

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ  
PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE  
OBOR GEODÉZIE, KARTOGRAFIE A GEOINFORMATIKA



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
VÝVOJ ZAŘÍZENÍ PRO PŘÍJEM A ZÁZNAM  
KOORDINOVANÉHO ČASU PRO ÚČELY  
ASTRONOMICKÉHO MĚŘENÍ

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.  
Katedra geomatiky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kovář Jméno: Michal Osobní číslo: 506633  
Zadávající katedra: Katedra geomatiky, k155  
Studijní program: Geodézie a kartografie  
Studijní obor/specializace: Geodézie, kartografie a geoinformatika

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vývoj zařízení pro příjem a záznam koordinovaného času pro účely astronomického měření

Název bakalářské práce anglicky: Development of a device for receiving and recording coordinated time for astronomical measurement purposes

Pokyny pro vypracování:

1. Návrh zařízení pro příjem a záznam koordinovaného času
2. Realizace návrhu
3. Vývoj řídicího software
4. Testování

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 9.2. 2024

Termín odevzdání BP v IS KOS: 20. 5. 2024

*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem zařízení, které je schopné přijímat a zaznamenávat koordinovaný čas (UTC) pro účely astronomického měření v geodézii. Nejprve je popsána teorie časových soustav a teorie astronomického měření, včetně požadavků na přesnost určení času. Následně jsou popsány možnosti příjmu koordinovaného času. Práce dále popisuje jednotlivé komponenty využívané pro tvorbu tohoto zařízení. Je popsána konstrukce výsledného zařízení a řídicí program, který zařízení ovládá. Na závěr je testována funkčnost zařízení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

astronomické měření, astronomický azimut, časové soustavy, UTC, synchronizace času, Arduino, NTP, DCF77, GNSS

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with the development of a device that is able to receive and record Coordinated Universal Time (UTC) for the purposes of astronomical measurements in geodesy. Initially, the theory of time systems and principles of astronomical measurement are described, including the specification of accuracy requirements for time determination. Subsequently, the possibilities for receiving coordinated time are explored. The thesis further describes the individual components used for the creation of this device. It details the construction of the resulting device and the control program that operates it. At the end, the functionality of the device is tested.

## **KEYWORDS**

astronomical measurement, astronomical azimuth, time systems, UTC, time synchronization, Arduino, NTP, DCF77, GNSS

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „Vývoj zařízení pro příjem a záznam koordinovaného času pro účely astronomického měření“ jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Zdeňku Vyskočilovi, Ph.D. za jeho ochotu a velké množství cenných rad při vedení této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Holešovskému za rady ohledně průběhu astronomického měření a v neposlední řadě paní Kerstin Eisold za zakoupení součástek, které nebyly v České republice dostupné. Velké poděkování také patří mé rodině za podporu během celého studia.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Rešerše</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Teorie - Čas</b>	<b>12</b>
3.1	Rotační časy . . . . .	12
3.1.1	Rotační časy hvězdne . . . . .	12
3.1.2	Rotační časy sluneční . . . . .	13
3.2	Fyzikální časy . . . . .	13
3.3	Časové soustavy . . . . .	13
3.3.1	Univerzální čas UT0 . . . . .	13
3.3.2	Univerzální čas UT1 . . . . .	13
3.3.3	Mezinárodní Atomový čas (TAI) . . . . .	14
3.3.4	Univerzální koordinovaný čas (UTC) . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Teorie - Astronomické měření</b>	<b>15</b>
4.1	Astronomické azimuty . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Teorie - Možnosti určení času</b>	<b>17</b>
5.1	Internet . . . . .	17
5.1.1	API . . . . .	17
5.1.2	NTP . . . . .	17
5.2	Rádiový signál . . . . .	17
5.2.1	DCF77 . . . . .	18
5.3	GNSS . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Vývoj zařízení - Komponenty</b>	<b>20</b>
6.1	Vývojová deska . . . . .	20
6.1.1	Arduino Uno . . . . .	20
6.1.2	Arduino Mega . . . . .	21
6.2	Přijímač časového signálu . . . . .	21
6.2.1	Přijímač DCF77 . . . . .	22
6.2.2	Přijímač GNSS . . . . .	22

6.3	Čtečka Micro SD karet . . . . .	23
6.4	Tlačítko . . . . .	24
6.5	OLED displej . . . . .	24
6.6	Hlasový modul . . . . .	25
6.7	RGB LED . . . . .	25
6.8	Převodník TTL na RS232 . . . . .	26
6.9	Bluetooth modul . . . . .	27
6.10	Deska plošných spojů . . . . .	27
6.11	Cena komponentů . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Vývoj zařízení - Konstrukce</b>	<b>29</b>
7.1	Schéma zapojení . . . . .	29
7.2	Návrh DPS . . . . .	32
7.3	Sestavení výsledného zařízení . . . . .	33
<b>8</b>	<b>Vývoj zařízení - Řídící software</b>	<b>35</b>
8.1	Programovací jazyk . . . . .	35
8.2	Vývojové prostředí . . . . .	35
8.3	Použité knihovny . . . . .	36
8.4	Členění kódu . . . . .	36
<b>9</b>	<b>Testování</b>	<b>38</b>
9.1	Testování během vývoje . . . . .	38
9.2	Testování výsledného zařízení . . . . .	38
9.3	Testování DCF77 . . . . .	38
9.4	Testování GNSS modulu . . . . .	39
9.5	Testování NTP serveru . . . . .	39
9.6	Porovnání získaných časů . . . . .	39
<b>10</b>	<b>Závěr</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam zkratek</b>	<b>43</b>
	<b>Literatura</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>47</b>

# Seznam obrázků

4.1	Schéma konverze časových údajů . . . . .	16
5.1	Schéma signálu DCF 77 [12] . . . . .	18
6.1	Arduino UNO R4 ve verzi WiFi [15] . . . . .	21
6.2	Arduino Mega [3] . . . . .	21
6.3	Přijímač radiového signálu DCF77 [7] . . . . .	22
6.4	GNSS přijímač Ublox NEO-M8T [9] . . . . .	23
6.5	GNSS přijímač Ublox NEO 7M [7] . . . . .	23
6.6	Čtečka Micro SD karet [7] . . . . .	23
6.7	Rotační enkodér [7] . . . . .	24
6.8	OLED displej [7] . . . . .	24
6.9	Hlasový modul [15] . . . . .	25
6.10	Reproduktor [3] . . . . .	25
6.11	Modul s RGB LED [7] . . . . .	26
6.12	Převodník TTL na RS232 [15] . . . . .	26
6.13	Bluetooth modul HC-05 [7] . . . . .	27
6.14	Výsledná DPS . . . . .	27
7.1	Výstupy pinů pro Arduino UNO R4 [3] . . . . .	29
7.2	Schéma zapojení komponentů pro Arduino Uno . . . . .	30
7.3	Ukázka návrh DPS v softwaru Autodesk Eagle . . . . .	33
7.4	Ukázka osazené DPS pro prototyp zařízení . . . . .	33
7.5	Prototyp zařízení . . . . .	34
8.1	Arduino IDE . . . . .	35
8.2	Zjednodušené schéma řídicího programu . . . . .	37
9.1	Histogram počtu synchronizací . . . . .	39



# Seznam tabulek

4.1	Rozdíly azimutů Slunce v závislosti na rozdílu časů UTC . . . . .	16
6.1	Porovnání kapacity paměti Arduina UNO R3 a R4 [3] . . . . .	20
6.2	Cena použitých součástek . . . . .	28
9.1	Porovnání časů z různých zdrojů . . . . .	40

# 1 Úvod

V minulosti bylo velmi obtížné určit přesnou polohu objektů na Zemi. Poloha objektů na Zemi byla určována především pomocí geodetické astronomie. Určovaly se astronomické zeměpisné souřadnice (astronomická zeměpisná šířka a astronomická zeměpisná délka) a astronomické azimuty. Během astronomického měření se na rozdíl od klasické geodézie měří na pohyblivé cíle a je tedy nutné zaznamenávat i čas jednotlivých měření. Přesnost určení času má významný vliv na přesnost konkrétních výsledků.

V dnešní době byly metody geodetické astronomie z velké části nahrazeny metodami kosmické geodezie, jako jsou GNSS a VLBI. Avšak pro výukové účely má astronomické měření stále svůj význam. V současné době se v rámci výuky teoretické geodezie zaměřují astronomické azimuty na Slunce. Během tohoto měření se synchronizují stopky (zpravidla na chytrém telefonu) pomocí analogového přijímače signálu DCF77 ručně, a při vlastním měření se záznam provádí druhou osobou na slovní pokyn měřiče. To je příčinou velkých nepřesností v určení času, které negativně ovlivňují výsledky celého astronomického měření.

Cílem této práce je navrhnout a vytvořit zařízení schopné přijímat a zaznamenávat koordinovaný čas pro účely astronomického měření (Astrochronograf). Toto zařízení by mělo být schopno automaticky synchronizovat svůj vnitřní čas, aby nedocházelo k chybě z ruční synchronizace. Mělo by být jednoduché na ovládání tak, aby mohl astronomické měření snadno provádět i jednotlivec, díky čemuž se eliminuje prodleva způsobená slovním pokynem. Zařízení by mělo být také schopné informovat měřiče o průběhu měření, včetně stavu synchronizace a posledního změřeného času, a umožnit snadný export přehledně zaznamenaných měřených dat.

Výsledné zařízení by mělo být testováno, aby byla ověřena jeho funkčnost. Dále by mělo být zjištěno, jak přesně je zařízení schopno synchronizovat svůj vnitřní čas, jak přesně je schopné zaznamenat měřený čas a jaký vliv má zlepšení určení času na konečné výsledky astronomického měření.

## 2 Rešerše

Nepodařilo se dohledat žádnou práci, která by se zabývala explicitně tvorbou zařízení pro příjem a záznam koordinovaného času pro účely astronomického měření. Podařilo se však dohledat zdroje, které se zabývají souvisejícími tématy. Geodetickou astronomií se zabývají skripta:

1. Geodetická astronomie 10: Toto skriptum bylo vydáno nakladatelstvím ČVUT a zabývá se obecně geodetickou astronomií. Ve skriptu je popsána nauka o čase, metody geodetické astronomie, přístroje pro astronomické měření včetně přístrojů pro měření času. Skriptum dále obsahuje rozbor přesnosti pro astronomické měření a zmiňuje i požadavky na přesnost určení času [13].
2. Geodetická astronomie I. a základy kosmické geodézie: Toto skriptum, bylo vydáno nakladatelstvím VUTIUM a zabývá se geodetickou astronomií a kosmickou geodézií. Pro tuto práci je v něm důležitá především kapitola o časech a časových systémech [8].

Tvorbou zařízení, které umí synchronizovat svůj vnitřní čas se zabývají práce:

1. „Časový normál pro centralizovanou správu elektronických hodin“: Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací hodinové ústředny, která po zisku časového normálu vzdáleně řídí elektronické hodiny. K synchronizaci času tato práce využívá tři nezávislé zdroje (DCF77, GPS a NTP server) [19].
2. „Elektronické hodiny“: Tato bakalářská práce se zabývá synchronizací času pomocí DCF77 a GPS přijímače [11].
3. „Synchronizace času pro odloučená měřicí stanoviště“: Tato diplomová práce se zabývá tvorbou zařízení, které pomocí signálu DCF77 synchronizuje čas osobního počítače [26].

## 3 Teorie - Čas

Aby bylo možné měřit čas, je potřeba sledovat periodicky se opakující jev. V minulosti se předpokládalo, že rotace Země je rovnoměrná, a tak se pro měření času využívalo měření zdánlivého pohybu nebeských objektů, který je daný rotací Země kolem své osy. Časy vycházející z rotace Země se nazývají rotační časy. Vzhledem k nerovnoměrné rotaci Země, způsobené vlivem precese a nutace, bylo potřeba definovat čas přesněji. K tomu se využívají fyzikálně definované časy, které nejsou navázané na rotaci Země [8].

### 3.1 Rotační časy

Všechny rotační časy jsou odvozené od nerovnoměrné rotace Země a jsou tedy také nerovnoměrné. Rotační časy lze dělit na místní a světové. Místní časy se vztahují k astronomické zeměpisné délce pozorovatele  $\lambda$ . Světové (greenwichské) jsou vztaženy k základnímu (greenwichskému) poledníku. Podle toho, zda rotační časy vychází ze zdánlivého pohybu jarního bodu  $\Upsilon$  nebo Slunce, je lze dále dělit na časy hvězdné a časy sluneční [13].

#### 3.1.1 Rotační časy hvězdné

Hvězdné časy jsou definovány jako hodinový úhel jarního bodu  $\Upsilon$ . Světové hvězdné časy jsou vztaženy k základnímu (Greenwichskému) poledníku a jsou tedy definovány jako úhel, který je měřený mezi směrem k jarnímu bodu  $\Upsilon$  a základním poledníkem v rovině rovníku. Místní hvězdné časy jsou definovány analogicky, avšak namísto k základnímu poledníku se vztahují k místnímu poledníku. Hvězdný den je definovaný jako časový interval mezi dvěma po sobě jdoucími horními kulminacemi jarního bodu. Dále lze hvězdné časy dělit na pravé a střední. Pravé hvězdné časy jsou vztaženy k pravému jarnímu bodu a jsou ovlivněny precesí i nutací. Střední hvězdné časy jsou vztaženy ke střednímu jarnímu bodu a jsou ovlivněny pouze precesí. Rozdíl pravého místního hvězdného času  $s$  a pravého světového hvězdného času  $S$  je totožný, jako rozdíl středního místního hvězdného času  $\bar{s}$  a středního světového hvězdného času  $\bar{S}$ . Tento rozdíl je zároveň roven astronomické zeměpisné šířce místního poledníku  $\lambda$  [13].

$$s - S = \bar{s} - \bar{S} = \lambda \quad (3.1)$$

### 3.1.2 Rotační časy sluneční

Smysl zavedení slunečních časů spočívá v tom, že sluneční časy korespondují s naším vnímáním světla a tmy. Sluneční den je definován jako časový interval mezi dvěma po sobě jdoucími dolními kulminacemi Slunce. V důsledku rotace Země kolem Slunce urazí Země každý den v rovině ekliptiky více než  $1^\circ$ , což mění směr ke Slunci a způsobuje, že sluneční den je zhruba o 4 minuty delší, než hvězdný den [8]. Sluneční časy lze rozdělit na pravé sluneční časy a střední sluneční časy. Pravé sluneční časy vychází ze zdánlivého pohybu pravého (skutečného) Slunce. Střední sluneční časy vychází z pohybu fiktivního středního Slunce, které se pohybuje rovnoměrně v rovině rovníku. Často používaným časovým standardem je střední světový sluneční čas (UT) [13].

## 3.2 Fyzikální časy

Fyzikálně definované časy vznikly kvůli nedostatečné přesnosti rotačních časů, způsobené nerovnoměrnou rotací Země. Pro dosažení vyšší přesnosti při určování času je zapotřebí měřit stabilnější, periodicky se opakující jev. V praxi se nejčastěji využívají hodiny, které jsou založené na měření kmitání atomu cesia. Tyto hodiny se nazývají cesiové atomové hodiny. Z měření kmitů atomu cesia vychází atomová sekunda, která je základní jednotkou času podle mezinárodního systému jednotek (SI) [13].

## 3.3 Časové soustavy

Jelikož je čas odvozený z rotace Země nerovnoměrný, tak mezinárodní časová služba (BIH) zavedla soustavu světových časů [8].

### 3.3.1 Univerzální čas UT0

Jde o střední světový sluneční čas (UT), který je vázaný k místu měření, jelikož je ovlivňován pohybem pólu vzhledem k danému místu měření [13].

### 3.3.2 Univerzální čas UT1

Nerovnoměrnosti v čase UT0, způsobené kolísáním pravého pólu, jsou v čase UT1 eliminovány zavedením redukce na střední polohu pólu  $\Delta\lambda_p$  [13].

$$UT1 = UT0 - \Delta\lambda_p \quad (3.2)$$

### 3.3.3 Mezinárodní Atomový čas (TAI)

Mezinárodní atomový čas (TAI, Temps Atomique International) je získán prostřednictvím měření času množstvím nejpřesnějších atomových hodin po celém světě. Časy jednotlivých hodin se liší vlivem systematických chyb a vlivem relativistických efektů. Po zavedení oprav pro každé atomové hodiny, je mezinárodní atomový čas (TAI) získán jako vážený průměr časů všech zapojených hodin [13] [8]. Z TAI vychází i GPS čas, který byl zvolen tak, aby se rovnal času UTC v epoše GPS 6. ledna 1980 [14]. Vztah mezi TAI a GPS časem je:

$$GPS = TAI - 19\text{ s} \quad (3.3)$$

### 3.3.4 Univerzální koordinovaný čas (UTC)

Jelikož TAI není vázaný na rotaci Země a UT1 je nerovnoměrný, byl zaveden univerzální koordinovaný čas (UTC). Ten vychází z TAI, ale je uměle udržován v blízkosti rotačního času UT1. Délka sekundy TAI i UTC je shodná. Vlivem nerovnoměrné rotace Země se přidává přestupná sekunda, která udržuje čas UTC v blízkosti UT1. Rozdíl mezi UTC a UT1 je nazýván DUT1 a nikdy nepřesáhne hodnotu  $\pm 0,9\text{s}$ . Rozdíl mezi TAI a UTC je počet přestupných sekund  $n$  [13].

$$DUT1 = UT1 - UTC \quad (3.4)$$

$$n = TAI - UTC \quad (3.5)$$

UTC se běžně používá jako občanský čas. Vychází z něj i pásmové varianty SEČ a SELČ, které vznikají přičtením jedné, respektive dvou hodin. UTC slouží také pro tvorbu rádiových časových signálů [13].

## 4 Teorie - Astronomické měření

Astronomické měření bylo na našem území prováděno od roku 1863 do roku 1974. Metody měření se v průběhu času měnily v závislosti na aktuálním vědeckém poznání a na přesnosti, s jakou bylo možno určovat čas. Například měření zeměpisné délky vztahené k základnímu poledníku byla započata až roku 1927, díky existenci rádiových časových signálů. Astronomické měření bylo prováděno především v rámci astronomicko-geodetické sítě (AGS). Body, u nichž byly určeny astronomické zeměpisné souřadnice a astronomický azimut, se nazývají Laplaceovy body [13].

### 4.1 Astronomické azimuty

V rámci výuky Teoretické geodézie na FSv ČVUT se měří pouze astronomické azimuty Slunce metodou určení hodinového úhlu, a tak zde bude zmíněn pouze požadavek přesnosti určení času pro toto měření. Výpočet astronomického azimutu vychází se vztahu:

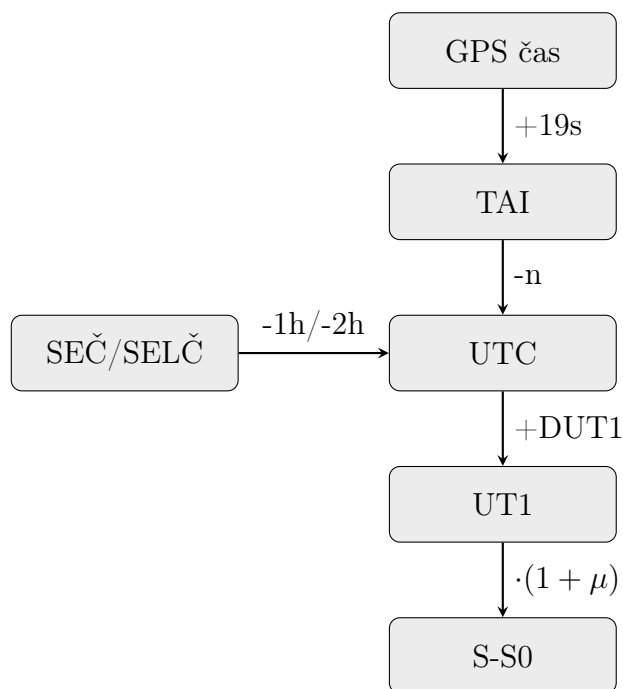
$$\operatorname{tg}(A) = \frac{\sin(t)}{\sin(\varphi) \cdot \cos(t) - \cos(\varphi) \cdot \operatorname{tg}(\delta)} \quad (4.1)$$

kde  $\delta$  je deklinace Slunce a lze ji zjistit například z astronomických tabulek a  $t$  je hodinový úhel získaný ze vztahu:

$$t = S + \lambda - \alpha \quad (4.2)$$

kde  $\alpha$  je rektascenze Slunce a lze ji zjistit například z astronomických tabulek

$S$  je pravý světový hvězdný čas, který je ovlivněn precesí i nutací a lze jej dopočítat z různých časů pomocí vztahů popsanych v kapitole 3 [13]. Způsob převodu mezi různými časy je naznačen zde:



\* $S_0$  je světový hvězdný čas pro 0h UT1 [h] v den pozorování

\* $\mu$  lze dohledat v astronomických tabulkách

Obrázek 4.1: Schéma konverze časových údajů

Do výpočtu tedy vstupují zeměpisné souřadnice stanoviště a čas měření na Slunce, zbylé hodnoty lze zjistit z astronomických tabulek a bulletinu mezinárodní služby IERS. Experimentálním dosazením hodnot do vztahů (4.1) pro zeměpisné souřadnice stanoviště  $50^\circ$  s. š. a  $15^\circ$  v. d. a hodnot vycházejících z časů UTC lišících se o 1s 0.1s a 0.01s byl orientačně zjištěn vliv chyby v určení času na výsledný astronomický azimut Slunce.

Tab. 4.1: Rozdíly azimutů Slunce v závislosti na rozdílu časů UTC

$\Delta$ UTC [s]	Rozdíl azimutů ["]	Rozdíl azimutů [ $^{\circ}$ ]
1	13.93	43.01
0.1	1.39	4.30
0.01	0.13	0.43

Z tabulky vyplývá, že aby byla chyba v určení azimutu Slunce menší než jedna úhlová vteřina, je potřeba určovat čas s přesností na setiny sekund.



## 5 Teorie - Možnosti určení času

Existuje mnoho možností, jak synchronizovat čas. Mezi nejběžnější patří synchronizace pomocí internetu, rádiového signálu nebo GNSS přijímače.

### 5.1 Internet

Na internetu jsou dostupné zdroje poskytující informace o aktuálním koordinovaném světovém čase UTC. Hlavní výhodou synchronizace času pomocí internetu je její snadná dostupnost. Tato metoda je dostupná celosvětově na všech místech s připojením k internetu. Nevýhodou je, že může být přesnost synchronizace času ovlivněna latencí internetového připojení. Nejčastěji se lze setkat s API a NTP servery.

#### 5.1.1 API

Application Programming Interface (API) je rozhraní, které slouží pro předávání dat mezi softwarovými aplikacemi. API může být použito k získání času z webové služby. Například, World Time API slouží pro získání aktuálního času a poskytuje čas pro konkrétní časová pásma ve tvaru Unixového času, nebo ve tvaru podle ISO8601. Data jsou poskytována ve formátu prostého textu nebo jako JSON [25].

#### 5.1.2 NTP

Network Time Protokol (NTP) servery jsou nejběžněji využívaným zdrojem pro synchronizaci času přes internet. NTP je navržený tak, aby na něj neměla velký vliv proměnlivá latence internetového připojení. K posílání informací slouží v NTP serverech takzvané *packety*, které obsahují vždy menší množství dat. K omezení vlivu latence internetového připojení jsou využívány sofistikované algoritmy, díky nimž se přesnost synchronizace času pohybuje do 10 ms [23]. Příkladem NTP serveru je Google Public NTP a NTP Pool [16].

### 5.2 Rádiový signál

Existují vysílače, které vysílají informace o čase pomocí radiových vln. Tyto signály jsou obvykle velmi přesné, ale jejich příjem může být ovlivněn atmosférickými podmínkami nebo rušením signálu. Příkladem těchto vysílačů jsou WWVB v USA, MSF ve Velké Británii a DCF77 v Německu. V minulosti existoval v ČR vysílač OMA 50, který od roku 1995 není v provozu [21].

### 5.2.1 DCF77

Vzhledem k omezenému dosahu rádiového signálu má na území ČR smysl uvažovat o využití pouze signálu DCF77. Vysílač DCF77 vysílá čas vycházející z měření cesiových atomových hodin Fyzikálně-technického institutu v Braunschweigu (PTB). Tento vysílač vysílá dlouhovlnné rádiové vlny na kmitočtu 77,5 kHz. Výkon vysílače je 50kW. Vysílač vysílá nepřetržitě od roku 1970 a odstaven je jen velmi výjimečně z důvodů údržby. Teoretický dosah vysílače je uváděn až 2000 km, což však platí jen za ideálních podmínek. Dosah vysílače i za méně příznivých podmínek je udáván 1100 km, což stále pokrývá celé území České republiky.[18] Název DCF77 vychází z označení:

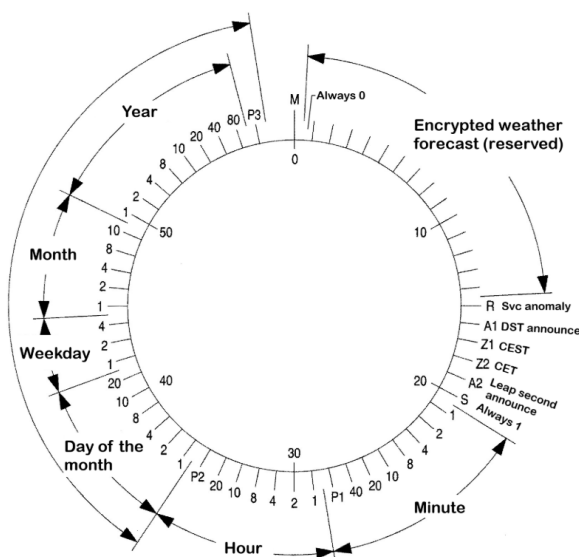
**D** – Deutschland (Německo)

**C** – Označení pásma dlouhých vln

**F** – Frankfurtský region

**77** – Vysílací frekvence (77,5 kHz)

**Časový kód signálu DCF77:** Každou minutu vysílač vysílá informaci o minutě, hodině, dni v týdnu, měsíci a roku pomocí amplitudové modulace. Tato informace platí vždy pro následující minutu [12]. Dále je signál modulován pomocí pseudonáhodné fázové modulace, která slouží pro přenos pseudonáhodného šumu, který lze využít pro přesnější určení času [21] [5].



Obrázek 5.1: Schéma signálu DCF 77 [12]

**Rušení signálu DCF77:** Signál DCF77 se šíří ohybem po povrchu Země a odrazem od ionosféry. Odrazy od ionosféry jsou přes den slabé, a proto je signál během dne slabší. Signál DCF77 je rušen z několika zdrojů. Jedním zdrojem rušení je atmosférický šum způsobený činností ionosféry a může dosahovat velikosti až 80 dB. Atmosférický šum je proměnlivý. Dále může být signál rušen průmyslovou činností, například vlivem vysokonapětového vedení [2] [22].

## 5.3 GNSS

Pro určení času lze využít globální navigační satelitní systémy (GNSS) jako je GPS, GLONASS nebo Galileo. Družice těchto systémů vysílají časové informace spolu s navigačními daty. Na satelitech těchto systémů jsou obvykle cesiové atomové hodiny a záložní rubidiové atomové hodiny, které poskytují velmi přesný zdroj času. Signál z těchto družic jsou schopny přijímat GNSS přijímače. Signál je ovšem z důvodu tranzitní doby opožděn. Pokud přijímač přijímá v jednu epochu signál alespoň ze čtyř družic, je schopen spočítat opravu hodin přijímače a tím získat svůj přesný čas. Tento čas poskytují GNSS přijímače prostřednictvím NMEA zprávy.

Je potřeba si uvědomit, že například GPS družice pracují v GPS čase, který je odlišný od času UTC. Součástí NMEA zprávy \$GNZDA je však už čas přepočítaný do UTC [24]. Tato metoda poskytuje velmi přesný čas a je dostupná kdekoli na Zemi, ale vyžaduje přímý výhled na oblohu pro příjem signálů od alespoň čtyř satelitů, aby bylo možné spočítat i opravu hodin přijímače.

## 6 Vývoj zařízení - Komponenty

### 6.1 Vývojová deska

Vývojová deska je elektronické zařízení skládající se z desky plošných spojů, mikrokontroléru a k němu připojených dalších periférií. Mikrokontrolér je malý počítač na jednom integrovaném obvodu, který může obsahovat jedno nebo více jader procesoru, paměť pro uložení programu, operační paměť a programovatelné vstupy/výstupy. Mikrokontrolér neobsahuje operační systém a řídicí program na něj bývá nahráný pomocí integrovaného vývojového prostředí (IDE, z anglického Integrated Development Environment). Mikrokontrolér ovládá k němu připojené periférie a další součástky připojené k vývojové desce. Připojením součástek k vývojové desce lze vytvořit nové elektronické zařízení [17].

#### 6.1.1 Arduino Uno

Jako vývojová deska bylo zvoleno Arduino UNO, a to z důvodu jeho poměrně nízké ceny, velkého množství dostupné dokumentace a kompatibilních součástek. Tato vývojová deska, na které je nahráný řídicí program, ovládá všechny ostatní použité komponenty. Nejběžněji se lze setkat s Arduinem UNO R3, které je založené na mikrokontroléru ATmega328P od firmy Atmel. Z důvodu malé kapacity paměti Arduina UNO R3 bylo využito novější Arduino UNO R4. To je založeno na mikrokontroléru Renesas RA4M1, jenž obsahuje procesor ARM Cortex-M4F. Arduino UNO R4 se vyrábí ve verzích Minima a WiFi. Verze WiFi je zaměřena na IoT aplikace a obsahuje navíc mikrokontrolér ESP32-S3 od firmy Espressif s integrovaným WiFi a bluetooth low energy (BLE) modulem. Toho lze využít pro připojení k NTP serveru, nebo odesílání dat [3]. Arduino UNO lze pořídit i v podobě „klonu“, který vyrábí neoficiální výrobce. Tyto „kolny“ bývají obvykle cenově dostupnější než originální desky.

Tab. 6.1: Porovnání kapacity paměti Arduina UNO R3 a R4 [3]

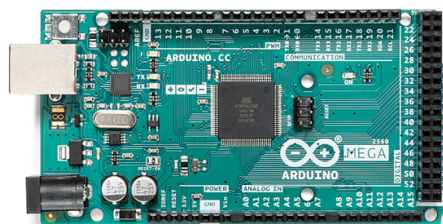
Typ paměti	R3	R4
flash	32 KB	256 kB
SRAM	2 KB	32 kB
EEPROM	1 KB	8 kB



Obrázek 6.1: Arduino UNO R4 ve verzi WiFi [15]

### 6.1.2 Arduino Mega

Vzhledem k nedostatečné kapacitě paměti Arduino UNO R3 se rovněž nabízí možnost využití Arduino Mega. To je založené na mikrokontroléru ATmega2560. Oproti Arduino UNO R3 disponuje větší kapacitou paměti, a oproti oběma verzím Arduino UNO i větším množstvím pinů. Nevýhodou Arduino Mega je větší fyzická velikost a bylo tedy využito jen pro testování během vývoje zařízení [3].



Obrázek 6.2: Arduino Mega [3]

## 6.2 Přijímač časového signálu

Existuje několik způsobů, jak synchronizovat čas Arduino s koordinovaným časem. Jedním z nich je synchronizace času při nahrávání programu do Arduino. Tato metoda však vyžaduje opakované nahrání programu před každým měřením, aby se interní čas aktualizoval. Tato metoda neumožňuje průběžnou synchronizaci a její přesnost je závislá na přesnosti vnitřního času zařízení z něž je program nahráván. Vhodnějšími metodami jsou synchronizace přes internet, využití přijímače DCF77, který přijímá koordinovaný čas pomocí rádiového signálu, nebo využití času z NMEA zprávy z GNSS přijímače. Tyto metody poskytují přesnější a průběžnou synchronizaci času bez nutnosti opakovaného nahrávání programu.

### 6.2.1 Přijímač DCF77

Pro příjem signálu DCF77 je vhodné zvolit anténu, která přijímá především magnetickou složku elektromagnetické vlny, protože elektrická složka vlny je citlivá na výšku antény nad povrchem a bývá výrazně více rušena okolním signálem z jiných elektronických zařízení než magnetická složka. Pro příjem magnetické složky signálu lze využít rámovou anténu, která ale mívá poměrně velké rozměry. Obvykle se používá anténa o průměru 0,5m. Z důvodu kompaktnosti celého zařízení byla zvolena feritová anténa. Pokud by signál z feritové antény nebyl dostatečně silný, je možné pro jeho zesílení přímo na feritovou anténu připojit rámovou anténu s větším průměrem.

Využitý přijímač se skládá z feritového jádra, kolem kterého je vinuta cívka a demodulátoru, který slouží k oddělení modulačního signálu od nosného signálu. Anténa má dvě maxima a dvě minima. Pro příjem maximální intenzity signálu, je vhodné ji umístit kolmo na směr k vysílači. Pokud by docházelo k rušení signálu z jednoho směru, lze to vyřešit tím, že bude anténa natočena minimem ke zdroji rušení [12] [2].



Obrázek 6.3: Přijímač radiového signálu DCF77 [7]

### 6.2.2 Přijímač GNSS

Pro příjem informací o aktuálním čase lze využít i GNSS přijímač. Astrochrograf je navržený tak, že má vyvedený pin D0 Arduina, aby k němu mohl být připojen libovolný GNSS přijímač. Pin D0 na Arduinu Uno funguje jako RX pin pro sériovou komunikaci pomocí UART. GNSS přijímač musí být k RX pinu Arduina připojen pomocí svého TX pinu. Přijímač musí poskytovat NMEA zprávu \$GNZDA, která obsahuje informace o aktuálním čase a zprávu \$GNGGA, která poskytuje informaci o poloze přijímače. Pro vývoj zařízení byl použit aktuálně dostupný GNSS přijímač Ublox NEO-M8T, který je schopen přijímat data ze satelitů GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS a SBAS. Tento přijímač umožňuje i RTK měření. Nevýhodou

přijímače je poměrně vysoká cena. Pro určování času lze využít i přijímače s omezenější funkcionalitou než Ublox NEO-M8T. Například levnější přijímač Ublox NEO-M7M, který přijímá data ze satelitů GPS, GLONASS, Galileo a QZSS. Tento přijímač neumožňuje měření RTK, což není pro určování času potřeba.



Obrázek 6.4: GNSS přijímač Ublox NEO-M8T [9]



Obrázek 6.5: GNSS přijímač Ublox NEO 7M [7]

### 6.3 Čtečka Micro SD karet

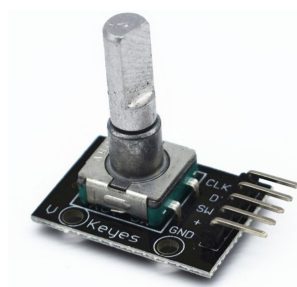
Protože Arduino samo o sobě nemá paměť pro ukládání dat, tak byla pro ukládání měřených dat využita Micro SD karta. Čtečka Micro SD karet umožňuje zapisovat měřená data na Micro SD kartu a popřípadě je z ní i číst. Pro komunikaci s čtečkou Micro SD karet je využíváno standardní SPI rozhraní [6].



Obrázek 6.6: Čtečka Micro SD karet [7]

## 6.4 Tlačítko

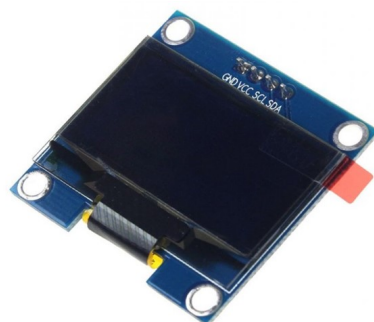
Tlačítko je jednoduchý komponent, sloužící pro detekci svého stisknutí. Stisknutí tlačítka slouží k provedení záznamu času na Micro SD kartu. Místo samostatného tlačítka byl využit modul rotačního enkodéru, který umí detekovat své stisknutí a při pootočení osou poskytuje informaci o směru rotace. Výhodou rotačního enkodéru oproti tlačítku je, že poskytuje další informace, které lze využít k ovládání zařízení. Výhodou tohoto konkrétního modulu je to, že jej lze snadno upevnit ke krabičce s výsledným zařízením.



Obrázek 6.7: Rotační enkodér [7]

## 6.5 OLED displej

K informování měřiče o průběhu měření slouží mimo jiné displej. Na něj se zobrazuje informace o stavu vložení Micro SD karty, o stavu synchronizace času, aktuální čas a poslední uložený čas. Jako displej byl zvolen OLED displej především kvůli nízké ceně, dobré čitelnosti, nízké spotřebě energie a absenci potřeby dodatečného podsvícení, jelikož světélkují samotné pixely. Displej je monochromatický a jeho rozlišení je 128×64 bodů. K řízení displeje je využívána komunikace pomocí I<sup>2</sup>C sběrnice [6].

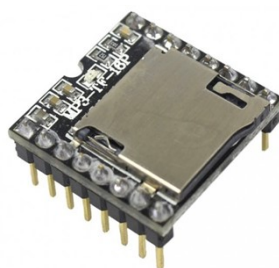


Obrázek 6.8: OLED displej [7]



## 6.6 Hlasový modul

O průběhu měření je měřič informován kromě displeje i pomocí reproduktoru, tak aby nemusel při měření sledovat displej. Měřiče o průběhu měření informují slovní pokyny „Čas byl synchronizován“ a „Měření času bylo uloženo“, které byly vytvořeny pomocí převodu textu na mp3 soubor. Jelikož Arduino neumožňuje ukládat žádné soubory do své vnitřní paměti, tak jsou mp3 soubory se zvukovými informacemi nahrány na Micro SD kartu. Soubory jsou z Micro SD karty čteny pomocí hlasového modulu a přehrávány pomocí reproduktoru, který je k hlasovému modulu připojen. Hlasový modul s Arduinem komunikuje prostřednictvím sériové komunikace [6].



Obrázek 6.9: Hlasový modul [15]

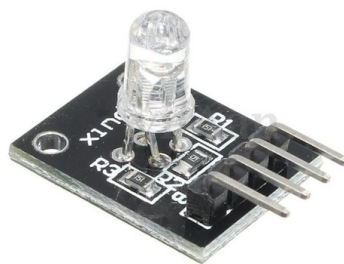


Obrázek 6.10: Reprodukter [3]

## 6.7 RGB LED

Kromě displeje a zvukového signálu je měřič informován o průběhu měření také prostřednictvím elektroluminiscenční diody (LED, z anglického Light Emitting Diode). Jako elektroluminiscenční dioda (LED) je využit modul RGB LED, který se skládá ze tří samostatných LED (červená, zelená, modrá). Tyto LED mají společnou katodu, ale samostatné anody. K ovládání jasu jednotlivých barev slouží pulzně šířková modulace (PWM). Jednotlivé anody lze nezávisle na sobě připojit na piny s

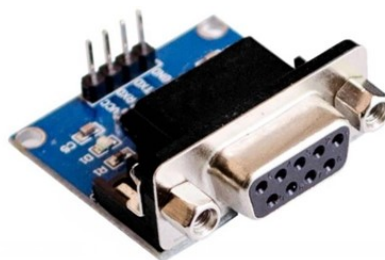
podporou PWM, což umožňuje ovládat samostatně jednotlivé barvy. Další výhodou tohoto modulu je, že již má integrované ochranné rezistory. Během měření může LED signalizovat různé stavy: Nejprve bliká červeně v každý okamžik, kdy přijme signál DCF77 (v ideálním případě je to jednou za sekundu). Ve chvíli, kdy je čas poprvé synchronizován se změni červené blikání na zelené, což informuje měřiče o úspěšné synchronizaci času. Dále LED bliká modře v každý okamžik, kdy měřič provede měření [6].



Obrázek 6.11: Modul s RGB LED [7]

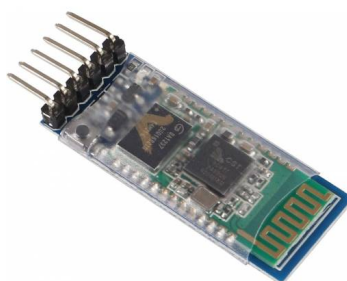
## 6.8 Převodník TTL na RS232

Aby byl spolu s časovými údaji uložen na Micro SD kartu vodorovný směr (a případně i zenitový úhel) měřený totální stanicí, je potřeba zajistit komunikaci Arduina s totální stanicí. K tomu lze využít sériovou komunikaci pomocí UART. Konkrétně byla využita totální stanice Leica TC1700. Ta využívá pro sériovou komunikaci standart RS-232 a lze k ní tedy připojit sériový kabel RS-232 [1]. Standart RS-232 využívá pro datové signály +3 V až +25 V jako logickou nulu a -3 V až -25 V jako logickou jedničku. Arduino UNO využívá protokol TTL, který považuje hodnoty okolo 0 V za logickou nulu a hodnoty v okolí +5 V za logickou jedničku. Aby mohl být kabel RS-232 připojen i k Arduino, je potřeba využít převodník TTL na RS-232 [4].



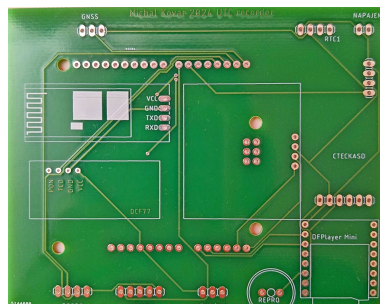
Obrázek 6.12: Převodník TTL na RS232 [15]

Pro export dat z Micro SD karty, aniž by bylo potřeba ji vyjmout, lze využít Bluetooth modul. Konkrétně byl pro tento účel využit modul HC-05. Tento modul využívá sériovou komunikaci pomocí UART a podporuje Bluetooth ve verzi 2.0. Pomocí Bluetooth modulu lze přenášet binární data. Modul je připojen pomocí pinů GND, VCC, RX a TX. Kromě toho obsahuje piny STATE a EN, které slouží pro konfiguraci modulu. Pin EN na modulu HC-05 umožňuje přepnutí modulu do režimu „enabled“. V tomto režimu lze pomocí AT příkazů nastavit jméno, heslo, popřípadě i baud rate a další parametry modulu [6].



Obrázek 6.13: Bluetooth modul HC-05 [7]

Během vývoje zařízení byly všechny komponenty spojovány pomocí kabelů. Nevýhodou propojení pomocí kabelů je velká prostorová náročnost a celková nepřehlednost. Z toho důvodu bývá obvykle propojení různých komponentů realizováno pomocí desky plošných spojů. Pro snadné propojení všech využitých komponentů byla tedy vyhotovena deska plošných spojů (DPS).



Obrázek 6.14: Výsledná DPS

## 6.11 Cena komponentů

Ceny jednotlivých komponentů se mění v čase a mohou se lišit v závislosti na místě (obchodě), kde byly zakoupeny. Cena výsledného zařízení závisí na tom, zda byly použity všechny komponenty pro plnou funkcionalitu, nebo zda byly některé funkce vynechány. Pokud se zařízení vyrábí s omezenou funkcionalitou, lze využít levnější Arduino UNO R3. Náklady na výsledné zařízení lze také snížit použitím „klonů“ místo originálního Arduina. Níže uvedená tabulka obsahuje komponenty potřebné pro zařízení s plnou funkcionalitou a uvádí ceny, za které byly tyto komponenty zakoupeny.

Tab. 6.2: Cena použitých součástek

Název	Cena	Odkaz na obchod
Arduino UNO R4 WiFi	768 Kč	<a href="https://laskakit.cz">laskakit.cz</a>
Přijímač DCF77	5,60 €/140 Kč	<a href="https://pollin.de">pollin.de</a>
Přijímač GNSS	339 Kč	<a href="https://dratek.cz">dratek.cz</a>
Čtečka Micro SD karet	24 Kč	<a href="https://dratek.cz">dratek.cz</a>
Tlačítko (rotační enkodér)	38 Kč	<a href="https://dratek.cz">dratek.cz</a>
OLED displej	167 Kč	<a href="https://dratek.cz">dratek.cz</a>
Hlasový modul	66 Kč	<a href="https://dratek.cz">dratek.cz</a>
Reproduktor	19 Kč	<a href="https://dratek.cz">dratek.cz</a>
RGB LED	15 Kč	<a href="https://dratek.cz">dratek.cz</a>
Bluetooth modul HC-05	117 Kč	<a href="https://dratek.cz">dratek.cz</a>
Deska plošných spojů	9,34 \$/216 Kč	<a href="https://allpcb.com">allpcb.com</a>
<b>Celkem</b>	1909 Kč	-

## 7 Vývoj zařízení - Konstrukce

V této kapitole bude vysvětleno zapojení jednotlivých komponentů, které byly popsány v předchozí kapitole. Dále bude popsán návrh desky plošných spojů (DPS), jenž byl vyhotoven v softwaru Autodesk EAGLE. Bude vysvětleno, jak byla DPS osazena jednotlivými komponenty. Nakonec bude popsáno, jak byl vytvořen prototyp výsledného zařízení.

### 7.1 Schéma zapojení

Arduino Uno disponuje různými typy pinů, které lze využít k různým účelům. Při zapojování jednotlivých komponentů je důležité zohlednit specifickou funkcionalitu jednotlivých pinů. Nelze totiž připojit součástky na libovolné piny, ale je nutné je zapojit na piny, které disponují potřebnou funkcionalitou. Jeden pin může mít více funkcí najednou. Piny Arduina mohou sloužit například jako digitální vstupy/výstupy, analogové vstupy, PWM (analogové výstupy s modulací šířky pulzu), RX a TX pro sériovou komunikaci, SDA a SCL pro I<sup>2</sup>C komunikaci nebo jako MISO, MOSI, CLK, a CS pro SPI komunikaci [3].

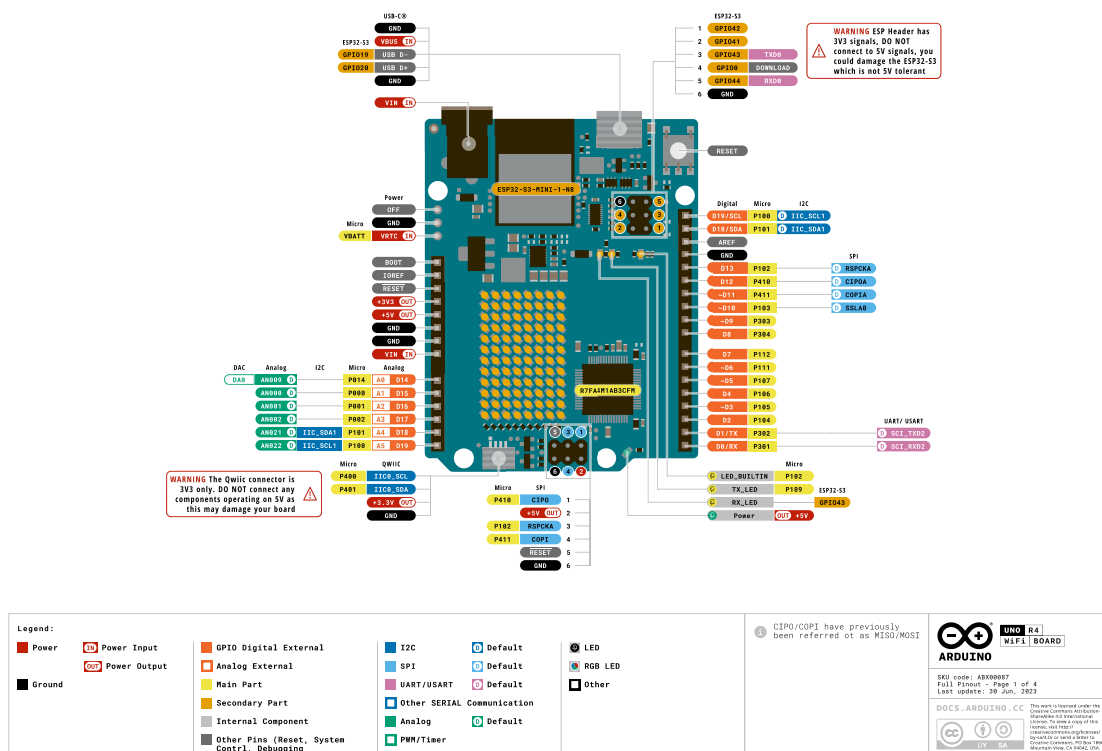
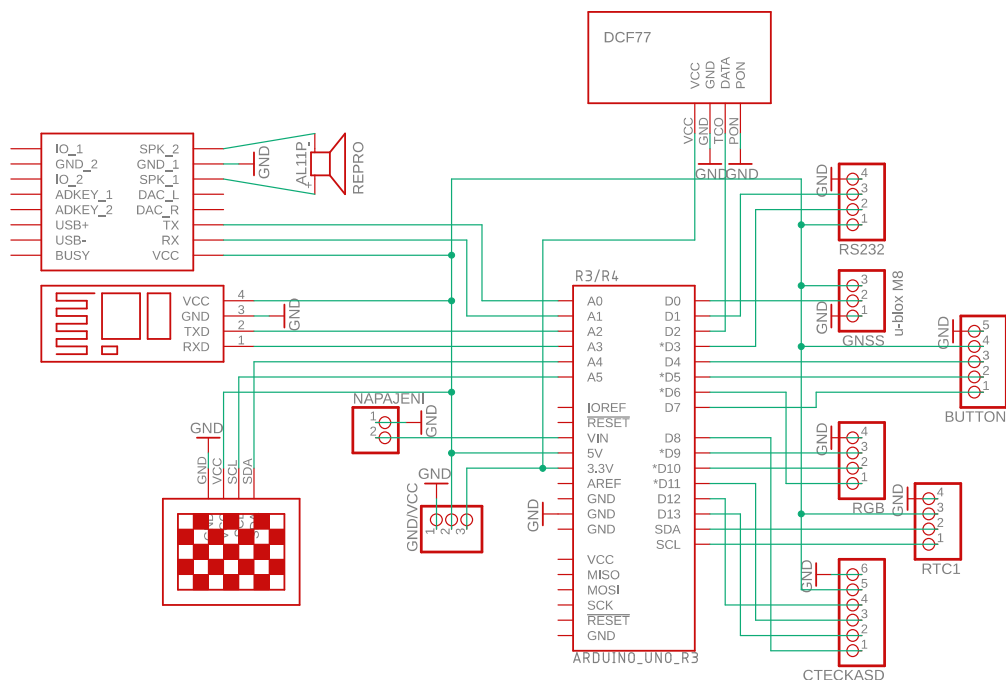


Schéma zapojení bylo vyhotoveno v softwaru Autodesk Eagle. nejprve bylo vyhotoveno schéma zapojení pro Arduino UNO R3 podle toho, jak byly jednotlivé komponenty zapojeny v rámci testování jejich funkčnosti. Toto schéma zapojení sloužilo jako podklad pro tvorbu desky plošných spojů (DPS). Arduino UNO R3 však nedisponuje dostatečnou kapacitou paměti k tomu, aby mohlo obsluhovat všechny plánované komponenty. Pro finální zařízení, které bude disponovat plnou funkcionalitou, bylo proto zvoleno Arduino UNO R4. Vzhledem k tomu, že Arduino UNO R4 má lehce odlišné rozvržení pinů oproti verzi R3, bylo nutné vyhotovit nové schéma zapojení a podle něj i novou DPS. Nové schéma zapojení se povedlo navrhnout tak, že nová DPS je kompatibilní s oběma verzemi Arduino UNO (R3 i R4).



Obrázek 7.2: Schéma zapojení komponentů pro Arduino Uno

### Přijímač časového signálu DCF77

Přijímač poskytuje digitální signál, který odpovídá dekódovaným bitům časového kódu. Tento digitální signál je pak k dispozici na výstupním pinu přijímače (obvykle označeném jako TCO nebo DATA), který je potřeba připojit k digitálnímu vstupu Arduino.

- VCC → 3.3V
- GND → GND
- PON → GND
- TCO → D2

### GNSS přijímač u-blox NEO

Komunikace s Arduinem probíhá pomocí sériové komunikace TTL přes rozhraní UART. Je nutné připojit přijímač k pinům Arduina, které tuto komunikaci umožňují.

- VCC → 5V
- GND → GND
- TX → D0

### Tlačítko (rotační enkodér)

Rotační enkodér poskytuje digitální signály, které odpovídají jeho otáčení a stisknutí tlačítka. Tyto signály lze číst pomocí digitálních pinů Arduina, které mohou sloužit jako digitální vstupy.

- VCC → GND
- GND → 5V
- CLK → D6
- DT → D5
- SW → D4

### OLED displej

OLED displej využívá i<sup>2</sup>C komunikaci a je tedy potřeba jej připojit k pinům, které ji podporují.

- VCC → 5V
- GND → GND
- SDA → A4
- SCL → A5

### Hlasový modul

Hlasový modul využívá sériovou komunikaci. Kvůli nedostatku sériových pinů na Arduinu UNO je použita knihovna SoftwareSerial, která umožňuje emulovat sériovou komunikaci pomocí některých pinů, které nejsou primárně určeny pro sériovou komunikaci.

- VCC → 5V
- GND → GND
- TX → RX
- RX → TX
- SPK1 → reproduktor (+)
- SPK2 → reproduktor (-)

## RGB LED

Pro ovládání jasu světla jednotlivých barev, lze využít piny s podporou pulzně šířkové modulace (PWM), označené symboly „~“.

- R → ~D9
- G → ~D10
- B → ~D11
- GND → GND

## Bluetooth modul HC-05

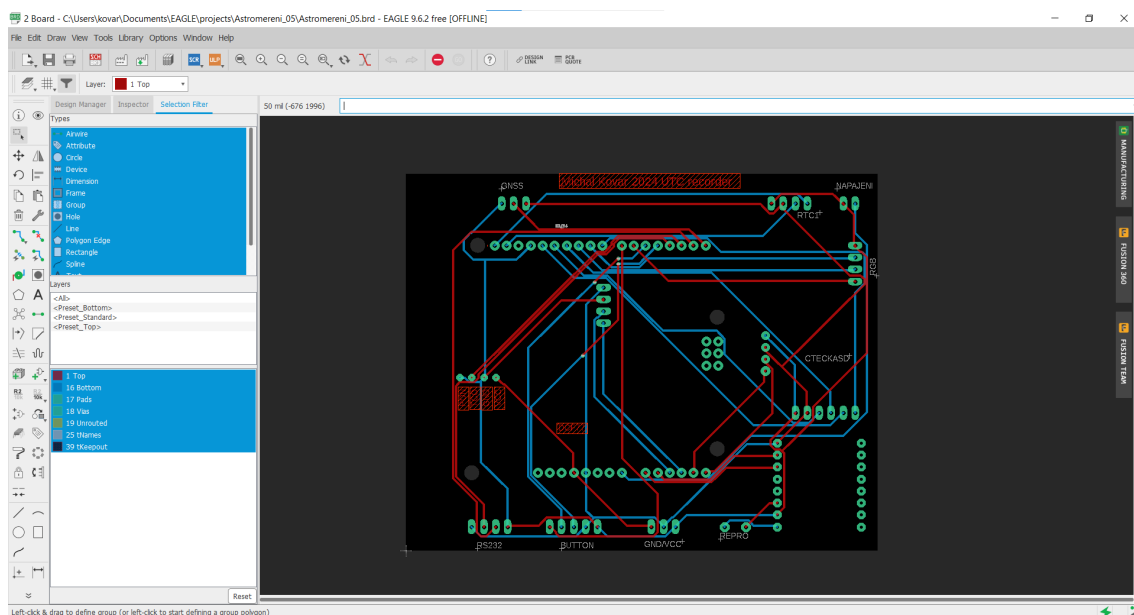
Bluetooth modul HC-05 využívá sériovou komunikaci, ale Arduino UNO nemá dostatečný počet sériových pinů. Proto jsou využity piny, které umožňují softwarovou emulaci sériové komunikace obdobně jako u hlasového modulu.

- VCC → 5V
- GND → GND
- TX → RX
- RX → TX

## 7.2 Návrh DPS

Návrh DPS byl vyhotoven v softwaru Autodesk Eagle. Propojení mezi komponenty vycházeli z již vytvořeného schématu zapojení. Bylo navrženo rozmístění komponentů na DPS. Pomocí funkce „Autorouter“ byly automaticky vygenerovány optimální trasy spojů. Dále byl vyhotoven „gerberfile“. Ten slouží jako podklad pro výrobu. Výroba DPS může být provedena amatérsky. K tomu je potřeba speciální vybavení a určitá zručnost zhotovitele. Vzhledem k náročnosti výroby kvalitní DPS byla zvolena možnost nechat ji vyrobit profesionální firmou, na základě předloženého „gerberfile“. Tím je zajištěno, že je DPS kvalitní a spolehlivá.

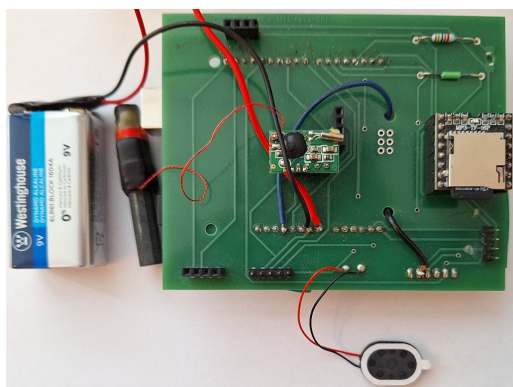




Obrázek 7.3: Ukázka návrh DPS v softwaru Autodesk Eagle

### 7.3 Sestavení výsledného zařízení

Deska plošných spojů byla navržena tak, aby společně s komponenty k ní připojenými bylo výsledné zařízení co nejkompaktnější. K desce byly připájeny další komponenty anebo patice a hřebínky, do kterých budou komponenty zapojeny, aby bylo možné některé komponenty v případě potřeby odpojit nebo vyměnit. Některé součástky, jako tlačítka a displej byly připojeny k desce pomocí kabelů. To umožňuje snadné umístění těchto součástí na vnější část krabičky. Kabely lze snadno odpojit pro případ, že by bylo zařízení potřeba rozebrat například z důvodu výměny nějakého komponentu. Napájení zařízení je řešeno pomocí 9 V baterie, která je propojená s piny VIN a GND Arduina.



Obrázek 7.4: Ukázka osazené DPS pro prototyp zařízení

Nakonec byly všechny komponenty integrovány do krabičky, která slouží jako tělo zařízení (astrochronografu). Tělo prototypu zařízení založeného na Arduino UNO R3 bylo provizorně vytvořeno ze svačinové krabičky, která svými rozměry poměrně dobře vyhovuje potřebám zařízení. Svačinová krabička byla jako tělo zařízení využita z důvodu toho, že je snadno dostupná a není potřeba ji speciálně vyrábět, zároveň je její výhodou vodotěsnost a průhlednost. V budoucnu je v plánu vytvořit vlastní tělo zařízení, které bude kompaktnější a bude přesně vyhovovat účelům zařízení. Do krabičky byly vyvrtány a vyřezány díry pro displej, konektory a tlačítka, které jsou utěsněny silikonem, aby byla zachována vodotěsnost celého zařízení.



Obrázek 7.5: Prototyp zařízení

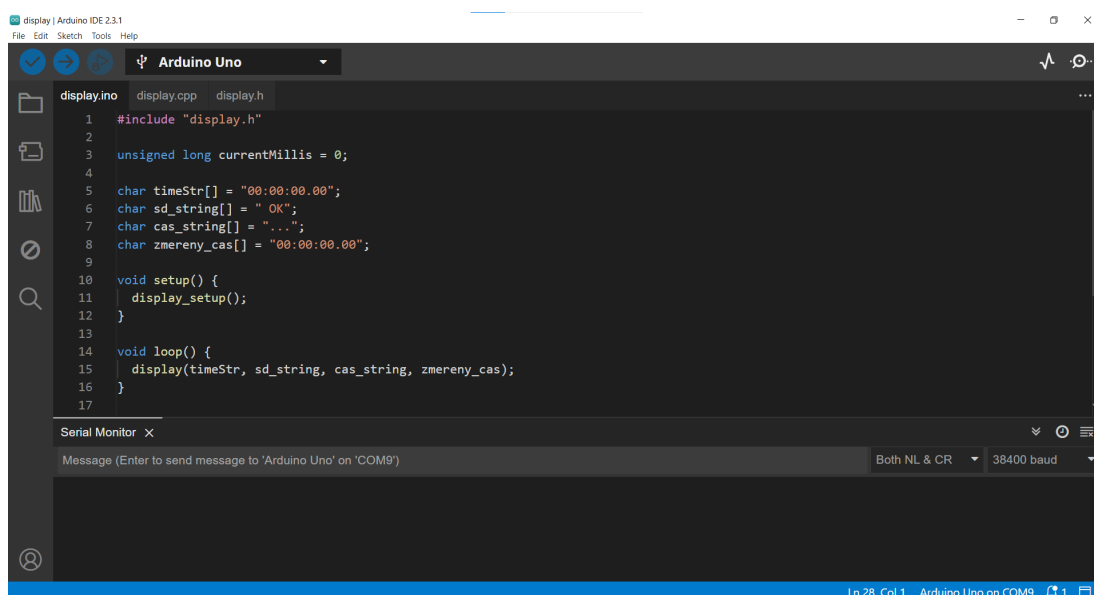
## 8 Vývoj zařízení - Řídící software

### 8.1 Programovací jazyk

Nejběžněji bývá pro tvorbu řídicího programu pro Arduino využívána varianta jazyka C++, která využívá struktury převzaté z jazyka Wiring. Alternativně lze použít jazyky jako MicroPython, JavaScript a další. Ve Wiringu se namísto typické funkce `main` pro C++ používají funkce `setup` pro prvotní inicializaci při spuštění programu a funkce `loop` pro nekonečnou smyčku, která program nepřetržitě vykonává [3].

### 8.2 Vývojové prostředí

Pro tvorbu a nahrání řídicího programu do mikrokontroléru se využívá integrované vývojové prostředí (IDE). Mikrokontroléry, na rozdíl od jednodeskových mikropočítačů, nejsou vybaveny operačním systémem. Nelze tedy tvořit kód přímo na mikrokontroléru, je potřeba jej vytvořit na počítači, zkompileovat a následně nahrát jako binární soubor do mikrokontroléru. Pro tvorbu řídicího programu bylo konkrétně využito Arduino IDE. To nabízí kromě možnosti psaní, kompilování a nahrávání kódu i správu knihoven a čtení dat z Arduina pro ladění kódu. Kromě vývojového prostředí Arduino IDE bylo využíváno prostředí VS Code od společnosti Microsoft, které umožňuje verzování pomocí Gitu a sdílení kódu na platformě GitHub.



Obrázek 8.1: Arduino IDE

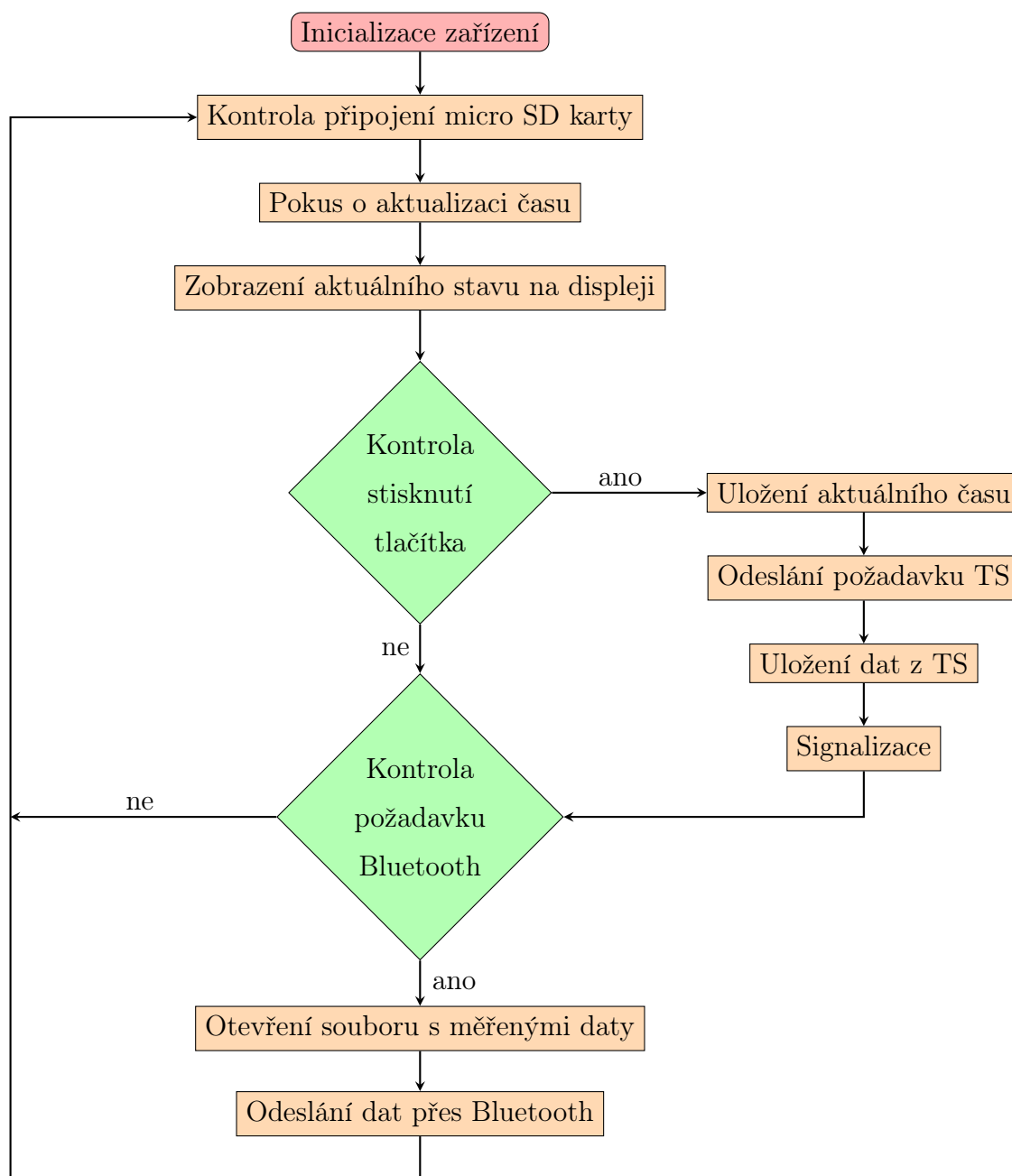
### 8.3 Použité knihovny

Pro práci s některými komponenty byly využity již existující knihovny, které usnadňují využití jejich funkcionality. Knihovna `SoftwareSerial.h` byla využita pro emulaci pinů sloužících pro sériovou komunikaci, protože Arduino UNO obsahuje pouze jeden TX a jeden RX pin, určený pro sériovou komunikaci. Pro práci s údaji o čase byla využita knihovna `TimeLib.h`. Pro synchronizaci času prostřednictvím signálu z DCF77 přijímače byla využita knihovna `DCF77.h`. Tato knihovna obsahuje funkce pro dekódování signálu DCF77. Pro přístup k NTP serveru byly využity knihovny `WiFiS3.h` a `WiFiUdp.h`. Ty slouží pro připojení k WiFi a přijímání a odesílání paketů, které využívá NTP server. Pro práci s Micro SD kartou byla využita knihovna `SD.h`. Tato knihovna obsahuje funkce pro zapisování dat na Micro SD kartu a čtení dat z ní. Pro práci s OLED displejem byla nejprve využívána knihovna `U8glib.h`, která ale není kompatibilní s mikrokontroléry Renesas, a tak byla využita knihovna `U8g2lib.h`. Pro práci s hlasovým modulem byla využita knihovna `DFRobotDFPlayerMini.h`.

### 8.4 Členění kódu

Řídící program byl rozdělen z důvodu přehlednosti na hlavní program (`*.ino`), který sdružuje další části kódu ve formě hlavičkových (`*.h`) a implementačních souborů (`*.cpp`). Během tvorby řídicího programu byly využity již existující knihovny a při tvorbě kódu bylo vycházeno ze vzorových kódů, které k nim byly přiložené v dokumentaci. Nicméně některé části kódu byly vytvořeny zcela nově. Například bylo potřeba zajistit, aby stisknutí tlačítka bylo považováno za stisknutí pouze v prvním průchodu funkcí `loop`, a v dalších průchodech již nebylo tlačítko považováno za stisknuté tak, aby bylo provedeno při každém stisku jen jedno měření a měření bylo přehledné a jednoznačné. Kód pro příjem dat z GNSS přijímače byl vytvořen také kompletně od začátku. V tomto kódu je načítána pomocí sériové komunikace NMEA zpráva. Ta je parsována a je z ní zjišťováno, zda byla určena poloha přijímače. Pokud je určena poloha přijímače lze považovat čas za aktuální. V tom případě je text s časem převeden na číselné hodnoty a s těmi je dále pracováno. Dalším příkladem je funkce `setiny`. Jelikož všechny použité přijímače poskytují data po celých sekundách, tak byla vytvořena funkce `setiny`, která je spuštěna vždy na začátku celé

sekundy a rozděljuje ji na setiny sekund. Při každé nové sekundě jsou setiny sekund vynulovány. Od začátku byla také vyhotovena část kódu pro komunikaci s totální stanicí a další části kódu.



Obrázek 8.2: Zjednodušené schéma řídicího programu

## 9 Testování

### 9.1 Testování během vývoje

Funkčnost jednotlivých komponentů a byla testována v průběhu vývoje řídicího programu. Nejprve byla testována funkčnost každého komponentu samostatně. Poté byly komponenty postupně začleňovány do celkového zařízení a byla testována jejich vzájemná spolupráce a funkčnost jako celek.

### 9.2 Testování výsledného zařízení

Po dokončení prototypu zařízení byla ověřena jeho funkčnost. Protože prototyp je založen na Arduinu UNO R3, má pouze omezenou funkcionalitu. Prototyp umí synchronizovat svůj vnitřní čas buď pomocí DCF77 nebo GNSS přijímače. Tento čas umí po stisknutí tlačítka ukládat na Micro SD kartu. Dále umí informovat měřiče o průběhu měření prostřednictvím displeje, zvuku a diody. Všechny tyto zmíněné funkce byly otestovány a jsou plně funkční.

### 9.3 Testování DCF77

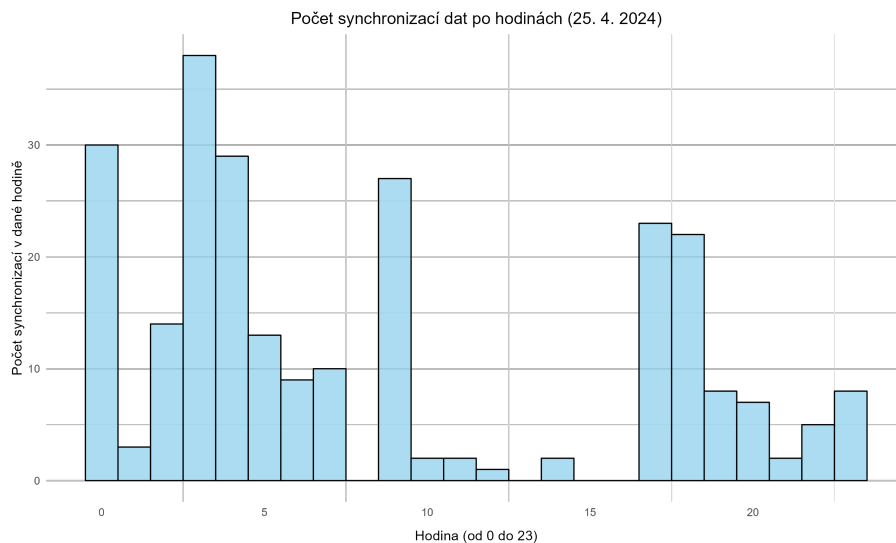
U přijímače signálu DCF77 bylo testováno, jak rychle je schopné výsledné zařízení synchronizovat svůj vnitřní čas a jak často bývá čas synchronizován po první synchronizaci.

#### **Prvotní synchronizace**

Bylo zjištěno, že prvotní synchronizace bývá za vhodných podmínek provedena mezi druhou až třetí minutou od spuštění.

#### **Průběžná synchronizace**

Jak často zařízení synchronizuje svůj vnitřní čas, bylo testováno tím, že bylo zařízení spuštěno po dobu jednoho dne u okna orientovaného na západ. Na Micro SD kartě se vytváří soubor `TEST.TXT`, který obsahuje informace o tom, kdy došlo k aktualizaci času pomocí DCF77. Tato data byla následně zpracována v softwaru R, kde byl vykreslen histogram znázorňující sloupce pro jednotlivé hodiny, přičemž velikost sloupce značí, kolik synchronizací bylo během této hodiny provedeno.



Obrázek 9.1: Histogram počtu synchronizací

## 9.4 Testování GNSS modulu

### Prvotní synchronizace

Bylo zjištěno, že prvotní synchronizace bývá za vhodných podmínek (v exteriéru nebo u okna) provedena během několika sekund.

### Průběžná synchronizace

Po prvotní synchronizaci získává modul čas nepřetržitě, pokud nedojde k přerušení příjmu signálu (stínění antény).

## 9.5 Testování NTP serveru

Čas z NTP serveru bývá získán prakticky okamžitě a pokud nedojde k přerušení internetového připojení získává zařízení čas nepřetržitě.

## 9.6 Porovnání získaných časů

Pro porovnání časů získaných z NTP serveru, přijímače signálu DCF77 a GNSS přijímače byl vytvořen testovací kód pro Arduino UNO R4. Tento kód synchronizuje čas pomocí všech tří zmíněných metod a provádí záznam času každou minutu od spuštění Arduina.

Tab. 9.1: Porovnání časů z různých zdrojů

Arduino čas	NTP	DCF77	GNSS
00:04:00.00	10:27:12.52	10:27:12.55	10:27:12.68
00:05:00.00	10:28:12.50	10:28:12.55	10:28:12.65
00:06:00.00	10:29:12.49	10:29:12.55	10:29:12.64
00:07:00.00	10:30:12.49	10:30:12.54	10:30:12.69
00:08:00.00	10:31:12.48	10:31:12.54	10:31:12.62

Z měřených dat je vidět, že získané časy se od sebe liší na úrovni setin až desetin sekundy. Tyto rozdíly mohou být způsobeny tím, že každý zdroj má lehce rozdílnou přesnost. Nejvíce se liší čas získaný pomocí GNSS přijímače, to může být způsobeno tím, že zpracování NMEA zprávy není dostatečně rychlé a dochází tedy ke zpoždění v určení času. Pokud se chyba v určení času pohybuje na úrovni pod jednu desetinu sekundy, lze očekávat, že chyba výsledného astronomického azimutu Slunce, způsobená určením času, bude mít velikost menší než  $5^{\circ}$ .



## 10 Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit zařízení pro příjem a záznam koordinovaného času určené pro účely astronomického měření (Astrochronograf). Toto zařízení má sloužit jako výuková pomůcka pro měření astronomických azimutů na Slunce v rámci výuky teoretické geodézie.

Práce začala rešerší, během níž byly dohledány zdroje informací, týkající se témat spojených s určováním času. Byly také dohledány cizí práce, které se zabývaly určováním času pro různé účely. Tyto zdroje poskytly informace o tom, jakým vhodným způsobem při tvorbě zařízení lze postupovat.

V teoretické části byly popsány jednotlivé typy časů a převody mezi nimi. Byl rozebrán vliv chyby při určování času na přesnost výsledných astronomických azimutů. Nakonec byly zmíněny způsoby, jak lze synchronizovat čas zařízení.

V praktické části byl navržen Astrochronograf. Byla vytvořena DPS k propojení všech využitých komponentů. Byl vytvořen řídicí kód pro jednotlivé části zařízení. Dále byl vyhotoven prototyp zařízení, který je založen na Arduinu UNO R3. Z důvodu nedostatečné kapacity paměti Arduina UNO R3 má tento prototyp pouze omezenou funkcionalitu. Nicméně umožňuje synchronizaci času prostřednictvím rádiového přijímače DCF77 nebo prostřednictvím GNSS přijímače. Zařízení informuje měřiče o průběhu měření prostřednictvím displeje, LED a zvukových pokynů tak, aby při měření nemusel měřič vizuálně sledovat zařízení.

Komponenty a pro ně vyhotovené řídicí kódy, které nebyly do prototypu zahrnuty, byly samostatně testovány, jsou plně funkční a plánuje se jejich implementace do zařízení. Aby bylo možné tyto komponenty do zařízení implementovat, bude nutné vyměnit Arduino UNO R3 za Arduino UNO R4. Všechny komponenty a jejich řídicí kódy byly testovány i na Arduinu UNO R4, a tak bude potřeba pouze fyzicky propojit komponenty. K tomu bude sloužit nová deska plošných spojů, která je lehce jinak uspořádaná než DPS použitá v prototypu. Změna uspořádání komponentů na DPS byla provedena z důvodu, aby byla DPS kompatibilní s rozvržením pinů jak pro Arduino UNO R3, tak pro Arduino UNO R4. Tato DPS bohužel dorazila až těsně před odevzdáním této práce, a tak je prozatím funkční pouze prototyp zařízení.

Tato práce je včetně zdrojových kódů veřejně dostupná na GitHubu, aby mohla sloužit jako zdroj informací pro lidi, kteří se budou v budoucnu zabývat podobnými tématy.

## Seznam zkratek

API    Application Programming Interface

DPS    deska plošných spojů

GNSS    globální navigační satelitní systémy

IDE    integrované vývojové prostředí - z angl. Integrated Development Environment

LED    elektroluminiscenční dioda - z angl. Light Emitting Diode

NTP    Network Time Protokol

PWM    pulzně šířková modulace - z angl. Pulse Width Modulation

TAI    mezinárodní atomový čas - z fr. Temps Atomique International

UTC    univerzální koordinovaný čas - z angl. Coordinated Universal Time / fr. Temps Universel Coordonné

# Literatura

- [1] ADAMS, Mark. *GSI ONLINE for Leica TPS and DNA* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: [https://www.engineeringsurveyor.com/software/tps-dna-online\\_v114.pdf](https://www.engineeringsurveyor.com/software/tps-dna-online_v114.pdf).
- [2] ANDĚL, Vladimír. *Smerování antén přijímačů DCF77* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/smerovani-anten-prijimacu-dcf-77.html>.
- [3] Arduino. *Arduino - Home* [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>.
- [4] BLOOM, Jim. *RS-232 vs. TTL Serial Communication* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/tutorials/215>.
- [5] D. Piester, A. Bauch, J. Becker a A. Hoppmann. *Generation of UTC(PTB) as a fountain-clock based time scale* [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_4/4.4\\_zeit\\_und\\_frequenz/pdf/2012\\_Piester\\_ProcPTTI2011.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/4.4_zeit_und_frequenz/pdf/2012_Piester_ProcPTTI2011.pdf).
- [6] Drátek. *Začínáme s Arduinem / Návodů Drátek* [online]. [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/zaciname-s-arduinem/>.
- [7] Drátek. *Drátek.cz* [online]. [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://dratek.cz/>.
- [8] FIXEL, Jan. *Geodetická astronomie I. a základy kosmické geodézie*. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1786-2.
- [9] GNSS Store. *NEO-M8T TIME and RAW receiver board with SMA (RTK ready)* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://gnss.store/neo-m8t-timing-gnss-modules/284-ELT0332.html>.
- [10] Google. *Google Public NTP* [online]. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://developers.google.com/time>.
- [11] HAVLÍČEK, David. *Elektronické hodiny*. [online]. Brno, 2022. Bakalářská práce, VUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73830>.

- [12] HRUŠKA, Ondřej. *Přijímač časové reference DCF77* [online]. [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: [https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/lpe/radioclock\\_dcf77/LongWave\\_Time\\_Reference\\_DCF77.pdf](https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/lpe/radioclock_dcf77/LongWave_Time_Reference_DCF77.pdf).
- [13] KABELÁČ, Josef a KOSTELECKÝ, Jan. *Geodetická astronomie 10. Vyd. 2.* Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04322-6.
- [14] KOSTELECKÝ, Jakub. *Globální polohové souřadnicové systémy.* Praha: České vysoké učení technické, 2019. ISBN 978-80-01-06571-6.
- [15] Laskakit. *LaskaKit.cz* [online]. [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/>.
- [16] NTP Pool Project. *NTP Pool Project* [online]. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.ntppool.org/en/>.
- [17] PATRICKS, Mark. *Vývojové desky: jaké byly, jsou a budou* [online]. [cit. 2024-04-30]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:92446/vyvojove-desky-jake-byly-jsou-a-budou>.
- [18] PIESTER, Dirk. *Reach of DCF77* [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-44/ag-442/dissemination-of-legal-time/dcf77/reach-of-dcf77.html>.
- [19] PILÍK, Martin. *Časový normál pro centralizovanou správu elektronických hodin.* [online]. Praha, 2018. Bakalářská práce, ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73830>.
- [20] Pollin Electronic. *DCF Empfangsmodul DCF1* [online]. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.pollin.de/p/dcf-empfangsmodul-dcf1-810054>.
- [21] POUPA, Martin. *Vysílání časového signálu a DCF77* [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/vysilani-casoveho-signalu-a-dcf77.html>.
- [22] REGA, B. *How the DCF77-receiver works* [online]. [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://timeserver.eu/dcf77-and-gps-comparison>.

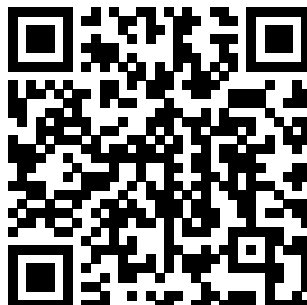
- [23] SHINTON, Andrew. *How Accurate Is Network Time Protocol (NTP)?* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://timetoolsltd.com/ntp/ntp-timing-accuracy/>.
- [24] u-blox. *u-blox 5 Protocol Specifications* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: [https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/Modules/u-blox5\\_Protocol\\_Specifications%28GPS.G5-X-07036%29.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/Modules/u-blox5_Protocol_Specifications%28GPS.G5-X-07036%29.pdf).
- [25] World Time API. *World Time API* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://worldtimeapi.org/>.
- [26] ZEIS, Zbyněk. *Synchronizace času pro odloučená měřicí stanoviště* [online]. Plzeň, 2016. Bakalářská práce, ZČU. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/23073>.

## Seznam příloh

A GitHub repozitář . . . . .	48
B Elektronická příloha - SD karta . . . . .	49

# A GitHub repozitář

<https://github.com/kovarmi9/BachelorThesis-Astrochronograph>.



## Struktura repozitáře:

```

BachelorThesis-Astrochronograph
├── README.md.....stručná dokumentace
├── src
│   ├── Arduino.....kódy pro Arduino
│   │   ├── Components.....kódy pro jednotlivé komponenty
│   │   │   ├── BLE
│   │   │   ├── Bluetooth
│   │   │   ├── DCF77_time
│   │   │   ├── Display
│   │   │   ├── GNSS_time
│   │   │   ├── NTP
│   │   │   ├── RGB_LED
│   │   │   ├── Rotarry_encoder
│   │   │   ├── RTC
│   │   │   ├── SD
│   │   │   ├── Sound
│   │   │   └── TS_Reader
│   │   ├── Complet.....kompletní kód
│   │   │   ├── Astrochronograph_R3
│   │   │   └── Astrochronograph_R4
│   │   └── Test.....kód pro testování
│   ├── LaTeX.....zdrojový kód práce ve formátu  $\LaTeX$ 
│   └── R.....zpracování testovacích dat
├── Eagle.....schéma zapojení a návrh DPS
└── Text
    ├── Thesis.pdf.....text práce ve formátu PDF
    └── Presentation.pdf.....Prezentace ve formátu PDF
    
```



## B Elektronická příloha - SD karta

Struktura souborů na SD kartě:

```

SD
├── Arduino. .... kódy pro Arduino
│   ├── Components.....kódy pro jednotlivé komponenty
│   │   ├── BLE
│   │   ├── Bluetooth
│   │   ├── DCF77_time
│   │   ├── Display
│   │   ├── GNSS_time
│   │   ├── NTP
│   │   ├── RGB_LED
│   │   ├── Rotarry_encoder
│   │   ├── RTC
│   │   ├── SD
│   │   ├── Sound
│   │   └── TS_Reader
│   ├── Complet.....kompletní kód
│   │   ├── Astrochronograph_R3
│   │   └── Astrochronograph_R4
│   └── Test
├── R. .... zpracování testovacích dat
└── Eagle.....schéma zapojení a návrh DPS
    
```