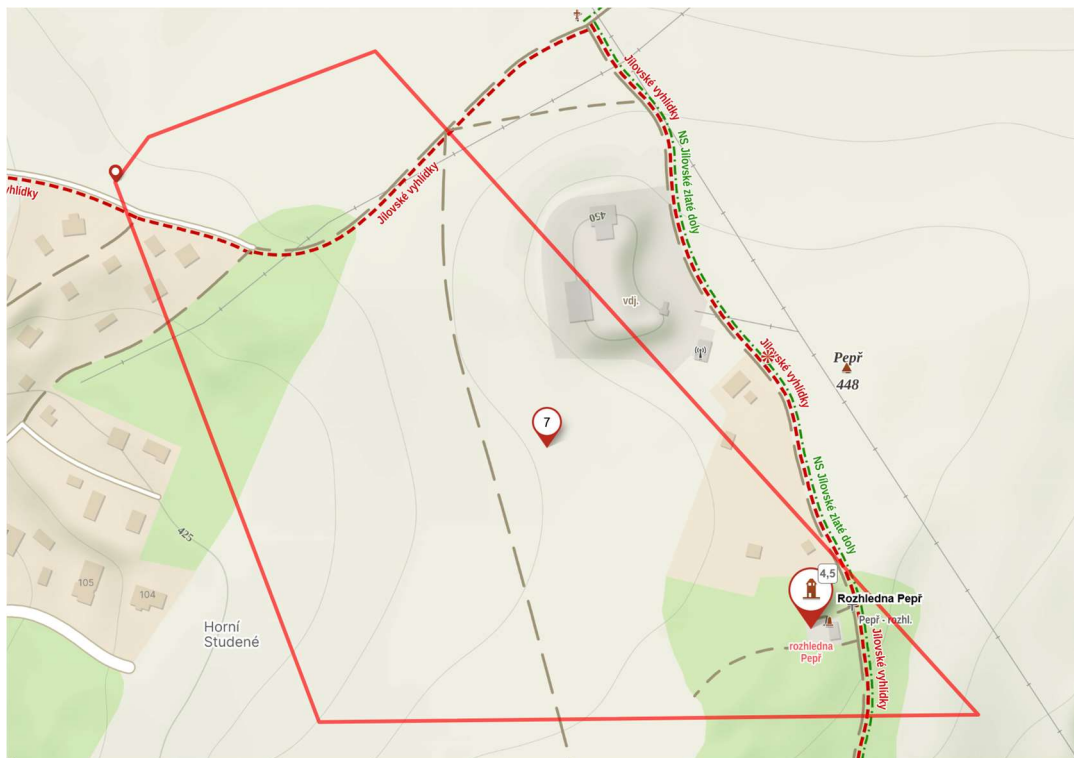
Obrázek 20 - Oblast po 2. měření

Už po druhém, byť nepřesném měření, je zařízení schopno navigovat uživatele k vypočítanému cíli, který je označen bodem 3 a od skutečného cíle je vzdálen přibližně 122 m.



Obrázek 21 - Oblast po 3. měření

Po třetím měření došlo k nepatrnému zmenšení výsledné oblasti, nicméně vlivem použitého algoritmu, který určuje bod pro navigaci jako střed úsečky mezi dvěma nejvzdálenějšími body polygonu, se tento bod, označený číslem 5, posunul dále od skutečné polohy cíle na vzdálenost přibližně 159 metrů.



Obrázek 22 - Oblast po 4. měření

Po čtvrtém, tedy posledním testovacím měření se výsledná oblast výrazně zmenšila. Úsečka mezi nejvzdálenějšími body mnohoúhelníku měří asi 416 m a její střed, označený bodem 7, je od skutečného cíle vzdálen asi 132 m.

Algoritmus se tedy prokázal jako funkční, skutečný cíl se nachází v oblasti možného výskytu.

2.8 Testování se skutečným vysílačem

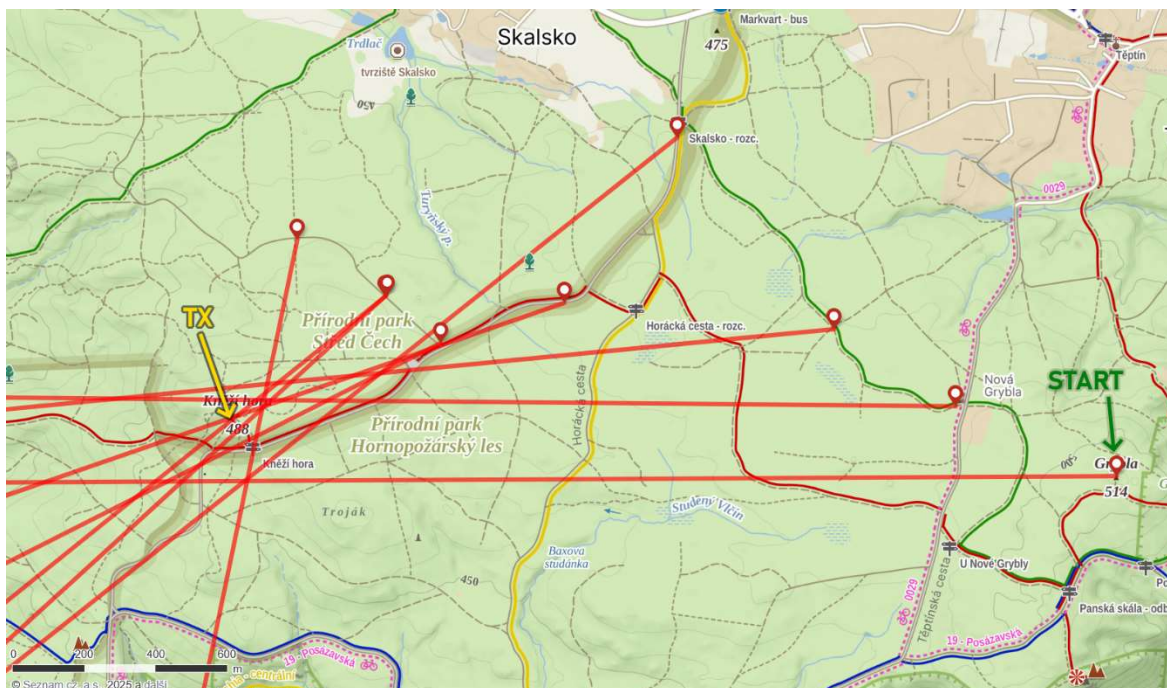
Zařízení bylo testováno i se skutečným vysílačem. Jelikož se zrovna nekonal žádný závod, kde by bylo možné zařízení vyzkoušet v reálných podmínkách, byl zapůjčen jeden vysílač pro pásmo 80 m, který byl umístěn v lese a opakovaně zaměřován.

Cílem testu bylo ověřit, jak zařízení funguje v reálnější situaci, kdy měření neovlivňuje odchylka metody odhadování cíle „od oka“, ale může být přítomna odchylka měření s přijímačem. Také bylo potřeba otestovat, jestli blízkost přijímače a modulu kompasu neovlivňuje měření.

Běžně používané vysílače v pásmu 80 m pro rádiový orientační běh využívají vertikální drátové antény se zářičem o délce 8 m a jednou protiváhou z drátu stejné délky. Tato anténa

je nejprve zavěšena pomocí lanka na dostatečně vysoký strom nebo laminátový prut a následně je doladěna pomocí automatického nebo manuálního anténního tuneru.

Vysílač byl nakonfigurován na trvalý provoz, aby bylo testování jednodušší a nebylo nutné vždy čekat na zahájení relace.



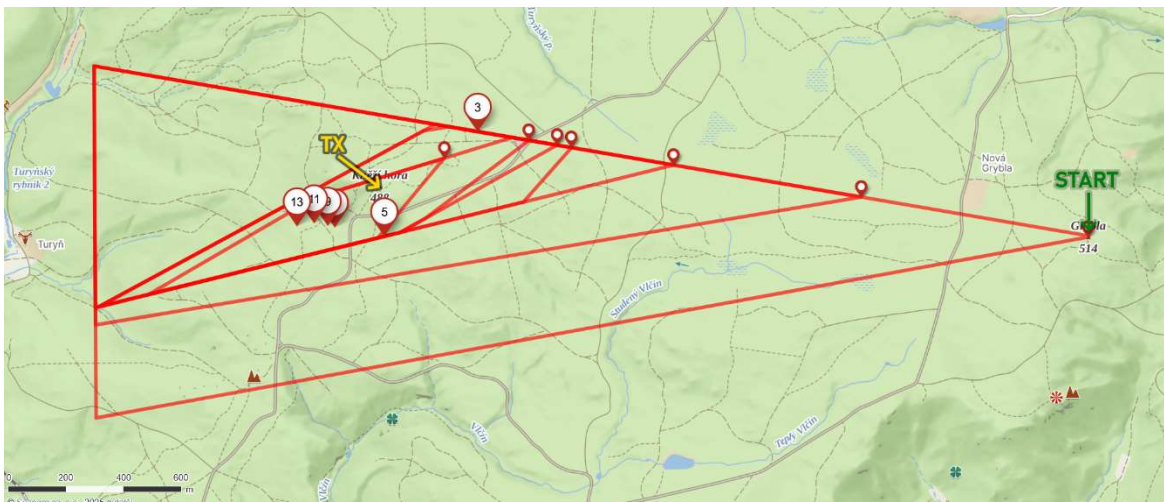
Obrázek 23 - Směrnice ze souboru waypoints.gpx

Měření bylo zahájeno z místa označeného jako "START", které bylo od skutečné pozice zaměřovaného vysílače (označeného jako "TX") vzdálené přibližně 2,5 km.

Na obrázku jsou znázorněny červené „špendlíky“, které představují body, ze kterých byl vysílač zaměřován. Červené čáry pak znázorňují směrnice, tedy zdánlivé směry k vysílači, které zařízení postupně ukládalo do souboru. Měření byla provedena z více míst ve vzájemných vzdálenostech od 160 do 700 m, aby bylo simulováno rozložení měřicích bodů při reálných závodech.

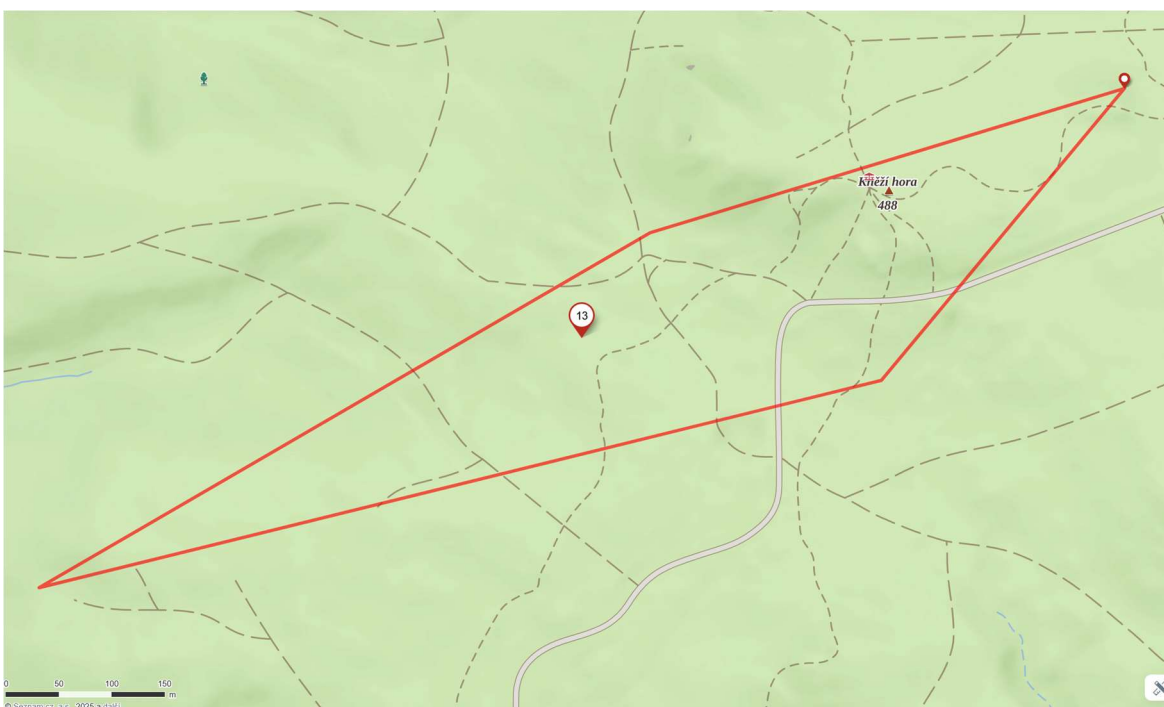
V okolí skutečné polohy přijímače lze pozorovat množství průsečíků. Nejvzdálenější z nich jsou od sebe vzdálené více než 1,1 km.

Zařízení postupně zpracovávalo data a na obrazovce byly zobrazovány informace o vzdálenosti a směru k vypočítanému cíli.



Obrázek 24 - Mnohoúhelníky ze souboru polygons.gpx

Na tomto obrázku jsou vidět obrysy postupně se zmenšujících mnohoúhelníků. „Špendlíky“ s čísly pak představují body, do kterých byl uživatel průběžně navigován. Poslední z mnohoúhelníků je zobrazen samostatně v následujícím obrázku.



Obrázek 25 - Poslední mnohoúhelník ze souboru polygons.gpx

Na obrázku je vidět obrys posledního a nejmenšího mnohoúhelníku. Skutečný cíl nacházel na vrcholu Kněží hory a od bodu kam byl uživatel navigován je vzdálený asi 320 m. Skutečný cíl se nachází uvnitř mnohoúhelníku, který představuje oblast možného výskytu.

Zařízení dovedlo uživatele dostatečně blízko k vysílači, aby nyní mohl pokračovat v jeho lokalizaci přímo pomocí přijímače. Pokud by však uživatel pokračoval v používání zařízení k zaměřování, oblast možného umístění vysílače by se dále zmenšovala.

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a sestavit zařízení pro lokalizaci skrytých vysílačů, které by usnadnilo zaměřování při rádiovém orientačním běhu.

Na základě provedených testů lze konstatovat, že navržené zařízení splňuje stanovené požadavky a dokáže zaznamenávat polohu uživatele, určovat vzdálenost a azimut k vysílači a zobrazovat tyto informace na displeji. Implementovaný algoritmus zohledňuje odchylky kompasu, měření a GPS, čímž umožňuje přesnější odhad polohy vysílače.

Konstrukční i elektrické řešení se prokázalo jako funkční, což potvrzují i výsledky testování, které jsou doplněny analýzou a grafickým znázorněním v mapě.

Zařízení by však mohlo být dále optimalizováno např. zmenšením na jednotnou DPS namísto současného řešení složeného z modulů. Funkčnost zařízení by bylo možné dále rozšířit například o zaznamenávání konkrétní trasy závodníka pro následnou analýzu, měření jeho času nebo i o možnost vyčítat data a měnit nastavení prostřednictvím Bluetooth či WiFi, které ESP32 rovněž podporuje.

Literatura

- [1] *Polygon Clipping | Sutherland–Hodgman Algorithm*. Online. GeeksforGeeks. 2024. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/polygon-clipping-sutherland-hodgman-algorithm/>. [cit. 2025-04-16].
- [2] OLIKRAUS. *U8g2: Library for monochrome displays, version 2*. Online. In: GitHub. 2025. Dostupné z: <https://github.com/olikraus/u8g2/wiki>. [cit. 2025-04-16].
- [3] NATIONAL MARINE ELECTRONICS ASSOCIATION. *National Marine Electronics Association (NMEA) - Marine Electronics Standards, Training*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.nmea.org/nmea-0183.html>. [cit. 2025-04-16].
- [4] *MATLAB Help Center*. Online. 2025. Dostupné z: https://ch.mathworks.com/help/simulink/supportpkg/arduino_ref/read-serial-data-from-a-gps-shield-using-arduino-hardware.html. [cit. 2025-04-16].
- [5] HART, Mikel. *TinyGPSPlus*. Online. In: GitHub. 2019. Dostupné z: <https://github.com/mikalhart/TinyGPSPlus>. [cit. 2025-04-16].
- [6] THE MATHWORKS, INC. *Magnetometer Calibration*. Online. Nenalezený vydavatel. 2025. Dostupné z: <https://ch.mathworks.com/help/fusion/ug/magnetometer-calibration.html>. [cit. 2025-04-17].
- [7] FYZKAB. *Kam se soubory? Aneb SPIFFS v ESP32*. Online. Fyzikální kabinet FyzKAB. Dostupné z: http://kabinet.fyzika.net/ESP32/ESP32-SPIFFS/SPIFFS_v_ESP32.php. [cit. 2025-04-17].
- [8] *GPX*. Online. OpenStreetMap Wiki. 2025. Dostupné z: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/GPX>. [cit. 2025-04-17].

Příloha A – Zdrojový kód zařízení

Příloha je součástí elektronické verze této práce

Příloha B - Gerber soubory pro výrobu DPS

Příloha je součástí elektronické verze této práce