



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOTELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ POLOHY UVNITŘ BUDOV POMOCÍ INERCIÁLNÍ JEDNOTKY

INDOOR POSITIONING BASED ON INERCIAL MEASUREMENT UNIT

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Coufal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Král, Ph.D.

BRNO 2023



Semestrální práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Marek Coufal

ID: 240598

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

BP(K)C-SEP: Seznamte se s dostupnými jednotkami pro měření inerciální polohy. Navrhněte a realizujte vhodný hardware samostatně bezdrátové jednotky, která bude umět zaznamenávat interně své údaje do paměti a na konci měření tato data přenést do počítače.

BP(K)C-BAP: Realizujte ovládací SW a FW a skripty v Matlabu nebo Pythonu pro určení polohy uvnitř budov. Funkci demonstrejte. Všechny programy realizujte tak, aby byly vhodné a použitelné v rámci laboratorní úlohy předmětu MPC-RAR. Navrhněte koncept této laboratorní úlohy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MALÝ, Martin. Hradla, volty, jednočipy: Úvod do bastlení. Praha: CZ.NIC, 2017. ISBN 978-80-88168-26-3.
- [2] RITCHIE, Dennis M., KERNIGHAN, Brian W. The C Programming Language, Second Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1988. ISBN 9780133086249.

Termín zadání: 22.9.2023

Termín odevzdání: 2.1.2024

Vedoucí práce: Ing. Jan Král, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Abstrakt práce v originálním jazyce

KLÍČOVÁ SLOVA

Klíčová slova v originálním jazyce

ABSTRACT

Překlad abstraktu (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

KEYWORDS

Překlad klíčových slov (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

ROZŠÍŘENÝ ABSTRAKT

Výtah ze směrnice rektora 72/2017:

Bakalářská a diplomová práce předložená v angličtině musí obsahovat rozšířený abstrakt v češtině nebo slovenštině (čl. 15). To se netýká studentů, kteří studují studijní program akreditovaný v angličtině. (čl. 3, par. 7)

Nebude-li vnitřní normou stanoveno jinak, doporučuje se rozšířený abstrakt o rozsahu přibližně 3 normostrany, který bude obsahovat úvod, popis řešení a shrnutí a zhodnocení výsledků. (čl. 15, par. 5)

COUFAL, Marek. *Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky*. Semestrální práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2024. Vedoucí práce: Ing. Jan Král, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Marek Coufal

VUT ID autora: 240598

Typ práce: Semestrální práce

Akademický rok: 2023/24

Téma závěrečné práce: Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky

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

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

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské/diplomové/disertační práce panu Ing. XXX YYY, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	13
Cíle práce	14
1 Teoretická část studentské práce	15
1.1 Využití inerciální navigace	15
1.2 Princip fungování inerciální navigace	15
1.2.1 Zavedení vztažných soustav	16
1.3 Vztažné soustavy a rotace Země	16
1.4 Tíhové pole Země	17
1.4.1 Gravitační modely Země	18
1.5 Rotace měření akcelerometru	18
2 Výsledky studentské práce	21
2.1 Hardware inerciální jednotky	21
2.1.1 Akcelerometr a gyroskop	22
2.1.2 Magnetometr	24
2.1.3 GNSS	24
2.1.4 Paměť	25
2.1.5 Uživatelské rozhraní	26
2.1.6 Napájení	26
2.1.7 Hlavní procesor	28
2.1.8 ESP32	28
2.2 Realizace hardwaru	29
Závěr	31
Literatura	32
Seznam symbolů a zkratek	35
Seznam příloh	36
A Schéma zapojení inerciální jednotky	37
B Pohled osazení součástek	44
C Vrchní vrstva mědi DPS	45
D Vnitřní vrstva mědi DPS In1	46

E Vnitřní vrstva mědi DPS In2 **47**

F Spodní vrstva mědi DPS **48**

Seznam obrázků

1.1	Výškový reliéf geoidu. Zdroj: [1]	19
1.2	Blokové schéma algoritmu strapdown inerciální navigace, převzato z [6] [7]	20
2.1	Blokové schéma inerciální jednotky	21
2.2	Fotografie grafického OLED displeje	26
2.3	3D model navržené DPS	29

Seznam tabulek

2.1	Porovnání základních parametrů gyroskopů [16] [17]	23
2.2	Podporované družicové systémy [13]	25
2.3	Odhad celkového bitratu pro záznam dat	25
2.4	Odhad spotřeby proudu 3,3V větve	27
2.5	Minimální požadavky na periferie mikroprocesoru	28
2.6	Uspořádání vrstev na DPS	30

Seznam výpisů

Úvod

Úvod studentské práce, např ...

Nečíslovaná kapitola Úvod obsahuje „seznámení“ čtenáře s problematikou práce. Typicky se zde uvádí: (a) do jaké tematické oblasti práce spadá, (b) co jsou hlavní cíle celé práce a (c) jakým způsobem jich bylo dosaženo. Úvod zpravidla nepřesahuje jednu stranu. Poslední odstavec Úvodu standardně představuje základní strukturu celého dokumentu.

¹

Šablona je nastavena na *dvostranný tisk*. Nebudte překvapeni, že ve vzniklé PDF jsou volné stránky. Je to proto, aby důležité stránky jako např. začátky kapiol začínaly po vytisknutí a svázání vždy na pravé straně. Pokud máte nějaký závažný důvod sázet (a zejména tisknout) jednostranně, nezapomeňte si přepnout volbu **twoside** na **oneside**!

¹Tato věta je pouze ukázkou použití příkazů pro sazbu zkratek.

Cíle práce

Konkrétní specifikace cílů, které má autor v práci vyřešit. Tato kapitola je *volitelná* – pokud váš studijní program nevyžaduje zvláštní kapitolu s cíli, cíle specifikujte v rámci Úvodu.

1 Teoretická část studentské práce

1.1 Využití inerciální navigace

Možnost navigace a znalost polohy je pro lidstvo již dlouhou dobu důležitá jak v průmyslu, tak i v každodenním životě. Pravděpodobně nejrozšířenějším druhem navigace jsou tzv. globální navaigacní systémy, například GPS. Ovšem pro některé aplikace nemusí být použití GNSS, ať už z politických, či technických důvodů ideální. Pro navigaci v oblasti letectví a námořnictví se začala inerciální navigace využívat kolem roku 1960 a je stále využívána dodnes. [6]

Díky stále přesnějším a levnějším inerciálním senzorům se rozšiřují možnosti využití inerciální navigace i do běžných průmyslových aplikacích, například v oblastech robotiky, automobilové techniky, nebo i pro údržbu podzemních infrastruktur, mapování kanalizací a další. [6] Tato práce se zabývá využitím inerciální navigace pro účely určení polohy uvnitř budov, kde je pokrytí signálem globálních navaigacních systémů velmi slabé, nebo žádné.

1.2 Princip fungování inerciální navigace

Inerciální navaigacní systémy pracují na principu nepřímého měření z dat, které poskytuje akcelerometr a gyroskop. Akcelerometry poskytují informaci o lineárním zrychlení v prostoru pomocí měření síly F na definovanou jednotku hmotnosti m a pomocí 2. Newtonova zákona určí zrychlení a [6]

$$a = \frac{F}{m} \quad (1.1)$$

Síla F představuje síly působící na senzor vůči jeho tělu ve volném pádu, skládá se tedy ze statické (tíhové) a dynamické síly způsobené zrychlením vůči Zemi. [6] Z tohoto důvodu, pokud je akcelerometr v klidu na povrchu Země, změří zrychlení o velikosti zhruba $9,81 \text{ m s}^{-2}$.

Akcelerometry zpravidla měří hodnoty lineárního zrychlení ve třech navzájem pravoúhlých osách. Znalostí počáteční rychlosti $v(t_0)$ a dráhy $x(t_0)$ v čase t_0 můžeme pomocí zrychlení a v časech $s > t_0$ určit rychlosť $v(t)$ a následně dráhu $x(t)$ pomocí dvou integrací [7]

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a(s) ds \quad (1.2)$$

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v(s) ds \quad (1.3)$$

Aby bylo možné s inerciální jednotkou volně pohybovat v prostoru, je potřeba kromě znalosti dráhy měřit, nebo kompenzovat její natočení. Jednou z možností jak kompenzovat rotaci jednotky je připevnění akcelerometrů na gimbal, který bude udržovat jejich natočení vůči zemi konstantní. Tohoto principu se často využívá v letectví, zejména kvůli jejich vysoké přesnosti, ovšem velkou nevýhodou bývá mechanická složitost a velikost. [7] [5]

Druhou možností, jak kompenzovat natočení je měřit jeho úhel a následně zrychlení z akcelerometru rotovat vůči referenčnímu systému.[7] [5] K tomuto účelu slouží gyroscopy, které měří úhlovou rychlosť ω otáčení jednotky kolem osy. Podobně jako se zrychlením u akcelerometru, znalostí počátečního úhlu $\varphi(t_0)$ v čase t_0 můžeme pomocí úhlové rychlosti ω v časech $s > t_0$ určit úhel natočení $\varphi(t)$, ovšem tentokrát pouze jednou integrací.

$$\varphi(t) = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^t \omega(s) \, ds \quad (1.4)$$

Díky tomu můžou být gyroscopy a akcelerometry nepohyblivě připevněny na mechanickou konstrukci. Jde o tzv. „Strapdown“ typ inerciální navigace.

1.2.1 Zavedení vztažných soustav

Pro účely přehlednosti a exaktnosti bývá v oblastech inerciální navigace zavedeno několik kartézských vztažných soustav. Každá soustava je ortogonální a pravotočivá. [4] [6]

- Inertial frame (i-frame) má počátek ve středu Země. Její osy jsou pevné vůči nepohybujícím se hvězdám. Osa z_i prochází zemskou osou.
- Earth frame (e-frame) má také počátek ve středu Země, její osy jsou pevně vztažené vůči Zemi, tedy rotují kolem i-frame. Osa z_e prochází zemskou osou.
- Navigation frame (n-frame) má počátek ve výchozím bodě navigace. Osy jsou natočené ve směrech sever, východ a vertikálně dolů (North, East, Down).
- Body frame (b-frame) má počátek v inerciální jednotce a její osy jsou natočené ve směrech náklonu, stáčení a vychýlení jednotky.č

S následnými měřenými a vypočtenými daty je často manipulováno jako s vektorom označeným indexem odpovídajícím soustavě, ke které jsou vztaženy (i, e, n, b).

1.3 Vztažné soustavy a rotace Země

Pokud budeme chtít provozovat navigaci vztaženou k pevnému počátečnímu bodu v prostoru (i-frame), bude možné používat klasické pohybové rovnice, tedy pro zrychlení \vec{a}_i , polohu \vec{r} a čas t platí: [6]

$$\vec{a}_i = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \Big|_i \quad (1.5)$$

a obdobně pro rychlosť \vec{v}_i platí:

$$\vec{v}_i = \frac{d\vec{r}}{dt} \Big|_i \quad (1.6)$$

Ovšem v mnoha případech použití inerciální navigace potřebujeme jako počátek zvolit nějaký bod na Zemi, která se neustále otáčí kolem své osy, v tomto případě tedy budeme využívat e-frame. Akcelerometr ale může poskytnout pouze data ze vztažné soustavy i-frame, je tedy potřeba započít úhlovou rychlosť Země ω_{ie} [6]

$$\omega_{ie} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Kde $\Omega = 7,292 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ je rychlosť rotace Země kolem své osy, vztaženo vůči nejbližší hvězdě (Slunci). Poté můžeme rychlosť \vec{v}_e v e-framu definovat jako: [6] [7]

$$\vec{v}_e = \frac{d\vec{r}}{dt} \Big|_e = \vec{v}_i - \omega_{ie} \times \vec{r} \quad (1.8)$$

S přepočty mezi i a e frame je potřeba nakládat zejména při navigaci letadel a raket, kdy je potřeba započít i rotaci Země, vzhledem k dlouhým úsekům času i vzdálenosti. V této práci se ovšem zabýváme navigací uvnitř budov, kdy doba měření může být řádově v jednotkách minut a vzdálenost ve stovkách metrů. Vliv rotace Země tedy bude velmi malý.

1.4 Tíhové pole Země

Jak již bylo popsáno v kapitole 1.2, zrychlení měřené inerciální jednotkou v i-frame je složené ze statické tíhové síly a dynamické síly způsobené zrychlením na jednotku hmotnosti. Působení této dynamické síly je často označováno jako tzv. „Specific force“ \vec{f} představující sílu na jednotku hmotnosti, tedy zrychlení. Pomocí ní můžeme rovnici 1.5 rozepsat na: [6] [7]

$$\vec{a}_i = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \Big|_i = \vec{f} + \vec{g} \quad (1.9)$$

Kde \vec{g} je tíhové zrychlení pole Země.

Z tohoto poznatku vyplývá, že pro správné fungování inerciální navigace je potřeba přesně znát velikost a směr \vec{g} .

Vzhledem k tomu, že Země: [3]

- Rotuje kolem své osy
- Není koule
- Není homogení

není možné považovat velikost tříhového zrychlení za konstantní a jeho směr vždy do středu Země.

Rotace Země kolem své osy vyvolává dostředivé zrychlení.¹ Toto zrychlení má vždy kolmý směr k ose otáčení Země. Vektorovým součtem s gravitačním zrychlením \vec{a}_g , které má vždy směr do středu Země dostaneme tříhové zrychlení \vec{g} , proto se v závislosti na zeměpisné šířce tříhové zrychlení odchyluje od středu Země. [3]

Pro kompenzaci rotace Země bychom mohli vyjádřit tříhové zrychlení \vec{g} v závislosti na gravitačním zrychlení \vec{a}_g následovně využít v rovnici 1.9 [6]

$$\vec{g} = \vec{a}_g - \vec{\omega}_{ie} \times (\vec{\omega}_{ie} \times \vec{r}) \quad (1.10)$$

Díky tomu, že Země není koule, ale přibližně elipsoid jsou body na pólech blíž středu Země než body na rovníku, to nám tedy ovlivňuje velikost gravitačního zrychlení. Tento vliv by šel analyticky vypočítat, pokud bychom předpokládali, že Země je elipsoid a zanedbali vliv reliéfu povrchu Země. [3]

Vzhledem k tomu, že tato práce se zabývá zpracováním dat z inerciální navigace až tzv. offline, tedy ne v reálném čase, můžeme pro řešení problémů s nekonzistentním tříhovým polem Země použít některý z dostupných gravitačních modelů EGM.

1.4.1 Gravitační modely Země

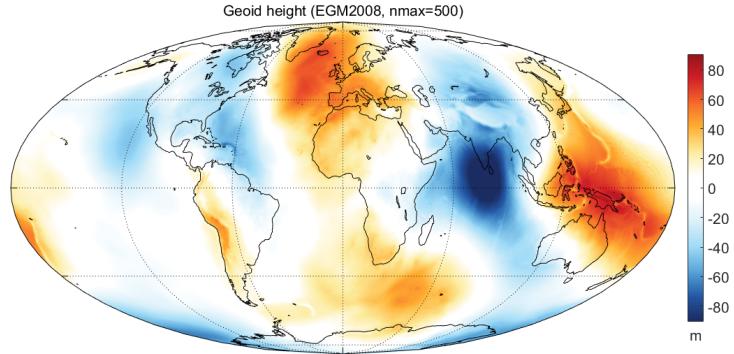
EGM jsou modely popisující geoid Země, s velmi širokou škálou použití v oblastech fyziky, geodézie, oceánografie, navigace a dalších. Spravuje je americká geoprostorová agentura (NGA) a jsou volně dostupné. Nejnovější věřejně dostupný EGM je z roku 2008 (EGM2008), který byl vytvořen na základě několika pozemních a výškových měření. [2]

Takovýto model je poté možné použít například pomocí funkcí z Matlab Aerospace Toolbox, který vypočítá vektor gravitačního zrychlení a_g se správným směrem i velikostí na základě dodaný souřadnic systému WGS84. Poté pomocí rovnice 1.10 můžeme vypočítat tříhové zrychlení.

1.5 Rotace měření akcelerometru

Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá Strapdown systémem inerciální navigace, jsou data akcelerometru vztažena k soustavě inerciální jednotky (tedy b-frame).

¹Všude na Zemi, vyjma samotných zeměpisných pólů



Obr. 1.1: Výškový reliéf geoidu. Zdroj: [1]

Pro převedení dat do vztažné soustavy i-frame je potřeba rotovat vektor specific force \vec{f} maticí směrových kosínů \mathbf{C}_b^i . Tato rotace by se dala popsat jako 3 po sobě jdoucí natočení o tzv. Eulerovy úhly vůči referenčním osám (např. pro tento případ i-frame). Tyto úhly označíme ϕ , θ a ψ [6]

- Rotaci o úhel ϕ kolem osy x přiřadíme rotační matici \mathbf{C}_x : [6]

$$\mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

- Rotaci o úhel θ kolem osy y přiřadíme rotační matici \mathbf{C}_y : [6]

$$\mathbf{C}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

- Rotaci o úhel ψ kolem osy z přiřadíme rotační matici \mathbf{C}_z : [6]

$$\mathbf{C}_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Součinem těchto tří matic získáme matici směrových kosinů \mathbf{C}_b^i pro převod z b-frame na i-frame: [6]

$$\mathbf{C}_b^i = (\mathbf{C}_b^b)^T = (\mathbf{C}_x \mathbf{C}_y \mathbf{C}_z)^T = \mathbf{C}_z^T \mathbf{C}_y^T \mathbf{C}_x^T \quad (1.14)$$

$$\mathbf{C}_b^i = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

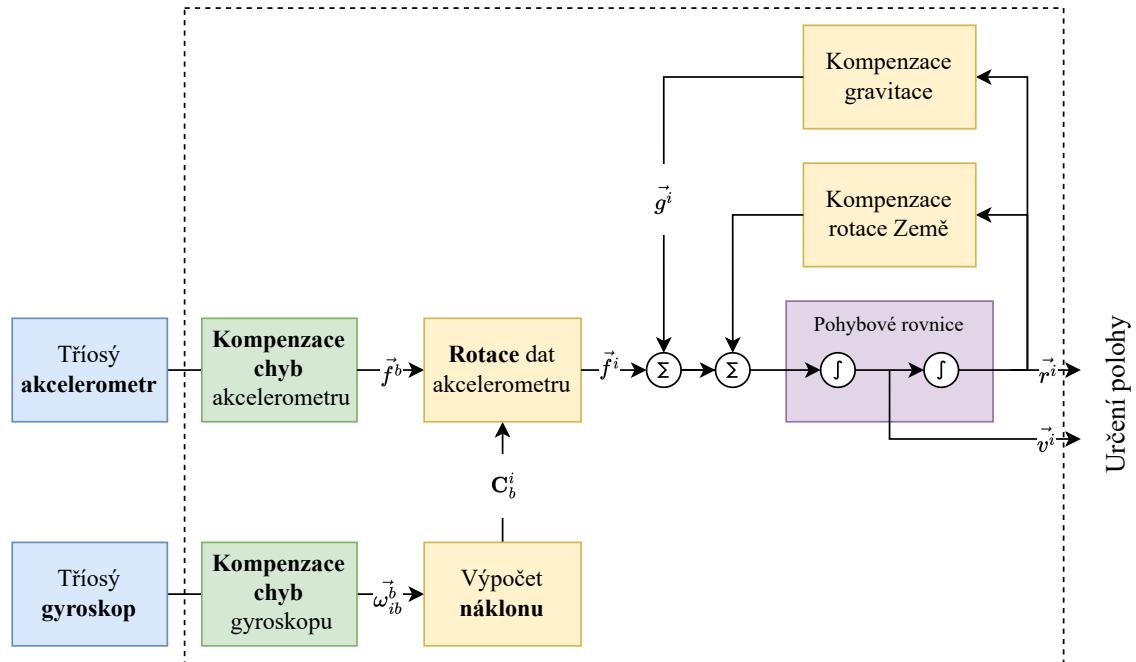
Toto poté můžeme použít k rotaci samotného vektoru specific force \vec{f} z b-frame na i-frame

$$\vec{f}^i = \mathbf{C}_b^i \vec{f}^b \quad (1.16)$$

Kombinací s rovnicí 1.9 získáme rovnici popisující pohyb:

$$\vec{a}_i = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \Big|_i = \vec{f}^i + \vec{g}^i = \mathbf{C}_b^i \vec{f}^b + \vec{g}^i \quad (1.17)$$

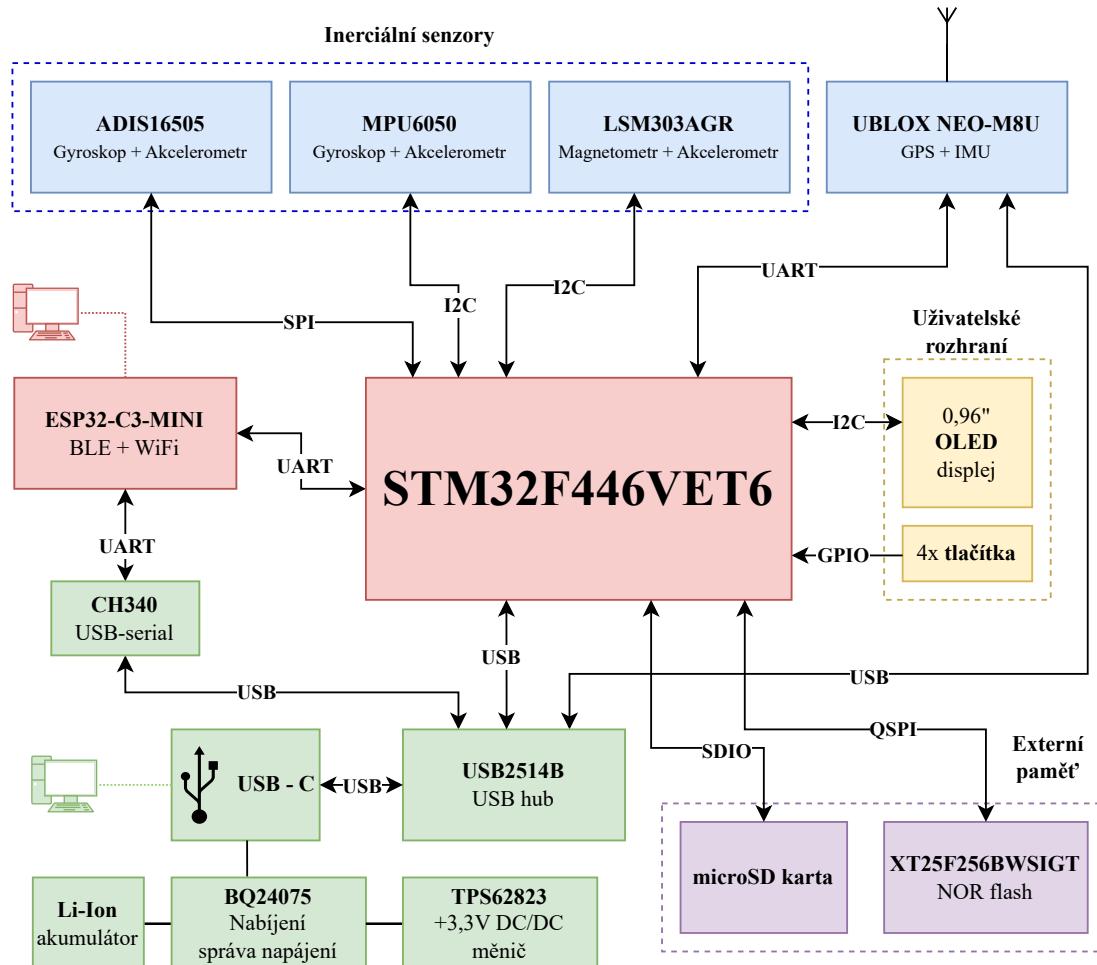
Všechny výše popsané výpočty a děje



Obr. 1.2: Blokové schéma algoritmu strapdown inerciální navigace, převzato z [6] [7]

2 Výsledky studentské práce

2.1 Hardware inerciální jednotky



Obr. 2.1: Blokové schéma inerciální jednotky

Hardware inerciální jednotky je realizován tak, aby umožňoval zaznamenávat hodnoty změřené inerciálními senzory a poskytovat dohromady data o rozměru 9 DoF (akcelerometr, gyroskop a magnetometr). Jednotka také obsahuje GPS modul s vestavěným IMU, jehož použití by mohlo být vhodné například v prostorech s alespoň částečným pokrytím signálu GPS.

Naměřená data je možné uložit do externí NOR Flash paměti připojené k MCU, popřípadě lze využít i kartu typu microSD. K přenosu dat pro jejich následné zpracování v PC primárně slouží ESP32-C3, umožňující bezdrátovou komunikaci přes WiFi, nebo Bluetooth. Konektor USB typu C umožňuje nabíjení vestavěného Li-Ion akumulátoru jednotky a komunikaci mezi PC a ESP32, GPS modulem a hlavním

MCU skrze vestavěný USB rozbočovač. Toto rozhraní je plánované pro použití např. ke konfiguračním, nebo ladícím účelům.

Pro jednoduchou volnost pohybu je jednotka napájena jedním Li-Ion akumulátorem velikosti 18650, při záznamu dat tedy nebude potřeba externího zdroje energie. Grafický OLED displej a 4 tlačítka slouží jako uživatelské rozhraní při používání jednotky.

2.1.1 Akcelerometr a gyroskop

Jednotka obsahuje dvě 6 DoF IMU (gyroskop s akcelerometrem) rozdílných parametrů a řádově rozdílné ceny. Takto odlišné součástky byly vybrány proto, aby bylo možné porovnat vliv přesnosti, šumu, biasu a driftu senzorů na následně zpracovaná data. V Tabulce 2.1 jsou porovnány důležité parametry senzorů MPU6050 a ADIS16505-2. Pro účely inerciální navigace je důležitý zejména nízký bias a drift senzorů, aby při integraci dat k vyhodnocení polohy nebyla integrována i driftová chyba, což má za výsledek velmi nepřesné zpracování hodnot.

Integrovaný obvod MPU6050 je standardní 6 osé MEMS IMU, vhodné mimo jiné pro použití v mobilních zařízeních a dalších podobných aplikacích. Jeho vnitřní gyroskop a akcelerometr má softwarově přepínatelné rozsahy měřených veličin. Kromě inerciálních senzorů má i vestavěný signálový procesor pro fúzi a filtrování dat přímo v integrovaném obvodu. Tato funkce může být vhodná pro odlehčení výpočetního výkonu hlavního procesoru, ovšem pro účely této práce nebude signálový procesor využit, jelikož se měřená data budou zpracovávat až po jejich naměření v PC, ne v reálném čase. Vzorkovací frekvence gyroskopu je 8 kHz a akcelerometru 1 kHz, oba senzory mají 16bitové rozlišení. [16]

MPU6050 disponuje rozhraním I2C s maximální frekvencí hodinového signálu 400 kHz. [16] Pokud bychom chtěli vycítat ze senzoru data při maximální možné vzorkovací frekvenci, byla by potřeba minimální přenosová rychlosť sběrnice:

$$f_{\text{clk}} = 3 \text{ osy} \times (f_{\text{gyro}} + f_{\text{acc}}) \times (16 \text{ bitů} + 2 \times \text{ACK}) = 3 \times (8000 + 1000) \times (16 + 2) = 486 \text{ kHz} \quad (2.1)$$

Při vycítání dat o maximální vzorkovací frekvenci jsme omezeni samotným I2C rozhraním senzoru (využití maximální vzorkovací frekvence je teoreticky možné krát-kodobě, pomocí interního 1kB FIFO zásobníku).[16]

Jelikož pro účely inerciální navigace stačí vzorkovací frekvence dat v řádu stovek Hz [15], tak není tato limitace omezující. Senzor je propojen s hlavním MCU

¹Pro porovnání citlivosti byl vybrán dynamický rozsah 500 °/s senzoru MPU6050 pro možnost porovnání hodnoty s druhým senzorem

²Pro porovnání citlivosti byl vybrán dynamický rozsah 78,4 m/s² senzoru MPU6050 pro možnost porovnání hodnoty s druhým senzorem

Model IMU	MPU6050	ADIS16505-2	jednotka
Parametry gyroskopů			
Dynamický rozsah	programovatelný, ±250, ±500, ±1000, ±2000	±500	°/s
Citlivost ¹	65,5	2621440	LSB/(°/s)
Bias v ose x a z	±20	±0,14	°/s
Bias v ose y	±20	±1,4	°/s
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osy x a y	0,005	0,0043	°/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osu z	0,005	0,0034	°/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Parametry akcelerometrů			
Dynamický rozsah	programovatelný, ±19,6, ±39,2, ±78,4, ±156,8	±78,4	m/s ²
Citlivost ²	418	26756268	LSB/(m/s ²)
Bias v ose x a y	±0,491	±0,0196	m/s ²
Bias v ose z	±0,785	±0,0196	m/s ²
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osy x a y	3924	167	μm/s ² / $\sqrt{\text{Hz}}$
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osu z	3924	243	μm/s ² / $\sqrt{\text{Hz}}$

Tab. 2.1: Porovnání základních parametrů gyroskopů [16] [17]

přes I2C sběrnici s frekvencí hodinového signálu 400 kHz a není sdílena s žádným jiným zařízením, aby bylo možné, v případě potřeby, využít maximální dostupný potenciál senzoru (i přestože je reálná potřeba vzorkovací frekvence nižší).

Integrovaný obvod ADIS16505-2 je precizní 6 osé MEMS IMU, vhodné pro použití v průmyslových a navigačních aplikacích s poměrně nízkým driftem a vysokou přesností. Na rozdíl od MPU6050 nemá přepínatelný dynamický rozsah, je fixně daný variantou součástky. Vzorkovací frekvence gyroskopu i akcelerometru je 2 kHz, oba senzory mají 32bitové rozlišení. S hlavním MCU komunikuje přes sběrnici SPI s maximální frekvencí hodinového signálu 2,1 Mhz. [17] Pokud budeme chtít vycítat data ze senzoru při maximální možné vzorkovací frekvenci, bude potřeba minimální přenosová rychlosť sběrnice:

$$f_{\text{clk}} = 3 \text{ osy} \times (f_{\text{gyro}} + f_{\text{acc}}) \times 32 \text{bitů} = 3 \times (2000 + 2000) \times 32 = 384 \text{ kHz} \quad (2.2)$$

Nejsme tedy omezeni maximální frekvencí hodinového signálu a můžeme teoreticky využívat senzor i při nejvyšší možné rychlosti.

Výrobce prodává tento obvod ve variantě 100 pinového BGA čipu, ale i jako vývojovou desku osazenou senzorem a kolíkovou lištou pro jednodušší práci s osazením DPS. [17] Hardware jednotky byl navržen tak, aby bylo možné využít jak samotný BGA čip, tak i hotový modul s konektorem.

2.1.2 Magnetometr

Vzhledem k tomu, že výběr komerčně dostupných 9 DoF (akcelerometr, gyroskop a magnetometr) je značně omezený, popřípadě součástky prodávané jako 9osé IMU jsou ve skutečnosti moduly více součástek na jedné desce, tak je ve výsledném obvodovém zapojení použit senzor magnetické indukce jakožto samostatná součástka.

Přestože fúze dat z magnetometru může mít pozitivní dopady na zmenšení chyby trajektorie [14], jeho použití uvnitř budov je značně omezené vzhledem k jednoduché ovlivnitelnosti měření blízkými feromagnetickými látkami, silovými rozvody elektřiny a pod. Proto nebyly na výběr magnetometru kladený vysoké požadavky a slouží spíše pro porovnání vlivu přítomnosti / absence naměřených dat z tohoto senzoru.

K tomuto účelu byl vybrán běžně dostupný obvod LSM303AGR, který kromě magnetometru v pouzdře obsahuje i akcelerometr, ten ovšem nebude pro potřeby práce využit, jelikož tuto funkci obstarávají součástky z kapitoly 2.1.1.

Magnetometr komunikuje s hlavním MCU přes sběrnici I2C s maximální vzorkovací frekvencí 150 Hz, dynamickým rozsahem $\pm 4,915$ mT a 16bitovým rozlišením. [18]

2.1.3 GNSS

Zajímavou a uživatelsky přívětivou kombinaci GNSS a inerciální navigace poskytuje například firma u-blox s řadou modulů podporující funkci „dead reckoning“. Jedná se o navigační moduly s vestavěným IMU, určené zejména do oblasti automotive. Jejich typický příklad použití, dle výrobce, je navigace aut, kdy při běžném provozu je zafixovaný signál z GNSS a při výpadku signálu (vjezd do garáže, tunelu apod.) je navigace modulem stále poskytována na základě dat z IMU. [13]

Navigační modul u-blox NEO-M8U byl vybrán a implementován do obvodového zapojení inerciální navigační jednotky. Výrobce udává, že modul zvládne odhadovat polohu po ztrátě signálu GNSS po dobu 60 s s typickou odchylkou 10 % trajektorie. Dále také modul při zapnutí odpovídající funkce umí využít interní IMU ke zvýšení maximální rychlosti aktualizace polohy až na 30 Hz. Jeho využití v rámci této práce

může být různé, například pro navigaci v místech s alespoň částečným pokrytím signálu GNSS. [13]

NEO-M8U umí využívat všechny světové navaigacní systémy (uvedeny v tabulce 2.2). Tento modul komunikuje s hlavním MCU přes sběrnici UART, pomocí standardi-

GNSS systém	Pásma	Frekvence (MHz)
GPS	L1C/A	1575,42
GLONASS	L1OF	1602
BeiDou	B1	1561,098
Galileo	E1-B/C	1575,42

Tab. 2.2: Podporované družicové systémy [13]

zovaných NMEA příkazů v textové podobě, nebo pomocí binárního protokolu UBX, který je specifikován výrobcem. Použití protokolu NMEA je omezené pouze na standardní funkce GNSS modulů, pokud chceme využít speciálních funkcí, například inerciální navigace, je nutné použít proprietární protokol UBX. [13] NEO-M8U také disponuje USB portem, skrz který je možné modul ovládat a konfigurovat pomocí PC aplikace výrobce. Tento port je připojen na integrovaný USB rozbočovač a lze jej využít například pro vývojové účely.

2.1.4 Paměť

Senzor	Odhadovaný bitrate
ADIS16505-2	375 kbit/s
MPU-6050	422 kbit/s
LSM303AGR	7 kbit/s
NEO-M8U	1 kbit/s
Celkem	805 kbit/s (0,1MB/s)

Tab. 2.3: Odhad celkového bitratu pro záznam dat

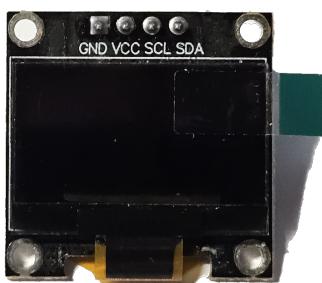
V případě, že bychom chtěli zaznamenávat data ze všech senzorů při jejich maximálních vzorkovacích frekvencích, nebude množství změrených dat zanedbatelné. V tabulce 2.3 je hrubý odhad potřebné rychlosti záznamu dat pro tento krajní případ. Pokud bude měření trvat např. 2 minuty, vygenerujeme dohromady 12 MB dat, což převyšuje velikost paměti většiny dostupných MCU.

Z tohoto důvodu je v obvodovém zapojení inerciální jednotky implementována 32MB NOR Flash paměť, propojená s hlavním MCU přes sběrnici QUADSPI s

maximální možnou hodinovou frekvencí 120 Mhz, měla by tedy být pro potřeby této aplikace dostačující. [12]

Kromě výše popsané Flash paměti jednotka obsahuje i slot na microSD kartu, která by z uživatelského hlediska mohla být jednodušší k použití, ovšem při zápisu může latence SD karty být (krátkodobě) až stovky ms [11]. To by mohlo znemožnit její použití v případě, že by hlavní MCU měl nedostatek volné paměti RAM pro krátkodobé uchování dat, proto bude o její využití rozhodnuto až později.

2.1.5 Uživatelské rozhraní



Obr. 2.2: Fotografie grafického OLED displeje

Pro ovládání uživatelem disponuje jednotka grafickým OLED displejem s úhlopříčkou 0,96 palce a rozlišením 128×64 pixelů, který je připojený přes sběrnici I2C. Společně s 4 tlačítky by měl poskytnout dostatečně univerzální a pohodlné uživatelské rozhraní.

2.1.6 Napájení

Inerciální jednotka je napájena z jednoho Li-Ion akumulátoru velikosti 18650. Nabíjení je realizováno obvodem BQ24075RGT, který monitoruje nabíjecí odebíraný proud jednotkou. Proud, kterým je nabíjen akumulátor je regulován tak, aby nepřekročil maximální hranici 900 mA z USB portu. [9]

Všechny součásti inerciální jednotky (až na RTC a zálohovací registry hlavního MCU a GPS modulu) jsou napájeny skrz DC/DC měnič z výstupního vývodu tohoto nabíjecího obvodu. V případě, že je připojena jednotka do USB a nabíjí se, na výstupním pinu nabíjecího obvodu je napájecí napětí USB portu. Díky tomu nedochází k velkým ztrátám pokud je jednotka zapnuta a nabíjí se zároveň. Jestliže je USB odpojeno, skrz interní tranzistor je jednotka napájena z akumulátoru. [9]

Nabíjecí obvod také umožňuje kompletní odpojení napájení jednotky přes jeden z vývodů. Toho je využito pro ochranu akumulátoru proti podvybití pomocí zapojení S/R klopného obvodu na napájení USB a jednoho z výstupů procesoru. Napětí

akumulátoru je měřeno pomocí ADC mikrokontroléru. Jestliže klesne pod definovanou úroveň, pomocí pulzu bude celý obvod odpojen od napájení až do té doby, dokud uživatel znova nepřipojí jednotku do USB portu.

Součástka	Odhadovaný proud (mA)
STM32F446	50
ESP32	150
USB2514	135
ADIS16505	50
NEO-M8U	30
OLED displej	10
microSD karta	50
Celkem	475

Tab. 2.4: Odhad spotřeby proudu 3,3V větve

Vzhledem k většímu počtu součástek není odebíraný proud z 3,3V napájecí větve malý (zhruba 0,5 A, viz. tabulka 2.4). Budeme-li uvažovat rozsah výstupního napětí nabíjecího obvodu 3,5 V (vybitý akumulátor) až 5 V (zařízení připojené do USB) zjistíme, že pro napájení 3,3V větve není vhodný lineární regulátor, zejména kvůli vysokému ztrátovému výkonu. Ten je v krajním případě:

$$P_{\text{ztrátový}} = (U_{\text{USB}} - U_{\text{IO}}) \times I_{\text{IO}} = (5 - 3,3) \times 0,5 = 0,85 \text{ W} \quad (2.3)$$

Proto byl na napájení hlavní 3,3V větve vybrán spínaný regulátor TPS62823. Jedná se o buck (snižující) měnič s integrovaným výkonovým tranzistorem pracujícím na frekvenci 2,2 MHz. Díky vyšší spínací frekvenci je možné využít menší komponenty, zejména cívku a filtrační kondenzátory na výstup, ovšem je potřeba dodržet doporučovaná pravidla při návrhu desky pro omezení rušení a velkých prudových smyček. Rozsah napájecího napětí čipu je 2,4 až 5 V, maximální výstupní proud 3 A. [8]

Minimální napětí, na které můžeme nechat akumulátor vybit je dáno odpory přechodů D-S vnitřních tranzistorů nabíjecího obvodu, DC/DC měniče a stejnosměrným odporem cívky. V tomto případě bude regulátor pracovat v módu s minimální střídou. [8] Toto napětí je:

$$\begin{aligned} U_{\text{batMin}} &= U_{\text{out}} + I_{\text{out}} \times (R_{\text{DS(charge)}} + R_{\text{DS(conv)}} + R_{\text{DC(L)}}) = \\ &= 3,3 + 0,5 \times (0,05 + 0,026 + 0,014) = 3,345 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.1.7 Hlavní procesor

Požadavky na výběr hlavního procesoru byly z velké části dané počtem a druhem potřebných periferií, které jsou popsány v tabulce 2.5. Dále byly z podskupiny procesorů disponujících všemi periferiemi z tabulky 2.5 vybrány takové, které mají velikost vnitřní FLASH paměti alespoň 512 kB, abychom nebyli při vývoji Firmwaru jednotky omezeni velikostí programu. Pouzdra procesorů byla vybrána taková, aby se s nimi dalo jednoduše pracovat, z toho důvodu byla vyloučena pouzdra typu BGA. V neposlední řadě byla zvážena i dostupnost vybíraných procesorů u nejobvyklejších distributorů elektronických součástek, aby bylo možné v případě potřeby výrobu jednotky opakovat.

Druh periferie	Minimální požadovaný počet	Použití periferie
I2C	3	OLED displej, LSM303AGR, MPU6050, USB2514B
SPI	1	ADIS16505
UART	2	NEO-M8U, ESP32
QUADSPI	1	NOR FLASH paměť
SDIO	1	microSD karta
ADC	1	měření napětí akumulátoru

Tab. 2.5: Minimální požadavky na periferie mikroprocesoru

Na základě těchto požadavků byl jako hlavní mikrokontrolér vybrán *STM32F446VET6*. Jedná se 32bitový Arm Cortex-M4 procesor z portfolia „high performance“ mikrokontrolérů výrobce STMicroelectronics. Splňuje všechny výše zmíněné minimální požadavky, v obvodovém zapojení byla použita i USB periferie procesoru, která může mít různá využití. Procesor obsahuje 512 kB paměti Flash a 128 kB paměti RAM, maximální hodinová frekvence je 180 MHz a disponuje matematickým ko-procesorem pro operace s plovoucí desetinou čárkou. Vzhledem k počtu GPIO v zapojení inerciální jednotky byla vybrána varianta procesoru v pouzdře LQFP100. [19]

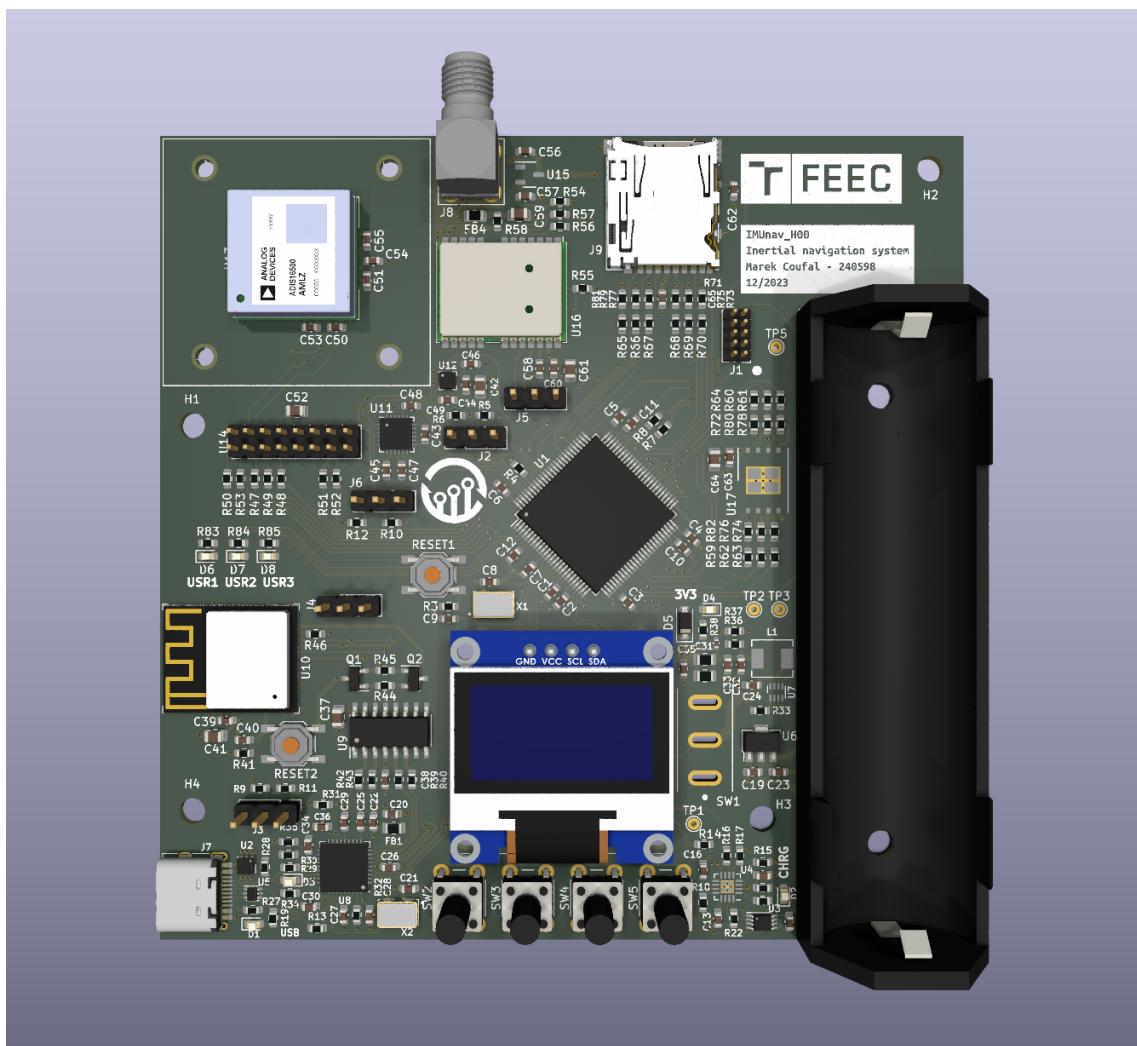
2.1.8 ESP32

Pro splnění požadavků zadání práce je potřeba, aby mohla inerciální jednotka komunikovat bezdrátově s PC zpracovávajícím data. Pro tento úkol byl vybrán bezdrátový modul ESP32-C3-Mini. Jedná se o jeden z novějších produktů portfolia bezdrátových modulů firmy Espressif. Podporuje standard WiFi 802.11 b/g/n a Bluetooth LE 5. [10]

Tento modul je v obvodovém zapojení použit čistě jako bezdrátové rozhraní, neobsluhuje žádné další GPIO kromě 2 UART sběrnic. První sběrnice UART je připojena pomocí USB-serial převodníku CH340 na USB rozbočovač v inerciální jednotce. Toto rozhraní slouží pro nahrávání, popřípadě aktualizaci vestavěného AT firmwaru výrobce. V případě, že by poskytovaný firmware výrobce nedostačoval, nebo nebyl vhodný pro potřeby naší aplikace, bude možné pomocí tohoto rozhraní nahrát vlastní obslužný firmware pro ESP32.

Druhá sběrnice UART je připojena k hlavnímu MCU inerciální jednotky. Kromě standardních pinů Rx a Tx jsou propojeny i piny pro řízení toku, které by bylo možné použít na zjednodušení časování komunikace.

2.2 Realizace hardwaru



Obr. 2.3: 3D model navržené DPS

Schéma i DPS byla navržena v programu KiCad. V příloze A je schéma inerciální jednotky rozdělené do několika logických bloků. Příloha B obsahuje pohled na osazení součástek vrchní vrstvy a přílohy C až F obsahují nákres jednotlivých vrstev mědi.

Inerciální jednotka je realizována jako 4vrstvá deska plošných spojů o velikosti 100×100 mm s uspořádáním vrstev popsaném v tabulce 2.6.

Vrstva mědi	Využití
Horní	Vysokorychlostní signály
1. vnitřní	Společná zem
2. vnitřní	Napájení
Dolní	Signály

Tab. 2.6: Uspořádání vrstev na DPS

Typ a tloušťky substrátu DPS byly vybrány v konfiguraci JLC04161H-7628. Pomocí kalkulačky výrobce byly vypočteny potřebné hodnoty požadovaných šírek a mezer spojů mikropáskového vedení pro impedanci 50Ω a 90Ω . Hodnoty pro vedení o impedanci 50Ω byly použity při návrhu cest mezi GPS modulem a SMA anténou. Šírka a vzdálenost diferenciálního páru o impedanci 90Ω byla použita při návrhu USB části zapojení.

Pouzdra rezistorů a kondenzátorů byla vybrána velikosti 0603.

Závěr

Shrnutí studentské práce.

Literatura

- [1] BEZDĚK, Aleš a SEBERA, Josef. Matlab script for 3D visualizing geodata on a rotating globe. Online. *Computers Geosciences*. 2013, roč. 56, s. 127-130. ISSN 00983004. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.03.007>. [cit. 2023-12-26].
- [2] PAVLIS, Nikolaos K.; HOLMES, Simon A.; KENYON, Steve C. a FACTOR, John K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Online. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2012, roč. 117, č. B4, s. 1-38. ISSN 0148-0227. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>. [cit. 2023-12-26].
- [3] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Překlady vysokoškolských učebnic. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1869-9.
- [4] PEKÁREK, David. *Přesné meření vlastní trajektorie vozidla*. Online, Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2020. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/90221>. [cit. 2023-12-25].
- [5] POLÁK, Luboš. *Navigační jednotka s modifikovanou soustavou akcelerometrů*. Online, Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2018. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/74430>. [cit. 2023-12-25].
- [6] TITTERTON, D. H. a WESTON, J. L. *Strapdown inertial navigation technology*. Second edition. Progress in astronautics and aeronautics, 207. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, c2004. ISBN 1-56347-693-2.
- [7] GREWAL, Mohinder S.; ANDREWS, Angus P. a BARTONE, Chris. *Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration*. Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-44700-0.
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS6282x: 5.5-V, 1-A, 2-A, 3-A Step-Down Converter Family with 1% Accuracy*. Online katalogový list. C. 2019. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/gpn/tps62823>. [cit. 2023-12-21].
- [9] TEXAS INSTRUMENTS. *BQ2407x: Standalone 1-Cell 1.5-A Linear Battery Chargers with Power Path*. Online katalogový list. N. 2021. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/gpn/bq24075>. [cit. 2023-12-21].

- [10] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32C3MINI1: Smallsized 2.4 GHz WiFi (802.11 b/g/n) and Bluetooth® 5 module*. Online katalogový list. 2022. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3-mini-1_datasheet_en.pdf. [cit. 2023-12-21].
- [11] KRÄWINDEL, R.W. *The effect of writing and transmitting SD card data on the consistency of SD card write performance*. Online, bakalářská. Enschede, Holandsko: University of Twente, 2020. Dostupné z: http://essay.utwente.nl/82256/1/Krawinkel_BA_EEMCS.pdf. [cit. 2023-12-17].
- [12] XTX TECHNOLOGY LIMITED. *XT25F256BWSIGT: Quad IO Serial NOR Flash Datasheet*. Online katalogový list. 2020. Dostupné z: <http://www.txttech.com/download/?AId=287>. [cit. 2023-12-17].
- [13] U-BLOX. *NEO-M8U: u-blox M8 untethered dead reckoning module including 3D inertial sensors*. Online katalogový list. R13. 2022. Dostupné z: https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8U_DataSheet_UBX-15015679.pdf. [cit. 2023-12-17].
- [14] TKHORENKO, M. Yu.; PAVLOV, B. V.; KARSHAKOV, E. V. a VOLKOVITSKY, A. K. On integration of a strapdown inertial navigation system with modern magnetic sensors. Online. In: *2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. IEEE, 2018, s. 1-4. ISBN 978-5-91995-057-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405845>. [cit. 2023-12-17].
- [15] WEI, Y. a LI, Y. IMPACT OF SENSOR DATA SAMPLING RATE IN GNSS/INS INTEGRATED NAVIGATION WITH VARIOUS SENSOR GRADES. Online. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022, roč. XLVI-3/W1-2022, s. 205-211. ISSN 2194-9034. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-3-W1-2022-205-2022>. [cit. 2023-12-16].
- [16] TDK INVENSENSE. *MPU6050: Product specification*. Online katalogový list. 3.4. 2013. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [17] ANALOG DEVICES. *ADIS16505: Precision, Miniature MEMS IMU*. Online katalogový list. C. 2020. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adis16505.pdf>. [cit. 2023-12-12].

- [18] ST MICROELECTRONICS. *LSM303AGR: Ultracompact high-performance eCompass module*. Online katalogový list. 11. 2022. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm303agr.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [19] ST MICROELECTRONICS. *STM32F446xC/E: Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, 225 DMIPS, up to 512 KB Flash/128+4 KB RAM, USB OTG HS/FS, seventeen TIMs, three ADCs and twenty communication interfaces*. Online katalogový list. 10. 2021. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f446ve.pdf>. [cit. 2023-12-14].
- [20] BLOCHER, Lukas; MAYER, Wolfram; ARENA, Marco; RADOVIC, Dusan; HILLER, Tobias et al. Purely Inertial Navigation with a Low-Cost MEMS Sensor Array. Online. In: *2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. IEEE, 2021, s. 1-4. ISBN 978-1-7281-5099-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/INERTIAL51137.2021.9430468>. [cit. 2023-12-09].

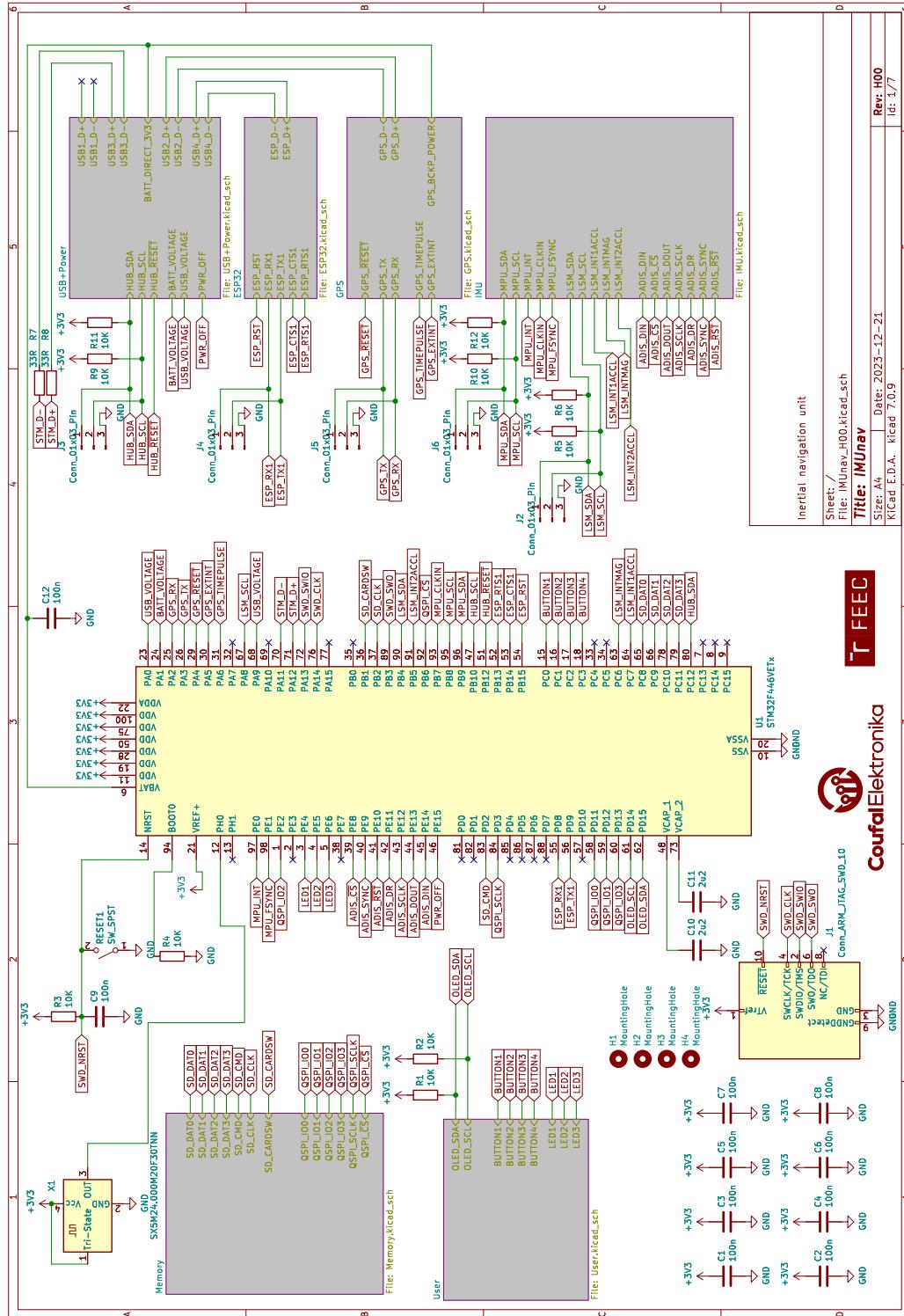
Seznam symbolů a zkratek

DoF	Degrees of Freedom - stupně volnosti
IMU	Inertial Measurement Unit - měřicí inerciální jednotka
OLED	
MCU	
GPS	
IMU	
MEMS	
I2C	
FIFO	
BGA	
DPS	
RAM	
ADC	
SMA	

Seznam příloh

A Schéma zapojení inerciální jednotky	37
B Pohled osazení součástek	44
C Vrchní vrstva mědi DPS	45
D Vnitřní vrstva mědi DPS In1	46
E Vnitřní vrstva mědi DPS In2	47
F Spodní vrstva mědi DPS	48

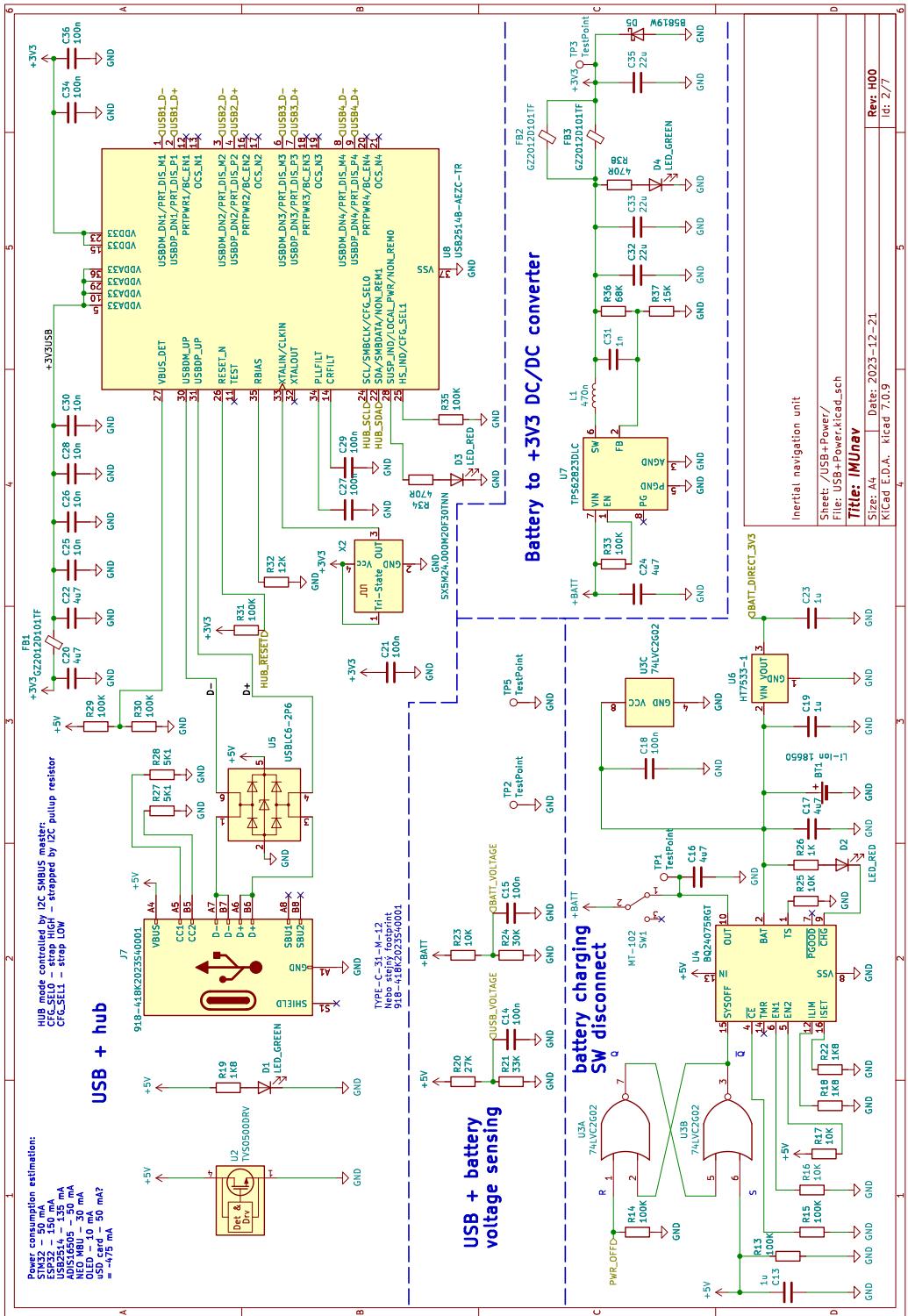
A Schéma zapojení inerciální jednotky

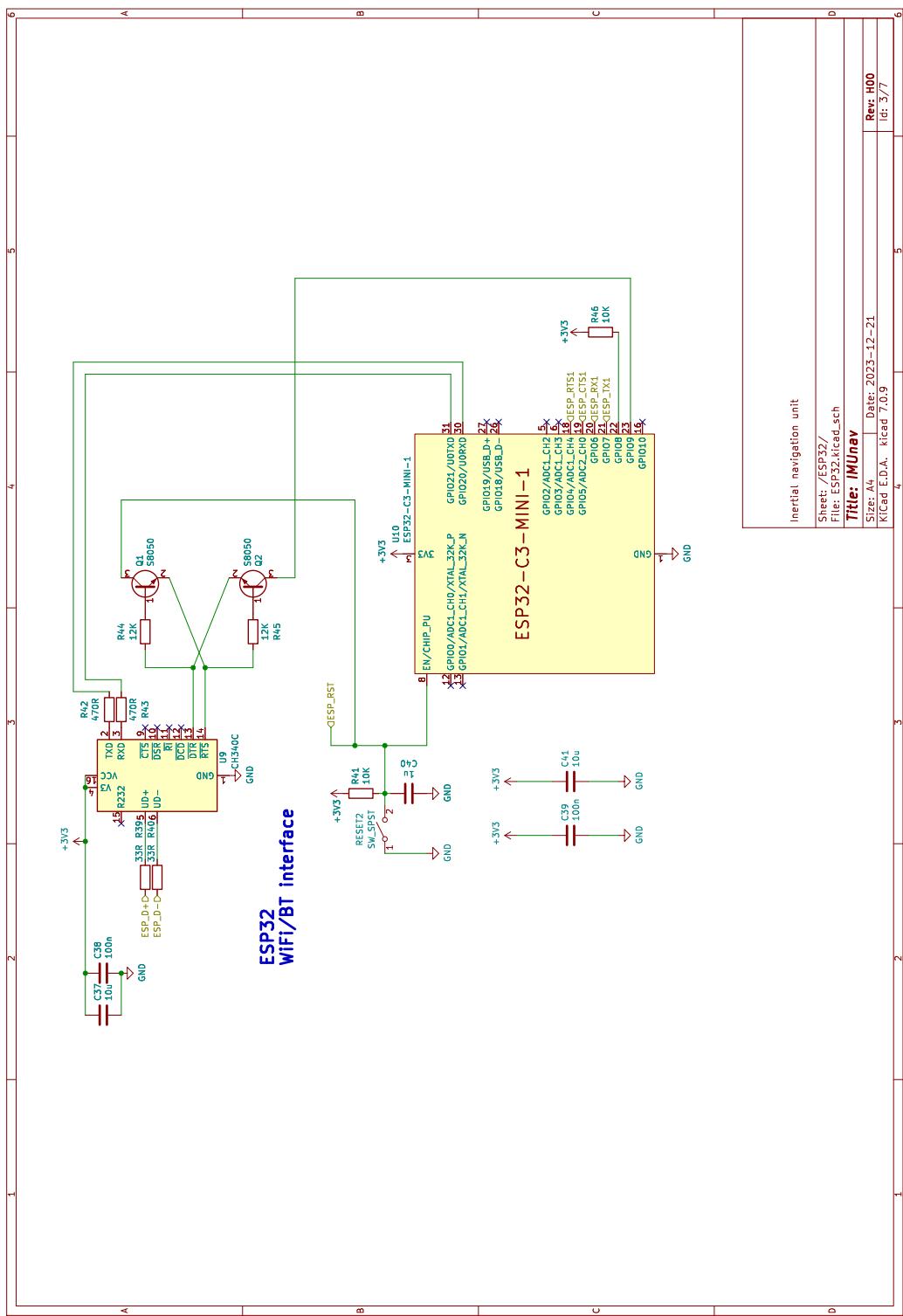


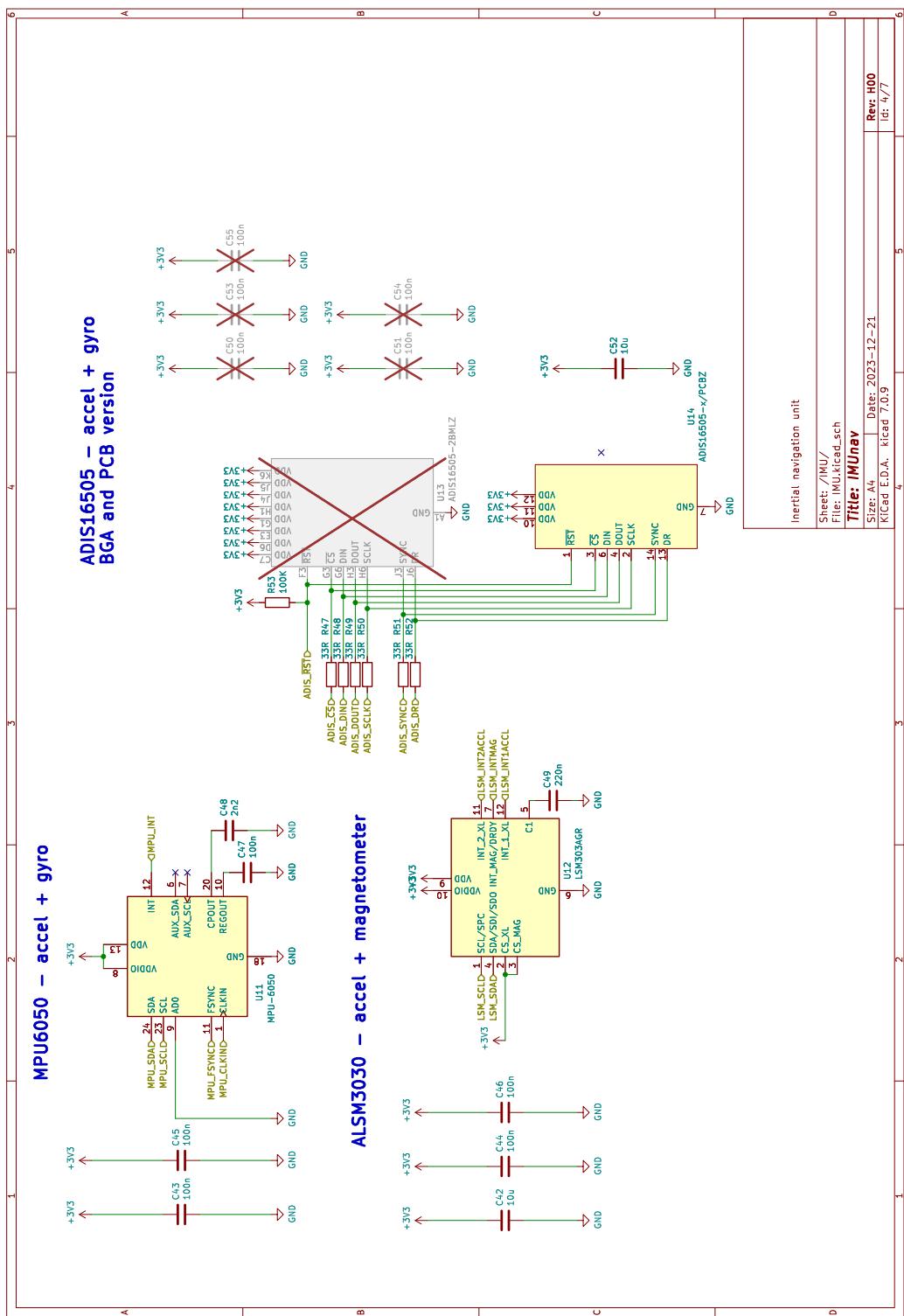
T FEEC

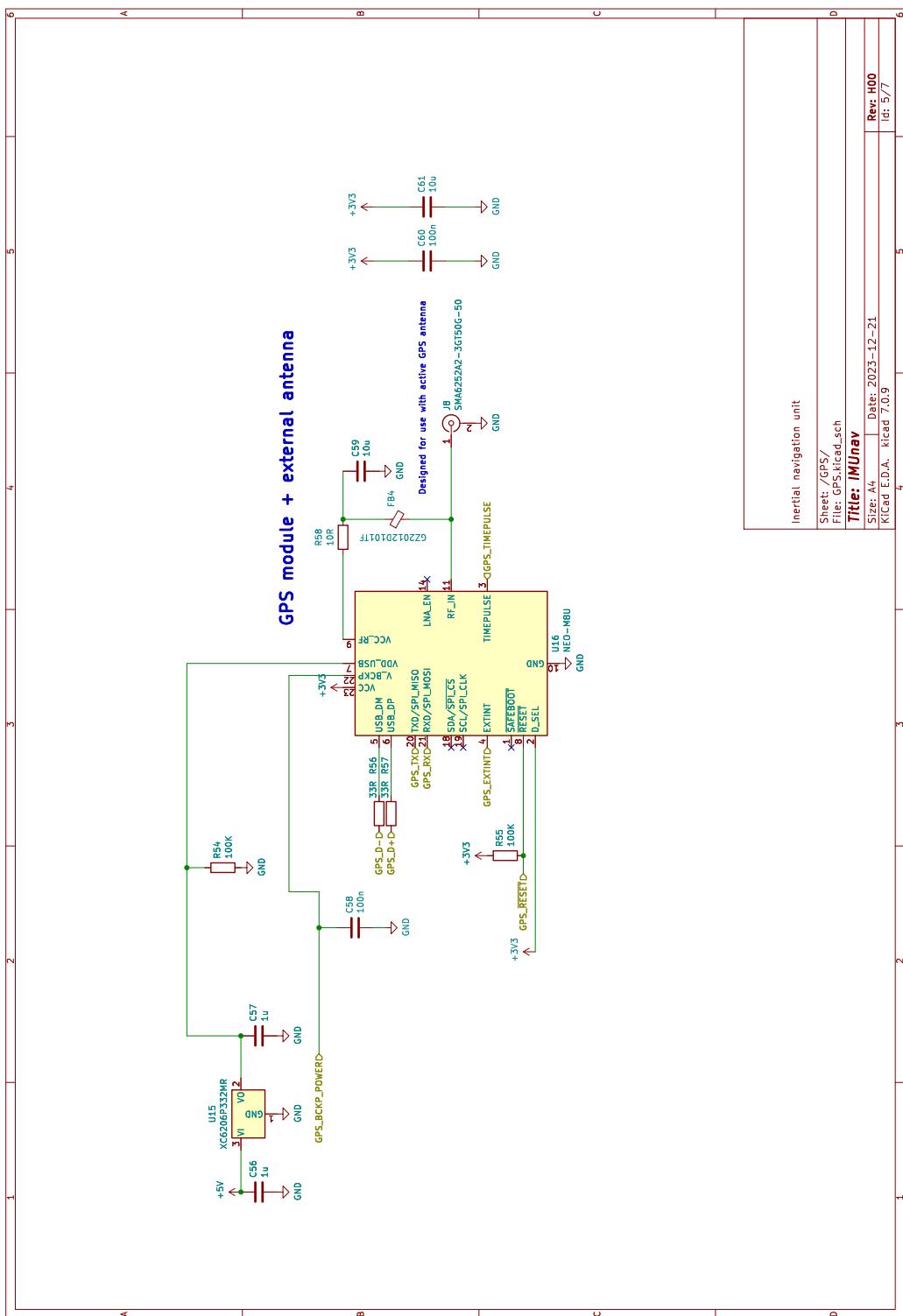


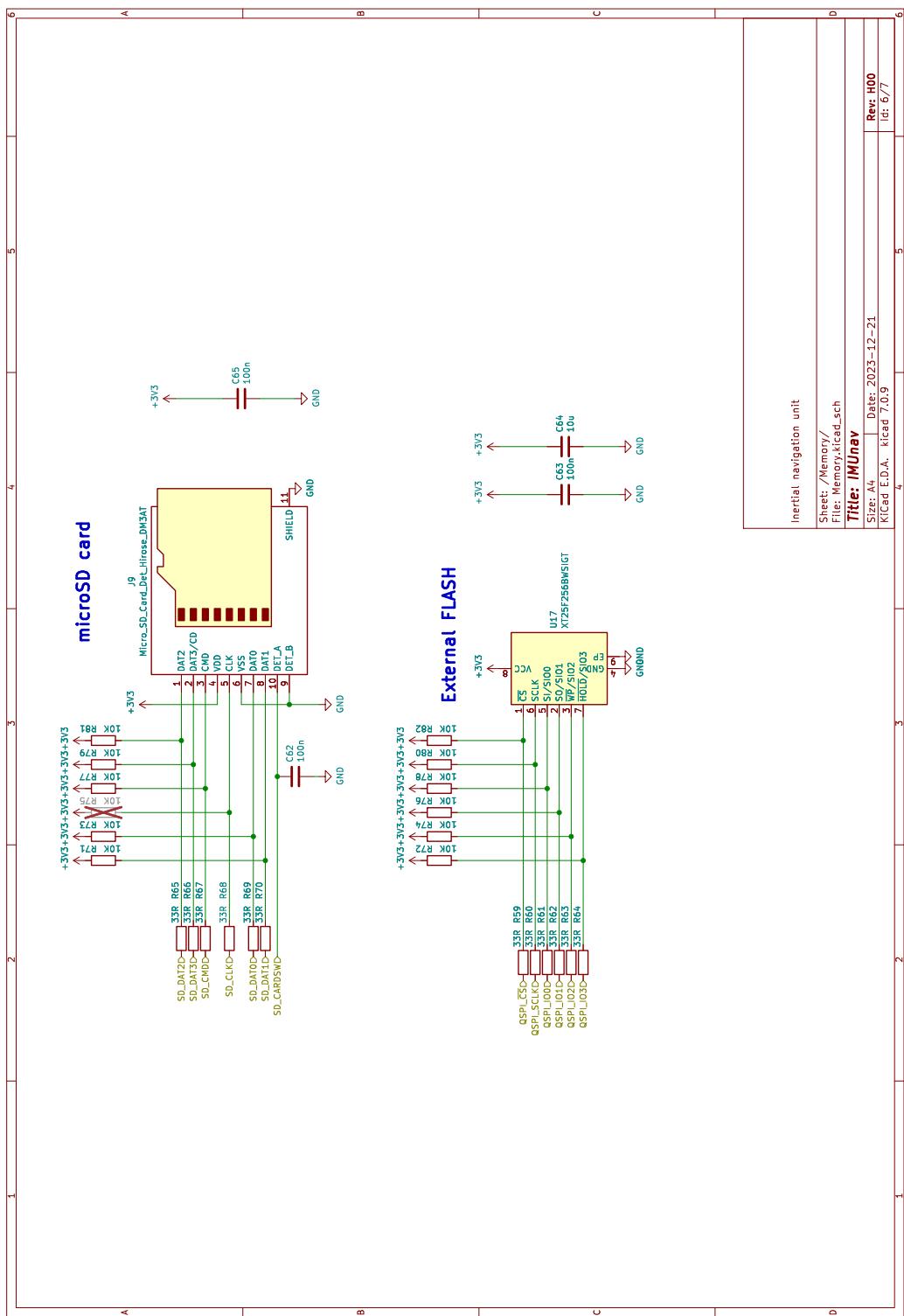
Coufal Elektronika

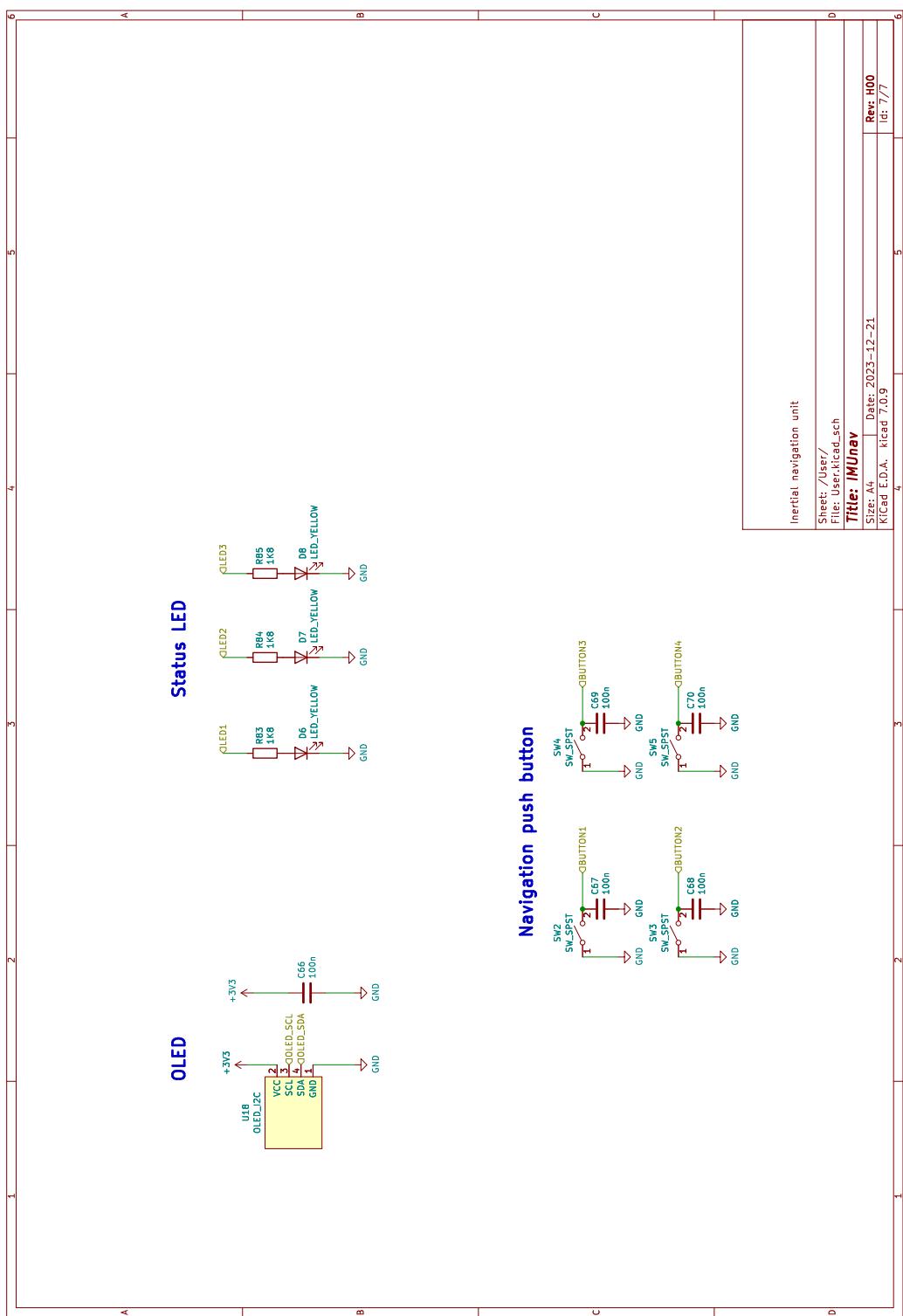




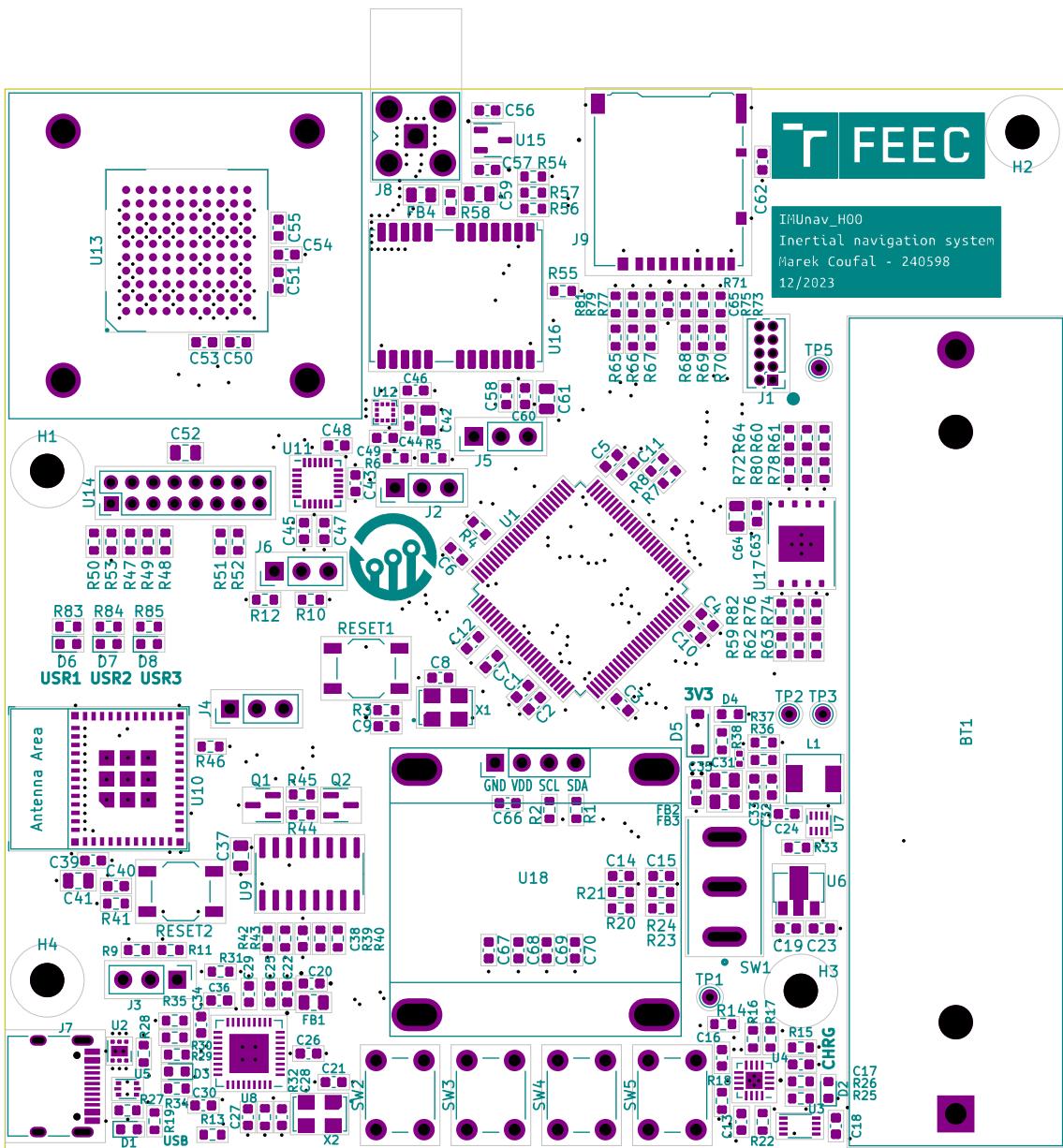




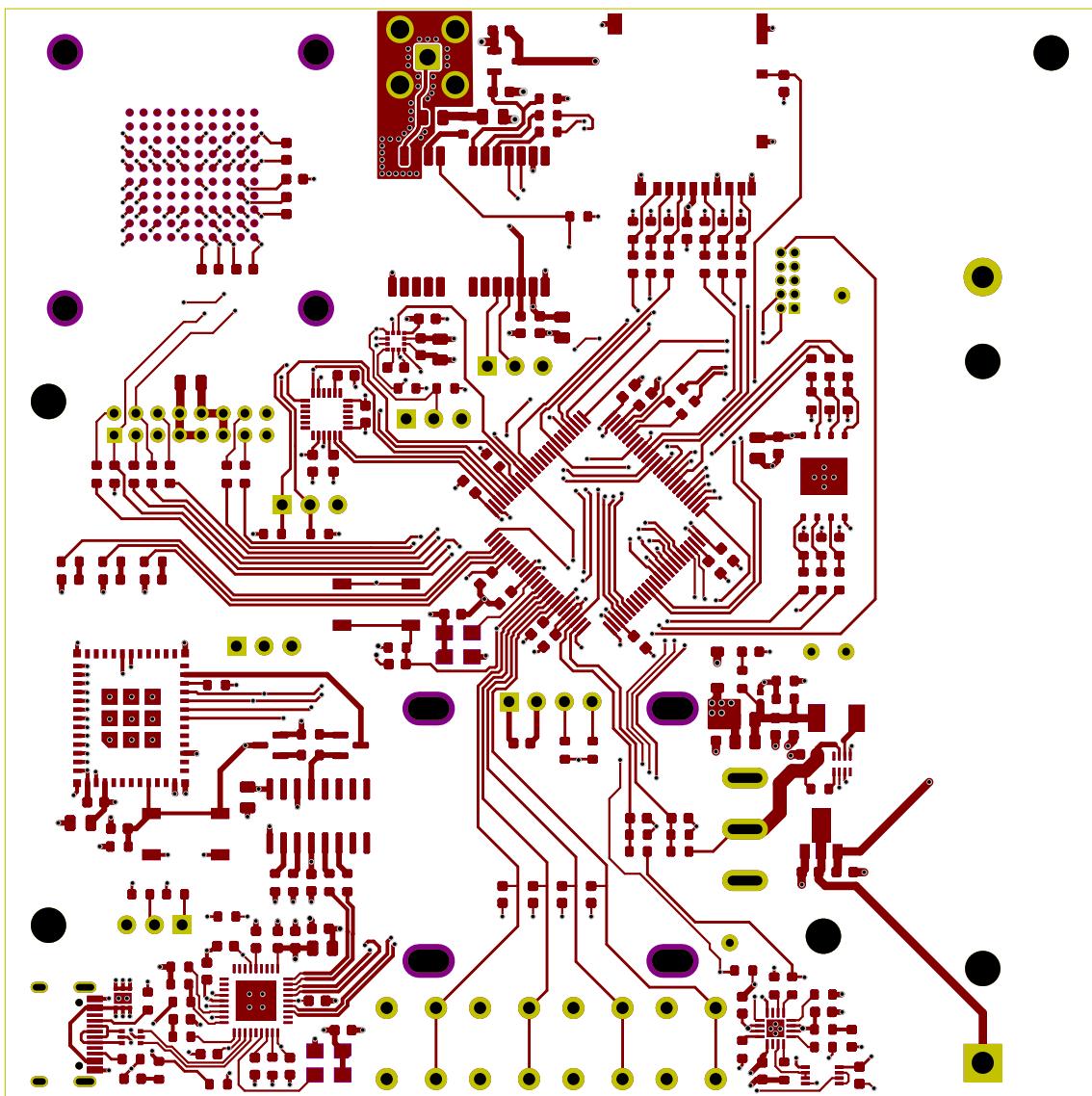




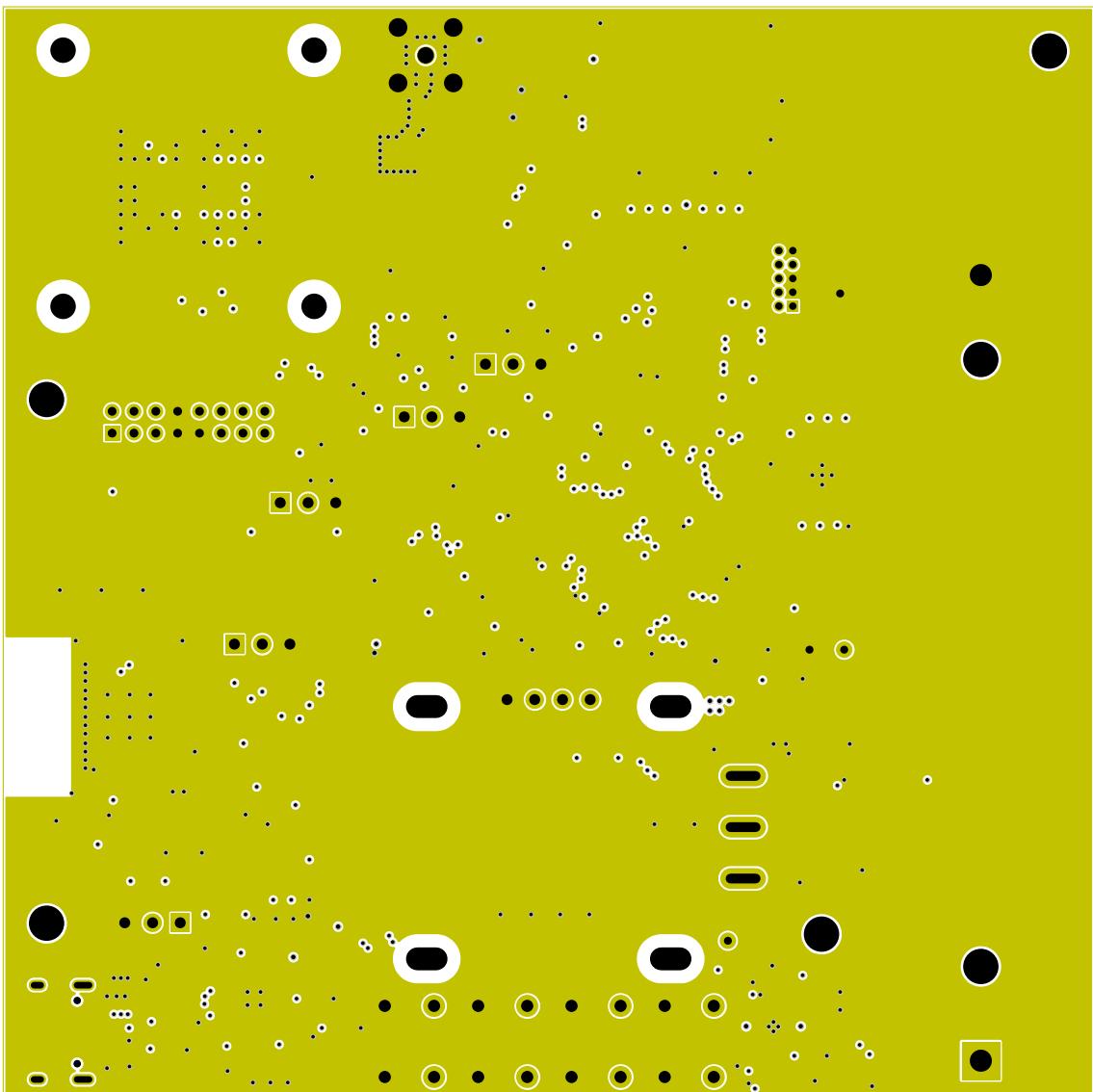
B Pohled osazení součástek



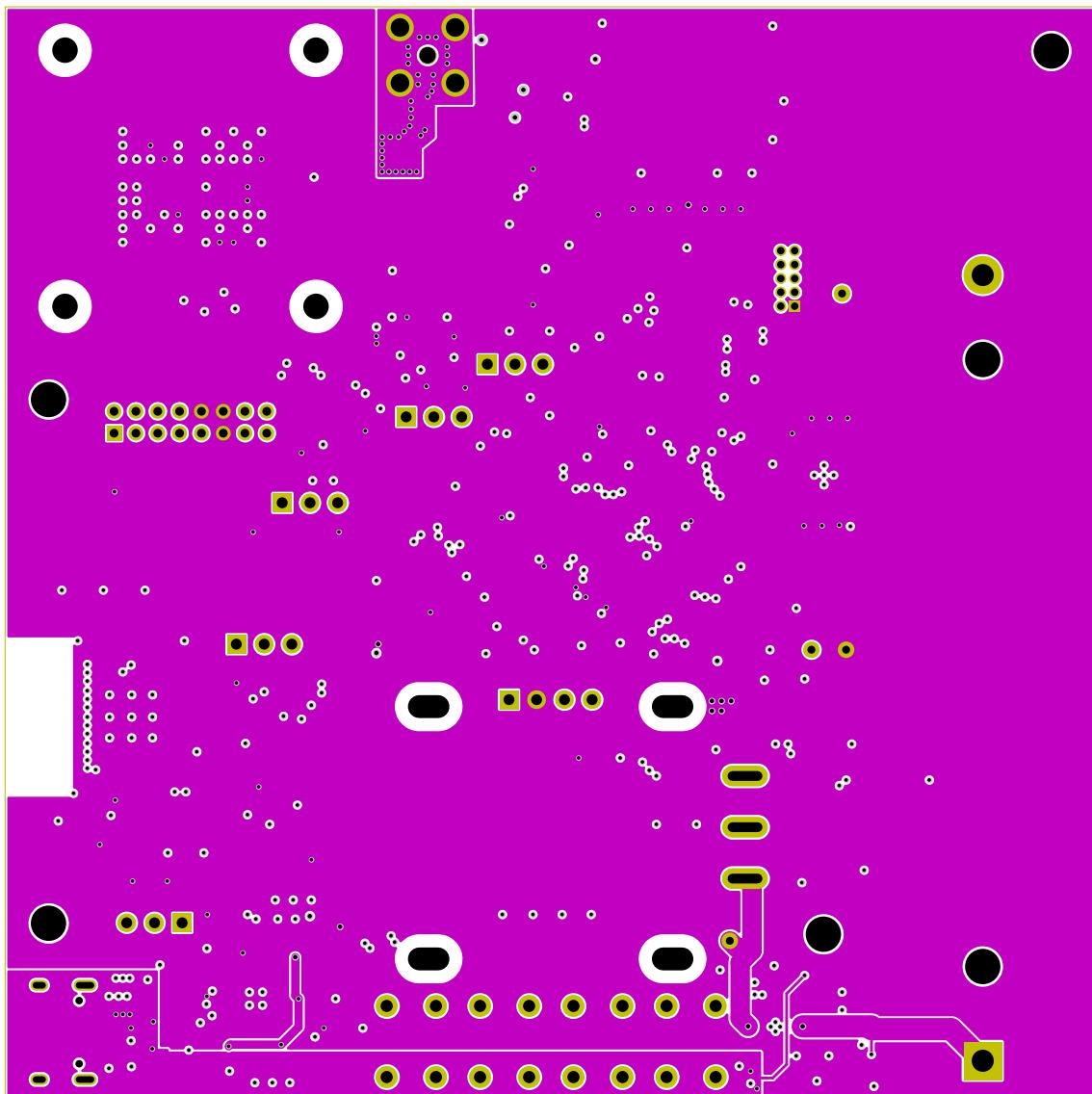
C Vrchní vrstva mědi DPS



D Vnitřní vrstva mědi DPS In1



E Vnitřní vrstva mědi DPS In2



F Spodní vrstva mědi DPS

