



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroniky a informačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Sledovací zařízení pro balónové a pikobalónové sondy

Autor práce: Linda Müllerová
Vedoucí práce: Ing. Ivo Veřtát, Ph.D.

Plzeň 2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Linda MÜLLEROVÁ**
Osobní číslo: **E18B0022K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Sledovací zařízení pro balónové a pikobalónové sondy**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte rešerši modulů potřebných pro stavbu sledovacího zařízení hmotnostně vhodného pro balónové i pro pikobalónové sondy.
2. Navrhněte složení sledovače pro sondy a udělejte odhady hmotnosti a spotřeby elektrické energie.
3. Realizujte vzorek sledovače pro sondu a ověřte jeho vlastnosti.


Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Luděk Dudáček – PilsenCUBE: Strato Stratosferic Test of the Sensors for PilsenCUBE-II Satellite.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivo Veřtát, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Cílem této práce bylo prozkoumat dostupné možnosti k vytvoření sledovacího zařízení pro balónové sondy a navrhnout dostatečně malé lehké a úsporné sledovací zařízení. Práce obsahuje jak rešerši modulů pro pikobalónky, tak i větší moduly, použitelné pro sondu projektu PilsenCUBE-Strato, která zatím vlastní sledovač nemá.

Výsledkem jsou dva návrhy zařízení. Prvním z nich je sledovač pro sondu PilsenCUBE-Strato složený z GPS modulu, rádiového vysílače pro APRS pásmo a malého počítače Raspberry Pi, který tvoří základ sondy Strato. Druhý navržený sledovač je tvořen GPS modulem a LoRa rádiem. Díky své malé hmotnosti a nízké spotřebě se hodí pro pikobalón. Sondy se využívají v mnoha vědeckých oblastech od meteorologie až po výzkum vesmíru a bývají vybaveny různými senzory. Aby byla nasbíraná data využitelná, je nutné znát také polohu sondy. Některé systémy mohou kromě zeměpisné šířky, délky, nadmořské výšky nebo rychlosti přenášet i data ze senzorů. Kromě sledování sondy za letu je také důležité dohledat její polohu po přistání.

Vypouštění malých balónků a sledování jejich letu se v poslední době stalo populárním i mezi radioamatéry. Pořádá se již třetí ročník soutěže picoballoon challenge, jejímž cílem je postavit co nejmenší, nejlehčí sondu, která se udrží co nejdéle ve vzduchu.

Klíčová slova

sledovač, balón, pikobalón, APRS, LoRa

Abstract

Müllerová, Linda. *Tracker for baloon and picobaloon probes [Sledovací zařízení pro balónové a pikobalónové sondy]*. Pilsen, 2021. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electronics and Information Technologies. Supervisor: Ivo Veřtát

The aim of this paper was to research the available options for creating a tracking device for balloon probes and to design such device, which will be small, light and low-power. The paper contains a research for for both picoballoons and larger balloons, such as the probe for PilsenCUBE-Strato project, which does not yet have its own tracker.

The results are two tracker designs. First of them is a tracker for the PilsenCUBE-Strato probe consisting of a GPS module, an APRS radio transmitter and a small computer Raspberry Pi, on which the Strato probe is based. The second designed tracker consists of a GPS module and a LoRa radio. Thanks to its low weight and low power consumption, it is suitable for picoballoon.

The probes are used for many scientific projects from meteorology up to space research and are equipped with various sensors. To evaluate collected data properly, it is also necessary to know the position of the probe. Some systems can even transmit data from sensors in addition to latitude, longitude, altitude, or speed. In addition to tracking the probe in flight, it is also important to trace its position after landing (recover the payload). Launching small balloons and tracking their flight has recently become popular among radio amateurs. The third year of the picoballoon challenge competition is being held. The aim of the challenge is to build the smallest and the lightest probe as possible, which will stay as long as possible in the air.

Keywords

tracker, baloon, picobaloon, APRS, LoRa

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 27. května 2021

Linda Müllerová

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vi
Seznam symbolů a zkratek	vii
1 Úvod	1
2 Součásti sledovacích systémů	2
2.1 GPS	2
2.2 APRS	2
2.3 WSPR	3
2.4 Satelitní systém Iridium, sledování mobilním telefonem	4
2.5 IoT	4
2.6 Datové modemy v licencovaných pásmech	4
2.7 Softwarové rádio	5
3 Rešerše modulů	6
3.1 Moduly pro zjišťování polohy	6
3.1.1 Ublox MAX8Q	6
3.1.2 Adafruit Ultimate GPS	7
3.2 Moduly pro odeslání dat	7
3.2.1 APRS vysílače	7
3.2.2 Sledovač využívající SDR	8
3.2.3 Úzkopásmové modemy	9
3.3 Kombinované moduly	10
3.3.1 Micro-Trak	10
3.3.2 Rádiový sledovací systém VIPER	12
3.3.3 Iridium modul NAL 9602-LP	12
3.3.4 Vícepásmový sledovací systém	13
3.3.5 Mobilní telefon se zabudovaným GPS modulem	14
3.3.6 Mobilní sítě a IoT	15
3.3.7 LightAPRS-W	17
3.4 Pozemní přijímač	18
3.5 Mikrokontrolery	18

3.5.1	Arduino Zero	18
3.5.2	Adafruit Feather M0	20
3.5.3	Raspberry Pi Zero	20
4	Realizace sledovacího zařízení	22
4.1	Návrh sledovače pro PilsenCUBE-Strato	22
4.2	Návrh sledovače pro pikobalón	28
4.3	Software	30
5	Ukázky balónů a balónových sond	32
6	Závěr	35
	Reference, použitá literatura	36

Seznam obrázků

3.1	Ublox MAX8Q Převzato z [10] 	6
3.2	Adafruit Ultimate GPS Převzato z [12] 	7
3.3	Radiometrix HX1 Převzato z [13] 	8
3.4	Radiometrix MTX2 Převzato z [14] 	8
3.5	BladeRF 2.0 Převzato z [15] 	9
3.6	Radiometrix NTX2/NRX2 Převzato z [16] 	10
3.7	Micro-Trak 1000 Převzato z [17] 	11
3.8	TinyTrak3+ Převzato z [18] 	11
3.9	SRB MXTRAK Převzato z [19] 	12
3.10	NAL 9602-LP Převzato z [20] 	13
3.11	XTend Převzato z [22] 	14
3.12	Dorji DRF1278DM Převzato z [24] 	16
3.13	Gnat Převzato z [36] 	17
3.14	LightAPRS-W Převzato z [35] 	17
3.15	Alinco DR-130T Převzato z [25] 	18
3.16	Baofeng BF-F8HP Převzato z [26] 	19
3.17	Arduino Zero Převzato z [27] 	19
3.18	Adafruit Feather M0 Převzato z [?] 	20
3.19	Raspberry Pi Zero Převzato z [29] 	21
4.1	Napájecí systém	25
4.2	APRS sledovač	26
4.3	Sestavený sledovač pro sondu PilsenCUBE-Strato	27
4.4	Sestavený sledovač pro sondu PilsenCUBE-Strato	27
4.5	Malý sledovač pro pikobalón	30
5.1	Ukázka latexového balónu a polystyrenové sondy projektu PilsenCUBE-Strato	32
5.2	Mylarový pikobalónek a sledovač z modulu Gnat	33
5.3	Ukázka velkého stratosférického balónu Převzato z [52] 	34

Seznam symbolů a zkratek

ISM	Industrial, Scientific, Medical. Volná pásma pro rádiové vysílání v průmyslovém, vědeckém a zdravotnickém oboru.
APRS	Automated Packet Reporting Service. Amatérský rádiový komunikační systém.
IoT	Internet of Things. Internet věcí.
GNSS	Global Navigation Sattelite System. Globální navigační satelitní systém.
GPS	Global Positioning System. Systém určování polohy.
SPS	Standard positioning service. Civilní verze systému GPS.
PPS	Precision Positionig Service. Přesnější určování polohy.
CDMA	Code Division Multiple Access. Kódový multiplex.
GLONASS	Globální družicový navigační systém.
WSPR	Weak Signal Propagation Reporter. Rádiový systém pro komunikaci na velké vzdálenosti s malou spotřebou energie.
LoRa	Long Range. Rádiová síť s velkým dosahem v bezlicenčním pásmu.
LPWAN	Low Power Wide Area Network. Síť pro rádiovou komunikaci v ISM pásmu s malou spotřebou energie.

1

Úvod

Balónové sondy se skládají z latexového nebo fóliového balónu, sondy s GNSS modulem a různými senzory pro výzkum atmosféry. Těmi mohou být například senzory tlaku, teploty, detektory plynů a záření atd. Nedílnou součástí systému je také napájení – obvykle se jedná o kombinaci solárních panelů, superkapacitorů a lithiových akumulátorů.

Balóny jsou využitelné pro široké spektrum vědeckých účelů. Jedním z oborů, který balóny často využívá, je výzkum blízkého vesmíru (detekce kosmického záření, pozorování v infračervené oblasti). Balóny umožní vyzkoušet a zkalibrovat přístroje před vynesemím do vesmíru. Tento způsob je méně nákladný než vypuštění satelitu. Uplatnění nachází balóny také v meteorologii, kde umožňují kromě snímání tlaku, teploty, vlhkosti, směru větru také například detailní sledování hurikánů. Biologové mohou pomocí balónů sledovat migraci ptáků, netopýrů nebo hmyzu. [51]

Výzkumné balóny se pohybují ve stratosféře ve výškách do 40 km. Bývají naplněny vodíkem nebo heliem a mohou být dvou druhů. Prvním typem jsou balóny s nulovým tlakem (zero-pressure). Ty jsou ve spodní části otevřené, aby se balón neroztrhl kvůli změnám tlaku při stoupání. Protože jsou otevřené a helium z nich uniká, jsou používány pro krátké lety. Druhým typem jsou tlakové balóny (super-pressure), které létají na dlouhé vzdálenosti. Jsou úplně utěsněny a při vzletu se natlakují. [50]

Cílem práce je navrhnout malé, lehké a úsporné sledovací zařízení pro malé balónové sondy. Toto zařízení musí obsahovat modul pro přijímání souřadnic a řídicí jednotku, která data zpracuje a předá vysílači.

Principem určování polohy na mapě je určení vzdálenosti od známých bodů. Těmi jsou satelity systémů GNSS (Global Navigation Satellite System). Satelity vysílají rádiové vlny s časovou značkou. Přijímač porovnává časové značky se svými a ze známého zpoždění vln vypočítá svou polohu. Takto získané souřadnice je ještě potřeba přenést na zem. K tomu lze využít amatérské rádiové sítě (například APRS, WSPR), celulární sítě mobilních telefonů (v nižších výškách), IoT sítě (LoRa, LoRaWAN) nebo satelitní sítě (Iridium).

2

Součásti sledovacích systémů

2.1 GPS

Nejznámějším GNSS systémem je GPS (Global Positioning System). Je to systém určování polohy s celosvětovým pokrytím. Dnes obíhá na šesti drahách kolem Země 31 satelitů poskytujících dva druhy služeb: Standard Positioning Service (SPS) a Precision Positioning Service (PPS). SPS je dostupné pro civilní použití, přesnost určení polohy je v řádech jednotek metrů. PPS určuje polohu s přesností na desítky centimetrů a je dostupný pouze pro autorizované uživatele, především armádu.

Komunikace probíhá pouze ve směru od satelitu k přijímači. Podle přijatých časových značek a polohy družic vypočítá zeměpisnou polohu a nadmořskou výšku. Určuje také přesný čas.

GPS přijímače se dělí na jednokanálové a vícekanálové. Vícekanálové mohou přijímat signály paralelně a určení polohy je rychlejší.

Přenos dat probíhá ve třech frekvenčních pásmech: 1575,42 MHz, 1227,6 MHz a 1176,45 MHz. K rozlišení satelitů se používá kódový multiplex CDMA a každá družice vysílá vlastní opakující se pseudonáhodný kód. Na ten je namodulována navigační zpráva.

Americký systém GPS je ze systémů pro určování polohy nejstarší a proto nejrozšířenější, ale v provozu je také ruský systém satelitů GLONASS, čínský BeiDou nebo evropský Galileo. [9]

2.2 APRS

APRS (Automatic Position Reporting System) je protokol linkové vrstvy pro paketovou komunikaci. Nejčastější kombinace paket rádia je spolu s GNSS sítí umožňující sledovat zařízení na mapě v reálném čase (10 minut bez opakování). Podle tohoto času nastavujeme opakování vysílání. Data jsou vysílána ve frekvenčním pásmu určeném pro radioamatéry (v Evropě 144,8 MHz). V síti APRS jsou data nejčastěji přenášena pomocí protokolu

Flag	Destination address	Source address	Digipeater addresses (0-8)	Control field (UI)	Protocol ID	Information field	FCS	Flag
1	7	7	0-56	1	1	1-256	2	1

Tab. 2.1: Formát APRS rámce AX.25

AX.25 s rychlostí 1200 bit/s a modulací AFSK. [2]

Využívá se hlavně pro přenos informací o poloze, ale také výšce, rychlosti, teplotě a tlaku nebo počasí, dopravních nehodách atd. Systém pracuje v reálném čase a vysílá ke všem uživatelům sítě.

APRS pracuje ve vysokofrekvenčním pásmu, takže signál z každé vysílací stanice je omezen vzdáleností. Ta bývá obvykle několik kilometrů (většina vysílačů je nízkovýkonová). Dále je signál zeslaben hustou vegetací nebo jinými překážkami ve výhledu. [8]

Přijímače jsou rozmístěny po celé Zemi a pokrývají určité území. Některé fungují jako opakovače - zesilují APRS signál a vysílají ho s větším výkonem k další stanici, která slouží jako internetová brána a nahraje paket na server. Data jsou dále zpracována softwarem a poloha balónu je zobrazena pomocí Google Map na stránkách <http://APRS.fi>, data jsou aktualizována každých 5 minut. [4] [1] APRS pakety lze přijímat také pomocí vlastní pozemní stanice, která se skládá z všesměrové antény a rádia naladěného na APRS frekvenci a připojeného k systému Android (APRSDroid). Tento systém lze využít například pro sledování v terénu, kdy nemáme přístup k internetu. [8] Pro přijímání APRS paketů se také vyrábí komerční stanice, které zobrazují údaje přímo. Jsou ale obvykle drahé a rozměrné.

APRS - formát dat: Komunikaci lze provádět oboustranně pomocí protokolu AX.25 na linkové vrstvě ve formátu nečíslovaných informací (UI). Umožňuje posílat krátké jednořádkové zprávy. Podporuje komunikaci s jinými zařízeními, které obsahují TNC.

APRS pakety jsou bez chyb, ale nemusí vždy dorazit k přijímací stanici, proto APRS přenáší informace s redundancí. Aby stará data neovlivňovala nová, mělo by APRS vysílat nové informace častěji než staré. [46]

2.3 WSPR

WSPR (Weak signal Propagation Reporter) je další amatérský rádiový protokol, který využívá FSK modulaci a posílá krátké zprávy v MF a HF frekvenčním pásmu (frekvence od 8 kHz do 144 MHz). [48] Tyto vlny kopírují horizont Země, což umožňuje zachytit vysílání na velmi dlouhé vzdálenosti (tisíce km). Jeho výhodou je již zmiňovaný dosah a malá spotřeba energie. WSPR síť je podobná APRS, také v ní existují brány, které nahrají přijatou zprávu na internet, kde si ji mohou uživatelé zobrazit. Celá zpráva má

jen 50 bitů. Obsahuje volací znak vysílající stanice, polohu, a vysílací výkon.[47]

2.4 Satelitní systém Iridium, sledování mobilním telefonem

Přestože je APRS systém velmi spolehlivý, jeho použití je limitováno. Balón nelze sledovat při přistávání, pokud například zmizí pod korunami stromů. Pro vzdálenou přijímací stanici je obtížné udržet s balónem kontakt. Tyto problémy řeší některé skupiny použitím klasické nebo satelitní mobilní sítě (např. Iridium), která za poplatek posílá periodicky uživateli textové zprávy s posledními souřadnicemi balónu. [8] Běžný telefonní signál bohužel obvykle není k dispozici v odlehlých oblastech, ale systém Iridium má kolem Země 66 satelitů a poskytuje plné pokrytí včetně polárních oblastí. [49]

2.5 IoT

IoT, internet věcí, je síť elektronických zařízení. Umožňuje jim mezi sebou komunikovat. Sledování polohy založené na internetu věcí využívá již existující infrastrukturu (například Internet, LTE pásmo mobilní sítě) nebo sítě Low Power Wide Area Network (LPWAN) a Long Range (LoRa). Obě to jsou sítě pro bezdrátovou komunikaci v bezlicenčním rádiovém pásmu na velké vzdálenosti s nízkou přenosovou rychlostí a malou spotřebou energie. Pro sledování polohy balónu je výhodné použít kombinaci IoT v mobilní síti jako primární systém a jako zálohu LPWAN/LoRa, který není závislý na mobilním signálu a navíc zpřesňuje data. Principem fungování IoT v mobilní síti je sbírání dat v určeném intervalu mikrokontrolérem a jejich posílání do cloudu. [5]

2.6 Datové modemy v licencovaných pásmech

Tyto systémy využívají k přenosu dat vysokých nebo ultravysokých frekvencí o malé šířce pásma (12,5 kHz), což umožňuje využívat toto pásmo velkým počtem rádií. Například pásmo 450 - 470 MHz obsahuje 1600 úzkých rádiových kanálů.

UHF signály mají malou vlnovou délku a proto mnohem kratší a kompaktnější antény a snáze projdou například stromy a dobře se odráží od skal a pronikají do budov. VHF má větší komunikační rozsah a lze k vysílání použít méně energie.[6]

2.7 Softwarové rádio

Jednou z možností rádiové komunikace balónu s pozemní stanicí je softwarové rádio (SDR), ze kterého si můžeme vytvořit modem s vlastním protokolem. Rádiový signál zpracovává digitálně a dá se konfigurovat přepsáním kódu. Tím lze provádět funkce nedosažitelné běžnými komunikačními prostředky. Nevýhodou je vysoká spotřeba energie a nízká softwarová spolehlivost.

Softwarové rádio vzniklo původně pro vojenské účely. Zpracování signálu digitálně umožňovalo jednomu hardwaru pracovat na mnoha frekvencích s mnoha komunikačními protokoly. Později se softwarové rádio začalo šířit i mimo vojenský sektor a vznikaly platformy jako ZepetoSDR, HackRF, BladeRF. Tato komerční SDR jsou obvykle naprogramována pomocí GNU Radio toolkit pomocí bloků pro zpracování signálu, napsaných v C++ a Pythonu. Bloků je mnoho a odpovídají funkčním blokům klasického rádia, například blok pro kódování signálu, modulaci/demodulaci, filtrování a odstranění chyb. Softwarové rádio se využívá v družicích a také na ISS.

Například v projektu [7] balón vysílá pomocí SDR data o poloze (GPS, výšku, čas). Použitý komunikační protokol je Pure ALOHA. Vysílá se 8 sekund (i když jsou zprávy jinak dlouhé), přijímá 8 až 25 s. Tím je do zprávy přidáno hodně redundantní složky a snížena efektivnost. Vysílač přidává hlavičku, přístupový kód, kontrolu cyklické redundance/konec zprávy (CRC/EOF). Přijímač pracuje přesně v opačném pořadí a obsahuje navíc korelátor pro identifikaci přístupového kódu. [7]

3

Rešerše modulů

3.1 Moduly pro zjišťování polohy

3.1.1 Ublox MAX8Q

MAX8Q je GNSS modul se systémem pro minimalizaci spotřeby energie. Přijímá signály ze satelitů GPS a GLONASS. Kromě určování polohy má i další funkce, například počítání kilometrů nebo geofencing (kontrolu pohybu). [11]

Napětí: 2,7 - 3,6 V

Spotřeba proudu (při zapnuté funkci šetření energie): 4,7 mA

Rozměry: 10,1 x 9,7 x 2,5 mm

Váha: 0,6 g

Frekvence: 1575,42 MHz (GPS), 1602 MHz (GLONASS)



Obr. 3.1: Ublox MAX8Q [Převzat o z [10]]

3.1.2 Adafruit Ultimate GPS

Adafruit Ultimate je GPS modul se zabudovanou anténou, který přijímá signál z 22 satelitů na 66 kanálech. Dokáže sledovat polohu i při vysokých rychlostech. [12]

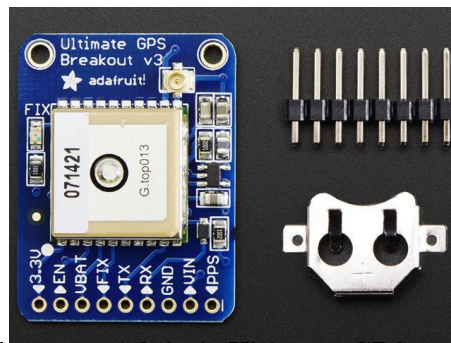
Napájecí napětí: 3-5,5 V DC

Spotřeba proudu: 25 mA při určování polohy

Váha: 8,5 g

Rozměry: 25,5 x 35 x 6,5 mm

Obsahuje mikrokontrolér a má vlastní anténu i konektor pro externí anténu.



Obr. 3.2: Adafruit Ultimate GPS [Převzato z [12]]

3.2 Moduly pro odeslání dat

3.2.1 APRS vysílače

Dnes jsou běžně dostupné již naprogramované APRS vysílače. Dva z nich jsou HABduino od firmy Uputronics a Micro-Trak od Byonics.

HABduino je kompletní GPS přijímač s dvěma vysílači Radiometrix, jeden je pro americké APRS pásmo a druhý pro evropské ISM pásmo:

Radiometrix HX1 144,390-10 (Spojené státy)

HX1 je úzkopásmový rádiový vysílač pro bezlicenční pásmo s dosahem až 10 km. Lze ho použít pro sledování, telemetrii nebo zabezpečovací systémy. [13]

Vysílací výkon: 24,7 dBm, 300 mW

Frekvence: 120 - 180 MHz

Napětí: 5 V

Spotřeba proudu při vysílání: 140 mA

Velikost: 43 x 15 x 5 mm

Radiometrix MTX2 (ISM pásmo)

MTX2 je malý vícekanálový, nízkovýkonový, úzkopásmový vysílač. Dosah signálu je 500



Obr. 3.3: Radiometrix HX1 [Převzat o z [13]]

m. [14]

Frekvence: 433.875-434.650 MHz

Přenosový výkon: 10 dBm (10 mW)

Napájení: 3,1 - 15 V

Spotřeba proudu: 20 mA

Velikost: 23 x 12.5 x 7 mm



Obr. 3.4: Radiometrix MTX2 [Převzat o z [14]]

Vysílač a přijímač musí také být vybaven anténou, obvykle drátovou (je malá a lehká).

3.2.2 Sledovač využívající SDR

Tato varianta sledovače je tvořena softwarovým rádiem Blade RFX115, které je řízeno Raspberry Pi 2. To přijímá data a formátuje zprávu, kterou následně přeneše do Blade RF, kde signál zpracuje GNU Radio. Posledním krokem je provedení skriptů RX a TX a vyslání všesměrovou anténou v náhodném čase. RF řetězec je realizován 0,5 W výkonovým zesilovačem. Signál je přijímán Yagi anténou na pozemní stanicí, která také obsahuje

Blade RF, RF řetězec a počítač s GNU radio. [7]

BladeRF 2.0 micro xA9:

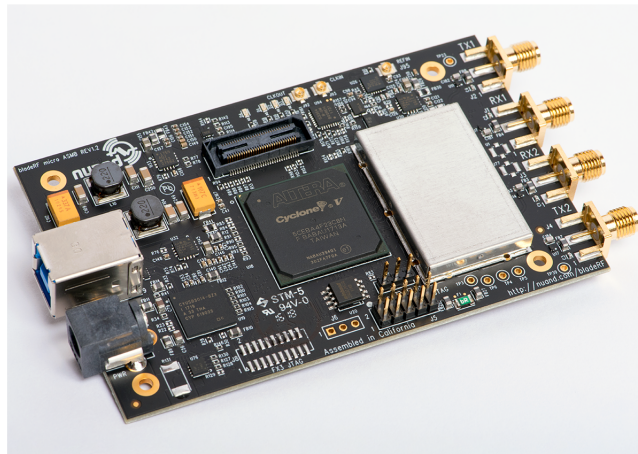
BladeRF micro je malé SDR pro mobilní aplikace. [15]

Frekvence: 47-6000 MHz

Výkon: 8 dBm

Rozměr: 6,3 x 10,2 x 1,8 cm

Váha: 90 g



Obr. 3.5: BladeRF 2.0 |Převzat o z [15]|

3.2.3 Úzkopásmové modemy

Využívá ultra vysoké frekvence a úzkopásmový FM vysílač (Radiometrix NTX2 434.075 MHz 10 mW) v balónu. GPS modul poskytuje souřadnice a vysílá je přes rádio na pozemní stanici. Příjímá rádio by mělo mít rozsah 430 až 440 MHz. [5]

Radiometrix NTX2/NRX2

NTX2 a NRX2 je dvojice rádiového vysílače a přijímače pro UHF pásmo. Mají nízkou spotřebu a malou přenosovou rychlost na delší vzdálenosti. Lze je použít pro sledování, přenos dat ze senzorů nebo vzdálené ovládání. [16]

Standardní frekvence: 434.075 MHz, 434.650 MHz, 458.700 MHz

Dosah: 500 m

NTX2: napájení: 2,9-15 V, 18 mA, výkon: 10 dBm (10 mW)

NRX2: napájení: 2,9-15 V, 14 mA



Obr. 3.6: Radiometrix NTX2/NRX2 [Převzato z[16]]

3.3 Kombinované moduly

Řada výrobců nabízí celé sledovací moduly, které mají na jedné desce řídicí jednotku, GNSS přijímač i vysílač. Stačí je doplnit pouze anténou a baterií, případně solárními články. Některé z nich jsou velmi malé a tudíž vhodné pro balónové sondy.

3.3.1 Micro-Trak

Micro-Trak byl navržen přímo pro sledování stratosférických balónů. Obsahuje čip Tiny-Trak3+, APRS vysílač o výkonu 1 W, GPS modul GPS5HAOEM, dipólovou anténu a pouzdro pro 3 AA baterie.[17]

Získává informace o pozici každou sekundu pomocí GPS modulu naladěného na frekvenci 1575,42 MHz. Využívá přednastavený Mic-Encoder protokol, tím obchází potřebu TNC (terminal node controller, modem pro packet radio) a umožňuje přenos APRS AX.25 rámců přímo z GPS modulu. [8]

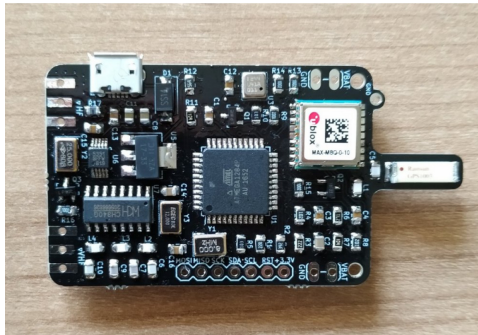
Micro-Trak 1000: Frekvence: 144 - 148 MHz

Rozměry: 5,6 x 4,8 cm

Váha: 78 g

Napětí: 4,5 - 5 V

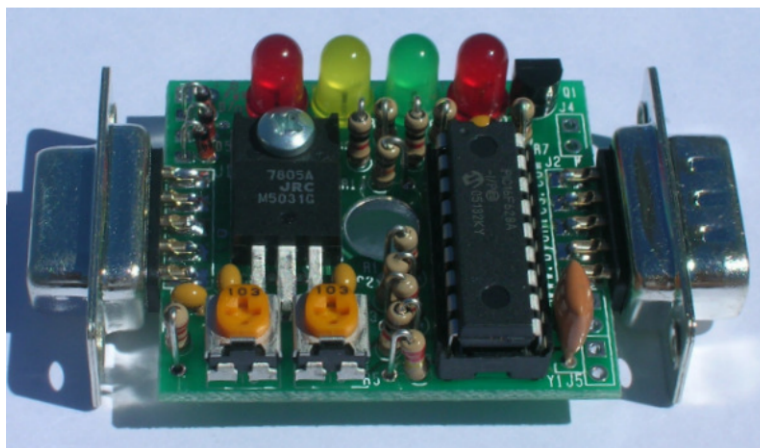
Proud: v režimu spánku: 30 mA, při vysílání: 620 mA



Obr. 3.7: Micro-Trak 1000 |Převzato z [17]|

TinyTrak3+:

TinyTrak je malý kontrolér, který přijímá sériový GPS řetězec a kóduje ho na naformátovaný APRS paket. Pak je připojen k SRB MX145 rádiu od Argent Data Systems, které pakety posílá. Data vysílá ve formátu MIC-E a mohou obsahovat polohu, nadmořskou výšku, rychlost a čas.[18]

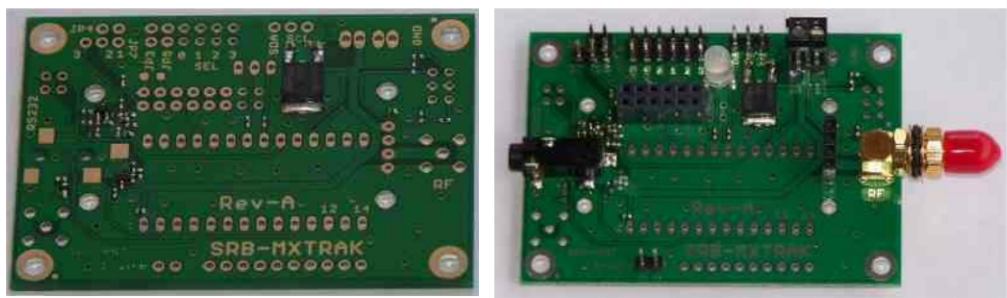


Obr. 3.8: TinyTrak3+ |Převzato z [18]|

SRB MXTRAK:

MXTRAK je rádiový vysílač dostupný ve dvou verzích. Standardní a GPS, která obsahuje GPS modul a anténu. [19] Rozměr: 70 x 50 mm

Napájecí napětí: 5 V DC



Obr. 3.9: SRB MXTRAK |Převzato z [19]|

3.3.2 Rádiový sledovací systém VIPER

VIPER (the Vehiculated Instrument for Parameter Enquiry and Reporting) je nízkonákladový rádiový sledovač používající open-source software.

Přijímačem je malé vysokovýkonné rádio BaoFeng F8HP s drátovou anténou Nagoya NA-711 15,6 palců UHF/VHF (144/430 MHz). Rádio je připojeno přes USB k zařízení, na kterém mohou běžet Java aplety a Arduino C (laptop, Raspberry Pi). Vysílač se skládá z GPS modulu Adafruit Ultimate GPS, antény a Raspberry Pi.

Software: Na Raspberry Pi běží Raspbian Stretch Lite. Rádio přijímá APRS pakety obsahující souřadnice a někdy i nadmořskou výšku sledovaného balónu. K dekódování APRS paketů je použit program Dire Wolf. Druhou možností pro dekódování paketů je aplikace YAAC nastavená na čtení APRS paketů přes AGWPE a GPS dat z modulu Adafruit. Výstupní data z obou programů jsou vykreslena na mapě.[8]

3.3.3 Iridium modul NAL 9602-LP

Jedním z modulů využívajících pro sledování satelitní síť Iridium je NAL. Generuje GPS pakety se souřadnicemi balónu, ty jsou přes satelitní síť vysílány na server na základně

a dále přes internet do počítače uživatele. To umožňuje sledovat balón i v případě, kdy je ztracen APRS signál. [4]. Jedná se o sledovač s velmi malou spotřebou energie. Skládá se z GPS přijímače a vysílače Iridium 9602. Data posílá pomocí SBD (Short Burst Data) zpráv ve volitelných intervalech od čtyř sekund až po frekvenci jednou za několik dní. Tento interval lze měnit i na dálku, když je zařízení v provozu.[20]

Velikost: 69 mm x 55 mm x 24 mm

Váha: 136 g

Napájecí napětí: 3,6 V - 5,5 V nebo 6,5 V - 32 V

Proud: 200 mA (vysílání), $<65 \mu\text{A}$ (režim spánku) pro 5 V

Iridium frekvence: 1616 - 1626,5 MHz

GPS frekvence: 1575,42 MHz



Obr. 3.10: NAL 9602-LP |Převzato z [20]|

3.3.4 Vícepásmový sledovací systém

V balónu je umístěn vysílač a na mobilní stanici přijímač. Vysílače jsou dva: APRS vysílač pracuje na 150 MHz a RF modem na 900 MHz. Na stanici jsou informace přijaty, rozšifrovány a zobrazeny pomocí Google map. Pokud jsou mapy uloženy v počítači, není potřeba připojení k internetu.

RF sledování: Komunikaci mezi balónem a pozemní mobilní stanicí zařizuje 900 MHz rádiový modem XTend. V balónu je připojen k mikrokontroleru (ChipKit MAX32). Mikrokontroler čte data z GPS přijímače Inventek Systems ISM 300X. Mikrokontroler vysílá souřadnice v naformátovaném řetězci přes RF modem. Naformátovaný datový tok je přijímán dalším XTend RF modemem na mobilní stanici.[4]

XTend-PKG RF:

Modem XTend zajišťuje rychlé bezdrátové spojení elektronických zařízení na dlouhou vzdálenost. Lze ho využít pro sledování a přenos dat ze senzorů. [22]

Výkon: od 100 mW do 1 W (20 - 30 dBm) Dosah: s 6 dB anténou 40 mil

Napětí: 7 - 28 V

Přijímací proud: 110 mA/100 mA

Vysílací proud: 580 mA/88 - 480 mA

Klidový proud: 19-39/21-35 mA

Rozměry: 6,99 x 13,97 x 2,86 cm

Váha: 200 g

Frekvence: 902-928 MHz



Obr. 3.11: XTend [Převzat o z [22]]

ISM 300X: ISM 300X je GPS modul firmy Inventek. [23]

Vstupní napětí: 3,3 - 5 V DC

Proud: 40 mA

3.3.5 Mobilní telefon se zabudovaným GPS modulem

Jednou z variant sledování balónové sondy je použití mobilního telefonu. Mobilní telefony zobrazují své souřadnice na mnoha platformách a dokážou je vysílat všude, kde je telefonní signál. Použití mobilního telefonu komplikuje FCC regulace 22.925, která zakazuje použití mobilní komunikace ve vzdušném prostoru. Dokud je balón ve vzduchu, mobilní telefon musí být vypnutý. K zapnutí po dopadu na zem se používá silové relé - uzavírá okruh mezi telefonem a napájecím modulem. Telefon po zapnutí automaticky aktivuje AccuTracking aplikaci, která přenáší souřadnice na server. Tento způsob je užitečný pro

dohledání balónu po přistání, kdy už ho není možné sledovat pomocí APRS nebo rádia. [4]

3.3.6 Mobilní sítě a IoT

Tento sledovací systém využívá 3G mobilní síť. GPS modul je připojen k Arduinu pomocí UART pinů. Data jsou přenášena sériově z Arduina do Raspberry Pi. Data jsou nahrána přes USB modem na webový server, pomocí služby RESTful web servis s interfacem API. API je rozhraní umožňující komunikaci 2 platformami. Kompilovaná data se nahrávají na Ubidots server pomocí 3G modemu.

Další možností je použití systému LoRa. Základem je rádiový modem Dorji DRF1278DM. Je to zvláštní typ Low-range low data rádiového modemu s vysílačem Semtech SX1278. Obsahuje také mikrokontroler a komunikuje na frekvenci 433 MHz. Jedna jednotka DRF je připojená k Arduinu v balónu, další k Raspberry Pi na pozemní stanici, ta funguje jako brána.

Rádiový modem DRF pracuje ve dvou různých módech - standardním a startovacím. Ve standardním pracuje vysílač i přijímač bez šifrování dat. Ve startovacím módu je zařízení na zemi bránou a ostatní zařízení jsou koncové uzly. Uzel s bránou komunikuje obousměrně, ale uzly mezi sebou komunikovat nemůžou. [5]

Dorji DRF1278DM:

Dorji je rádiový modem pro LoRa frekvence. Lze ho použít pro alarm, telemetrii nebo dálkové ovládání. [24]

Frekvence: 420-450 MHz

Max. výkon: 20 dBm

Proud: 75 mA ve vysílacím módu, 15,2 mA v přijímacím, 3,9 μ A v režimu spánku

Rozměry: 18,4 x 34,2 x 7 mm

Napájecí napětí: 3,4 - 5,5 V

Gnat:

Gnat Asset Tracker je velmi lehký a malý sledovací modul. Jeho součástí je řídicí jednotka, LoRa rádio, GNSS přijímač a akcelerometr, který sleduje pohyb modulu a podle toho řídí režim spánku. [36]

Rozměry: 20 x 20 mm

Hmotnost: 2,8 g

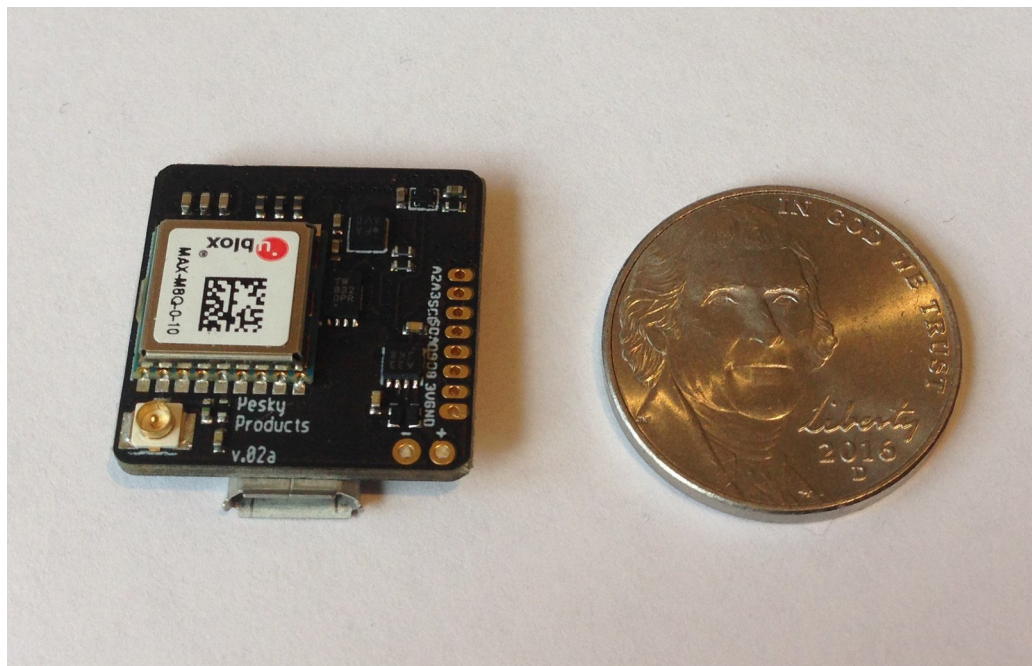
Spotřeba v režimu spánku: 2,5 μ A

Průměrná spotřeba při vysílání každé 2 hodiny: 250 μ A

Napájecí napětí: 3 V



Obr. 3.12: Dorji DRF1278DM [Převzat o z [24]]



Obr. 3.13: Gnat |Převzato z[36]|

3.3.7 LightAPRS-W

LightAPRS-W je malý a lehký WSPR sledovač kompatibilní s Arduinem tvořený GPS modulem Ublox MAX-M8Q, 1W APRS a 10 mW WSPR rádiem. Kromě polohy umí také vysílat údaje o nadmořské výšce, teplotě a tlaku. [35]

Rozměry: 3,5 x 6 cm

Váha: 9 g

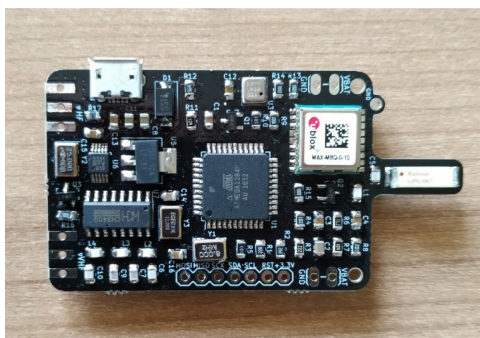
Napětí: 3,3 V

VHF rádio: 134 - 174 MHz, 0,5 W nebo 1 W

Spotřeba při vysílání VHF: 460 mA (0,5 W), 760 mA (1 W)

HF rádio: 2,5 kHz - 200 MHz, 10 mW

Spotřeba v režimu spánku: 5 mA



Obr. 3.14: LightAPRS-W |Převzato z[35]|

3.4 Pozemní přijímač

Jako APRS přijímač lze použít rádio Alinco DR-125T VHF FM připojené k laptopu s vlastním kódem k dekodování polohy z paketu a zobrazení na mapě.[4]

Alinco DR-130T VHF FM

Rádio pro přijímání velmi vysokých frekvencí. [25]

Frekvence vysílání: 144 - 148 MHz, přijímání: 136-174 MHz

Napájení: 13,8 V DC

Přijímací proud: méně než 800 mA, vysílací proud: 10,5/3,5 A

Rozměry: 140 x 40 x 154 mm

Jako vysílač: výkon 50/35/5 W



Obr. 3.15: Alinco DR-130T [Převzat o z [25]]

BaoFeng BF-F8HP

BF-F8HP je dvoupásmové ruční rádio s třemi výkonovými úrovněmi. [26]

Výkon: 1, 5, 8 W

Frekvence: 65-108 MHz (přijímání komerčního FM rádia), VHF: 136-174 MHz (vysílání i přijímání), UHF: 400-520 MHz (vysílání i přijímání)

3.5 Mikrokontrolery

3.5.1 Arduino Zero

Arduino Zero je 8 bitová deska s 32 bitovým jádrem. Lze ho použít pro IoT projekty, nositelná zařízení nebo robotiku. [27]

Napájecí napětí: 3,3 V

Maximální spotřeba proudu: 800 mA

Rozměry: 68 x 53 mm

Váha: 12 g



Obr. 3.16: Baofeng BF-F8HP [Převzato z [26]]



Obr. 3.17: Arduino Zero [Převzato z [27]]

3.5.2 Adafruit Feather M0

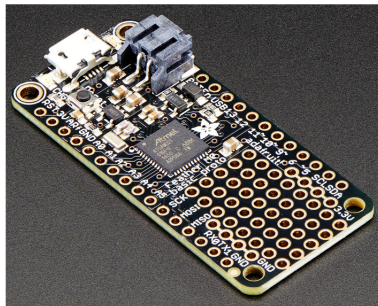
Feather je malý a lehký mikrokontroler se zabudovaným konektorem a nabíječkou pro Li-Po baterie. [28]

Napájecí napětí: 3,3 V

Výstupní proud: 500 mA

Rozměry: 51 x 23 x 8 mm

Hmotnost: 4,6 g



Obr. 3.18: Adafruit Feather M0 [Převzato z[?]]

3.5.3 Raspberry Pi Zero

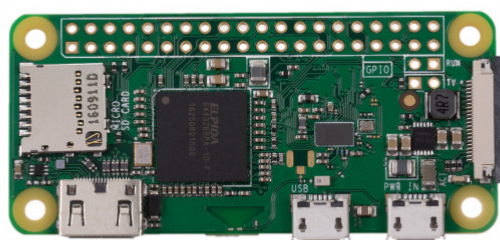
Raspberry Pi Zero je malý a úsporný 32 bitový minipočítač. Vyrábí se také ve verzích W (s WiFi a Bluetooth) a H (GPIO header). [29]

Jmenovitý výkon: 0,5 W bez zatížení, 1,75 W při zatížení

Spotřeba proudu: 100 mA v průměru bez zatížení, max. 350 mA při zatížení

Rozměry: 65 x 30 x 5 mm

Hmotnost: 9 g



Obr. 3.19: Raspberry Pi Zero |Převzato z[29]|

4

Realizace sledovacího zařízení

V této kapitole jsou popsány dvě možnosti řešení sledovače.

4.1 Návrh sledovače pro PilsenCUBE-Strato

Toto řešení je navrženo pro sondu Strato. Přenos dat z GPS přijímače, jejich zpracování a vysílání v podobě APRS paketů je řízeno malým počítačem Raspberry Pi Zero pomocí programu Direwolf.

Dva paralelně spojené solární panely dodávají při plném slunečním svitu napětí 4,8 V a proud 100 mA a nabíjí baterii o kapacitě 680 mAh. Baterie napájí měnič, jehož spotřebu neznáme, Raspberry Pi, rádiový vysílač a GPS modul. Průměrná spotřeba Raspberry Pi je 225 mA, vysílač spotřebuje 140 mA, GPS modul 45 mA. Při takové spotřebě vydrží baterie na jedno nabití napájet sledovač cca 1,5 hodiny. Celková odhadovaná hmotnost sledovače je přibližně 80 g. Po sestavení sledovač funguje jen částečně.

Parametry součástek:

- Solární panel MPT4.8-75 (PowerFilm Solar)

Solární články PowerFilm jsou lehké, tenké a odolné. Jsou vhodné pro venkovní použití. [30]

Plné slunce:

Výkon: 240 mW

Napětí: 4,8 V

Proud: 50 mA

1/4 slunečního svitu:

Výkon: 54 mW

Napětí: 4.8 V

Proud: 11,3 mA

Fyzická specifikace:

Rozměry: 94 x 73 mm

Hmotnost: 1,98 g

- Nabíječka a baterie *Micro USB nabíječka TP4056*
Nabíječka s ochranou proti přepětí, podpětí a nadproudu pro Li-Po baterie.[31]
Vstupní napětí: 4,5 – 5,5 V
Určena pro nabíjení 1 až 2 lithiových článků s napětím 3,6 V konstantním proudem 1 A až do napětí 4,2 V.
Provozní proud: 5 μ A Rozměry: 25 x 19 x 10 mm
Hmotnost: 1,6 g

Li-Ion akumulátor SONY US14500VR2 AA, 3,6 V
Nabíjecí baterie s kapacitou 680 mAh. [32]
Maximální nabíjecí proud: 1 A
Pracovní rozsah: 2,5 - 4,2 V
Max. vybíjecí proud: 3 A
Rozměry: 14 x 50 mm
Hmotnost: 25 g
- Boost Step Up napájecí modul
DC - DC měnič 2 - 5 V na 5 V 2 A. Zajišťuje potřebné napětí a proud pro Raspberry Pi. [33]
Vstupní napětí: 2 - 5 V
Výstupní napětí: 5 V
Výstupní proud: 2 A (max)
Rozměry: 17 x 13 mm
Účinnost: 95 %
Hmotnost: 5 g
- Raspberry Pi Zero W
Raspberry Pi Zero je malý a úsporný 32 bitový minipočítač. Vyrábí se také ve verzích W (s WiFi a Bluetooth) a H (GPIO header). [29]
Jmenovitý výkon: 0,5 W bez zatížení, 1,75 W při zatížení
Spotřeba proudu: 100 mA v průměru bez zatížení, max. 350 mA při zatížení
Rozměry: 65 x 30 x 5 mm
Hmotnost: 9 g
- GPS modul NEO-6M UART GPS modul založený na systému uBlox NEO-6M. Může pracovat se zařízeními o napětích 3,3 i 5 V, s nimiž komunikuje přes rozhraní UART. [34]

Napájecí napětí: 2,7 - 5,5 V

Spotřeba energie: 45 mA

Rozměry: 36 x 26 mm

Hmotnost: 20 g

- APRS vysílač Radiometrix HX1

HX1 je úzkopásmový rádiový vysílač pro bezlicenční pásmo s dosahem až 10 km.

Lze ho použít pro sledování, telemetrii nebo zabezpečovací systémy. [13]

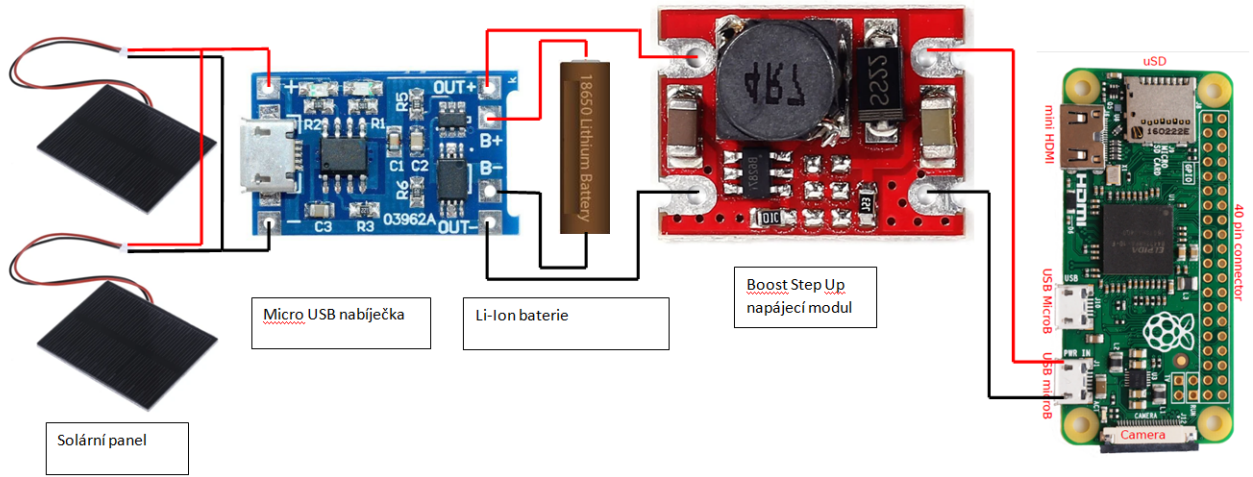
Vysílací výkon: 24,7 dBm, 300 mW

Frekvence: 169.4125 MHz, 169.5625 MHz

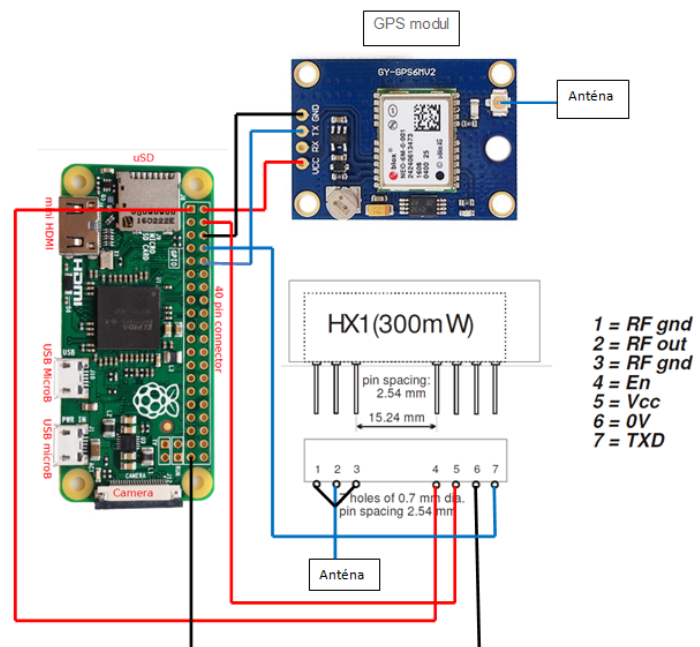
Spotřeba proudu: 140 mA

Rozměry: 43 x 15 x 5 mm

Hmotnost: 15 g



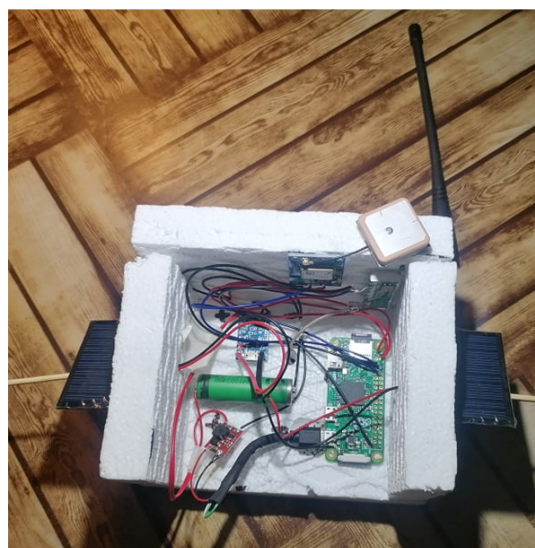
Obr. 4.1: Napájecí systém



Obr. 4.2: APRS sledovač



Obr. 4.3: Sestavený sledovač pro sondu PilsenCUBE-Strato



Obr. 4.4: Sestavený sledovač pro sondu PilsenCUBE-Strato

4.2 Návrh sledovače pro pikobalón

Skládá se z velmi malého a úsporného modulu Gnat, který obsahuje LoRa modem, řídicí jednotku a GNSS přijímač. Modul je doplněn dvěma anténami pro Lora rádio a pro GNSS. Nečinný modul má spotřebu proudu jen $2,5 \mu\text{A}$. Průměrná potřeba při aktualizaci polohy každých 10 minut je menší než $250 \mu\text{A}$. [36] Modul je napájen Li-Po baterií, která má kapacitu 50 mAh a je podpořena superkapacitorem pro vylepšení vnitřní impedance a omezení proudových špiček. Baterie je nabíjena ze dvou solárních článků oddělených od zbytku obvodu diodou. Při dané spotřebě vydrží baterie na jedno nabití napájet modul 8 dní. Celková hmotnost sledovače je 12 g.

Parametry součástí:

- Gnat

Gnat Asset Tracker je velmi lehký a malý sledovací modul. Jeho součástí je řídicí jednotka STM32L082 host MCU, LoRa modem Sematech SX1276, GNSS modul MAX M8Q a akcelerometr, který sleduje pohyb modulu a podle toho řídí režim spánku. Modul je programovatelný přes Arduino IDE. [36]

Rozměry: 20 x 20 mm

Hmotnost: 2,8 g

Spotřeba v režimu spánku: $2,5 \mu\text{A}$

Průměrná spotřeba při vysílání každé 2 hodiny: $250 \mu\text{A}$

Napájecí napětí: 3 V

- L351120

LiPo akumulátor. [37]

Napětí: 3,7 V

Kapacita: 50 mAh

Rozměry: 3,5 x 11 x 20 mm

Hmotnost: 4,84 g

- LTE anténa Molex

Aktivní celulární anténa, všesměrová, dvoupásmová. [38]

Frekvenční pásma: 824 - 960 MHz, 1710 - 2170 MHz

Rozměry: 40,4 x 15,4 x 2 mm

Váha: 0,744 g

- Superkapacitor GW201F CAP-XX

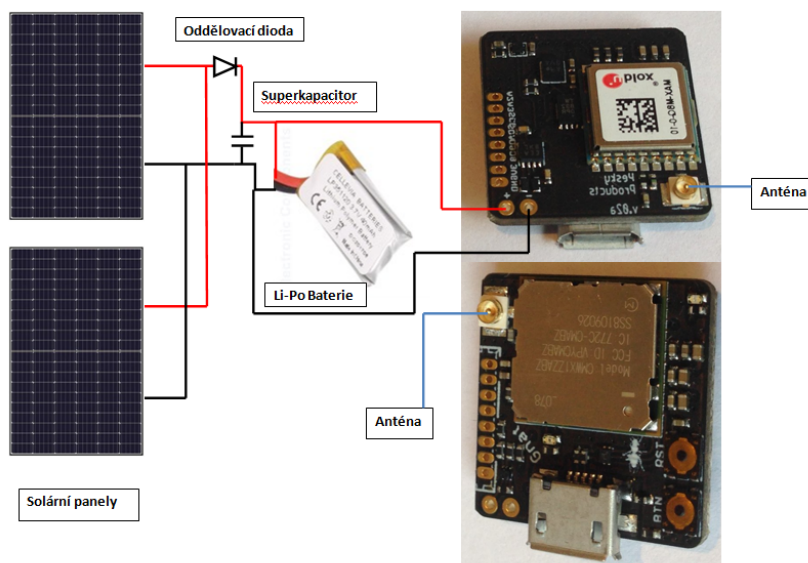
Elektrolytický kondenzátor. [39]

Kapacita: 0,4 F

Provozní napětí: 5 V DC

Rozměry: 28,5 x 17 x 2,5 mm
Maximální impulzní proud: 30 A
Hmotnost: 1,19 g

- BAT43
Oddělovací Schottkyho dioda. [40]
Maximální proud v propustném směru: 200 mA
Napětí v propustném směru: 450 mV
- PowerFilm SP4.2-37
Lehké solární články. [41]
Výstupní výkon: 90 mW
Maximální výstupní proud: 22 mA
Maximální výstupní napětí: 4,2 V
Rozměry: 84 x 37 x 0,22 mm
Váha: 0,85 g



Obr. 4.5: Malý sledovač pro pikobalón

4.3 Software

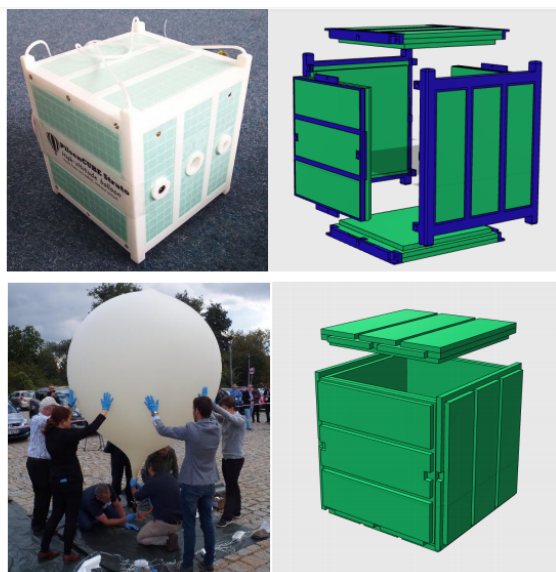
Ke zpracování přijatých GPS dat a vytvoření APRS paketů je použit open-source program Direwolf. Jedná se o softwarový TNC, kodér a dekodér AX.25 paketů. Používá protokol FX.25, který obsahuje navíc korekci chyb (Forward Error Correction) a je kompatibilní se stávajícími systémy. Direwolf je moderní software, který nahrazuje tradiční hardwarový TNC. Lze ho použít jako APRS GPS sledovač, opakovač, IGate (internetovou APRS bránu) nebo jako virtuální TNC pro další aplikace jako APRSIS32, Xastir, YAAC atd.[44][45]

Aby byl direwolf schopen pracovat s přijatými GPS údaji, je třeba do něj implementovat aplikaci GPSD. GPSD je nástroj pro sběr dat z GPS zařízení a dalších navigačních senzorů, která jsou ve formátu NMEA 0183. Vytváří z nich objekty ve formátu JSON a posílá je na výstup na TCP/IP port. Aplikace obsahuje také nástroje pro diagnostiku

GPS přijímačů.

GPSD je součástí aplikace mapy pro telefony s Androidem, dronech, robotech, autonomních vozidlech, vojenských vozidlech atd.[42][43]

4.4 Ukázky balónů a balónových sond



Obr. 4.6: Ukázka latexového balónu a polystyrenové sondy projektu PilsenCUBE-Strato



Obr. 4.7: Mylarový pikobalónek a sledovač z modulu Gnat



Obr. 4.8: Ukázka velkého stratosférického balónu |Převzato z [52]|

5

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat sledovací zařízení pro balónovou sondu. Výsledkem jsou dva návrhy. Prvním je sledovač pro sondu PilsenCUBE-Strato. Skládá se z GPS přijímače Neo-6M, APRS vysílače Radiometrix HX1 a malého počítače Raspberry Pi Zero, na kterém běží program Direwolf, který formátuje přijaté souřadnice do APRS paketů a řídí jejich vysílání. Systém je napájen dvěma solárními panely s micro USB nabíječkou a Li-Ion akumulátorem. Dostatečné napětí a proud pro Raspberry Pi zajišťuje step-up booster. Sledovač váží přibližně 80 g a baterie ho vydrží napájet přibližně hodinu a půl. Po sestavení sledovač funguje jen částečně. Nabíjení baterie solárními panely je funkční, GPS modul přijímá souřadnice, ale rádio nevysílá. Tento celek je poněkud těžký a energeticky náročnější než by bylo vhodné pro pikobalón.

Druhým je sledovač, jehož základem je modul Gnat s LoRa rádiem Sematech SX1276, GPS přijímačem MAX8Q a akcelerometrem. Napájení je řešeno dvěma solárními panely a LiPo baterií. Celek je lehký a má nízkou spotřebu energie, proto se hodí pro pikobalónovou sondu. Váží jen 12 gramů a baterie ho vydrží napájet 8 dní. Pro vypuštění sledovače na balónu by bylo třeba ho uzavřít do malé polystyrenové krabičky se solárními panely a anténami vyvedenými ven. Tento sledovač nebyl z časových důvodů realizován.

Literatura

- [1] Blandford, D., Randall, M. E., Roberts, D. *Tracking High Altitude Balloons in an EE Projects Class Paper presented at 2013 ASEE Annual Conference & Exposition*. Atlanta, Georgia: 2013, červen. 10.18260/1-2?22642.
- [2] Bohátka, Jan, Bc. *FM vysílač APRS telemetrických dat v pásmu 144 MHz*. Brno: 2011, diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.
- [3] Clark, P., Funk, M., Funk, B., Funk, T., Meadows, R. E., Brown, A. M. *An open source toolkit for the tracking, termination and recovery of high altitude balloon flights and payloads*. Ithaca: Cornell University Library. 10.1088/1748-0221/14/04/P04003.
- [4] Lee, W., Conklin, N. B. . *Solar Eclipse Ballooning with a Multiband Tracking Subsystem for Undergraduate Research Experience Paper presented at 2017 ASEE Annual Conference & Exposition*. Columbus, Ohio, 2017, červen. 10.18260/1-2?28832.
- [5] M. Mirza, Y. A. Ahmad and T. S. Gunawan. *Low altitude balloon IoT tracker*. Putrajaya, Malaysia: 2017 IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA). pp. 1-6.
- [6] *Narrow Band Data Radio* Dostupné z: <http://www.raveon.com/Info-Narrow-Band-Data-Radio.html>
- [7] Rustam Akhtyamov, Ignasi Lluch i Cruz, Hripsime Matevosyan, Dominik Knoll, Udrivolf Pica, Marco Lisi, Alessandro Golkar. *An implementation of Software Defined Radios for federated aerospace networks: Informing satellite implementations using an inter-balloon communications experiment*. Acta Astronautica: svazek 123, 2016, strany 470-478. ISSN 0094-5765.
- [8] Singam, C. A. K. *Implementation of a low-cost flight tracking system for high-altitude ballooning*. Ithaca: Cornell University Library. 10.1088/1748-0221/14/04/P04003.
- [9] *Systém GPS* Dostupné z: <https://publi.cz/books/231/03.html>

- [10] *Ublox MAX-8 GNSS modul* [foto] Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/product/max-8-series>
- [11] *Ublox MAX-8 GNSS modul* Dostupné z: https://www.u-blox.com/sites/default/files/MAX-8_DataSheet_%28UBX-16000093%29.pdf
- [12] *Adafruit Ultimate GPS* Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/adafruit-ultimate-gps>
- [13] *Radiometrix HX1* Dostupné z: <https://www.radiometrix.com/content/hx1>
- [14] *Radiometrix MTX2* Dostupné z: <https://www.radiometrix.com/content/mtx2>
- [15] *BladeRF 2.0* Dostupné z: <https://www.nuand.com/bladerf-2-0-micro>
- [16] *Radiometrix NTX2/NRX2* Dostupné z: <https://www.radiometrix.com/node/343>
- [17] *Microtrak 1000* Dostupné z: https://www.byonics.com/downloads/MicroTrak-1000_Manual_v0.9.pdf
- [18] *TinyTrak3+* Dostupné z: https://www.byonics.com/downloads/TinyTrak3Plus_v1.03.pdf
- [19] *SRB-MXTRAK* Dostupné z: <http://www.rpc-electronics.com/datasheets/srb/srbmxtrak.pdf>
- [20] *NAL 9602-LP* Dostupné z: <https://tracplus.freshdesk.com/support/solutions/articles/44001752884-9602-lp-overview>
- [21] *NAL 9602-LP* [foto] Dostupné z: <https://satellitephonestore.com/catalog/sale/details/nal-iridium-9602-lp-693>
- [22] *XTEND RF modem* Dostupné z: https://www.digi.com/resources/library/datasheets/ds_xtend
- [23] *GPS přijímač ISM 300X* Dostupné z: https://www.inventeksys.com/wp-content/uploads/2012/05/ISM_300X_Evaluation_Spec_Rev_1_0_1.pdf
- [24] *Dorji DRF1278DM* Dostupné z: <http://www.dorji.com/docs/data/DRF1278DM.pdf>
- [25] *Alinco DR-130T* Dostupné z: https://www.universal-radio.com/catalog/fm_txvrs/dr130t.html, https://www.universal-radio.com/catalog/fm_txvrs/dr130ts.html
- [26] *Baofeng BF-F8HP* Dostupné z: <https://baofengtech.com/product/bf-f8hp/>
- [27] *Arduino Zero* Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-zero>
- [28] *Adafruit Feather M0* Dostupné z: https://www.adafruit.com/product/2772?gclid=Cj0KCQjwwLKFBhDPARIsAPzPi-KBL24Ke74IsDd9JCiobmUzyDPFBnt-3y7TUbZFM6Pbb7C000uk6VkaApn9EALw_wcB

- [29] *Raspberry Pi Zero* Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi/647-raspberry-pi-zero-w-4053199547425.html>
- [30] *Solární panel MPT4.8-75* Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/1009/Electronic_Component_Spec_Sheet_Cla_77DEA84523C82-1658524.pdf
- [31] *Micro USB nabíječka* Dostupné z: https://www.hadex.cz/m401a-nabijacka-li-ion-clanku-1a-s-ochranou-modul-s-io-tp4056-micro-usb/?gclid=Cj0KCQjwwLKFBhDPARIsAPzPi-IIUOrrBtxCLse7zCEUASlW1xwNDU_jP6O6J7yZMquEsAIhy-IgIQcaAqQcEALw_wcB
- [32] *Li-Ion baterie* Dostupné z: <https://rpishop.cz/baterie/1497-nabijeci-baterie-sony-us14500vr2-aa-li-ion-36v-680-mah.html>
- [33] *Boost Step Up napájecí modul* Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/2163-boost-step-up-napajeci-modul-dc-dc-2v-5v-na-5v-2a.html?gclid=Cj0KCQjwwLKFBhDPARIsAPzPi-IVa56rxpldc8Mrx9UsX7Rk2tlNfVDCQ1gUshQcHhJyDb1EWLY-gYMaAohHEALw_wcB
- [34] *Modul GPS Neo-6M* Dostupné z: <https://pajtech.cz/modul-gps-neo-6m-uart-antna-arduino-p-18248.html>
- [35] *LightAPRS-W* Dostupné z: <http://qrp-labs.com/lightaprs-w>
- [36] *Gnat LoRa+GNSS tracker* Dostupné z: <https://www.tindie.com/products/tleracorp/gnat-loragnss-asset-tracker/>
- [37] *LiPo akumulátor L351120* Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/details/accu-lp351120_cl/akumulatory/cellevia-batteries/l351120/
- [38] *LTE anténa Molex* Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/276/2/2125700100_ANTENNAS-1912785.pdf <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Molex/212570-0100?qs=d0WKA1%252BL4KathfyOhUKvlg%3D%3D>
- [39] *Superkapacitor GW201F CAP-XX* Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/gw201f/superkondenzatory/cap-xx/>
- [40] *Schotkyho dioda BAT43* Dostupné z: https://cz.mouser.com/ProductDetail/STMicroelectronics/BAT43?qs=JV7lzlMm3yJOdNVXLuej0w%3D%3D&gclid=Cj0KCQjwhr2FBhDbARIsACjwLo2qN7SKTkLcHiXE5naQv-TRYrVYGn3jhtXxIymfpz7Hq0ZSEWkImYgaAqr1EALw_wcB
- [41] *Solární články PowerFilm SP4.2-37* Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/PowerFilm/SP42-37?qs=%2Fha2pyFaduimdgxa7TiPp48bdTeeyAJYev7EbHPrdhU%3D>

- [42] *GPSD* Dostupné z: <https://gpsd.gitlab.io/gpsd/>
- [43] *Eric Raymond, GPSD* Dostupné z: <https://www.aosabook.org/en/gpsd.html>
- [44] *Direwolf* Dostupné z: <https://github.com/wb2osz/direwolf>
- [45] *Direwolf APRS tracker* Dostupné z: <https://github.com/wb2osz/direwolf/blob/master/doc/APRS-Telemetry-Toolkit.pdf>
- [46] The APRS Working group *APRS protocol reference*, 29. srpen 2000. Dostupné z: <http://www.aprs.org/doc/APRS101.PDF>
- [47] *WSPR* Dostupné z: <https://physics.princeton.edu/pulsar/k1jt/wspr.html>
- [48] *WSPR operational frequencies* Dostupné z: https://vk6ysf.com/wspr_frequ.htm
- [49] *Iridium Global Network* Dostupné z: <https://www.iridium.com/network/globalnetwork/>
- [50] *Scientific balloons, NASA* Dostupné z: <https://www.nasa.gov/scientific-balloons/types-of-balloons>
- [51] Mann, Adam *Commercial balloons in the stratosphere could monitor hurricanes and scan for solar storms*, *Science*, 22. červen 2017. Dostupné z: <https://www.sciencemag.org/news/2017/06/commercial-balloons-stratosphere-could-monitor-hurricanes-and-scan-solar-storms>
- [52] Gianine M. Figlozzi, NASA *Balloon experiment to study bacteria on the edge of space*, 25. září 2015. Dostupné z: <https://phys.org/news/2015-09-ballooning-bacteria-edge-space.html>