

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroniky a informačních technologií**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vývoj elektronických systémů gondoly pro lety na  
stratosférickém balónu.**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2020/2021

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Alexey BEREZKA**  
Osobní číslo: **E19N0054P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**  
Téma práce: **Vývoj elektronických systémů gondoly pro lety na stratosférickém balónu.**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

#### Zásady pro vypracování

1. Popište technické řešení elektronických systémů stávající gondoly pro stratosférické balónové lety.
2. Navrhněte a realizujte pomocné elektronické obvody pro zajištění vyšší spolehlivosti mise při nestabilitě testovaných senzorů.
3. Doplněte vybavení gondoly o APRS nebo jiné obdobné sledovací zařízení.
4. V rámci možností proveďte testy realizovaného řešení.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. DUDÁČEK, L. PilsenCUBE-Strato – stratosferic test of the sensors for PilsenCUBE-II satellite. In Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 13-16. ISBN: 978-80-261-0785-9

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

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

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



  
**Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

## **Abstrakt**

Cílem práce je pokračovat ve vývoji stávající gondoly PilsenCUBE-Strato pro stratosférické balónové lety. Je třeba navrhnout a doplnit zařízení, které s určitou periodou dokáže zjistit polohu a přenášet data na velké vzdálenosti s co nejmenší spotřebou energie a s minimální hmotností a zároveň splňuje teplotní požadavky během letu. Typicky se využívají pro přenos polohy některé z IoT sítí (Lora, SigFox, LTE-NB) nebo radioamatérských sítí (APRS, WSRP), a také u velkých profesionálních balonových sond přenos přes satelitní modemy sítí Iridium, GlobalStar, TDRSS. Pro návrh sledovacího zařízení byly vybrány moduly a typ sítě pro přenos dat, které jsou vhodné pro malé sondy typu PilsenCUBE-Strato. Dále byly vypracovány možné varianty akumulace energie, včetně těch, které mohou napájet elektronické moduly po několik dní letu pro různé typy sond.

### Klíčová slova

GNSS, LoRa, stratosférické sondy, FiPy, MicroPhyton, sledovač

## **Abstract**

The aim of the work is to continue the development of the existing PilsenCUBE-Strato nacelle for stratospheric balloon flights. It is necessary to design and complete a device that can detect position and transmit data over long distances with a certain period of time, with the least power consumption and minimum weight, while meeting the temperature requirements during flight. Typically, some of the IoT networks (Lora, SigFox, LTE-NB) or amateur radio networks (APRS, WSRP) are used for position transmission, as well as for large professional balloon probes transmission via satellite modems of Iridium, GlobalStar, TDRSS networks. For the design of the tracking equipment, the modules and the type of data transmission network suitable for small probes like PilsenCUBE-Strato were selected. Furthermore, possible energy storage options were developed, including those that can power the electronic modules for several days of flight for different types of probes.

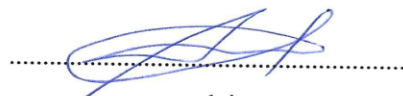
## **Key words**

GNSS, LoRa, stratospheric balloon, FiPy, MicroPhyton, tracker

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.



podpis

V Plzni dne 3.6.2021

Alexey Berezka

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Ivovi Veřtátovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Diplomová práce vznikla s podporou studentské grantové soutěže SGS-2021-005.

**Obsah:**

<b>Seznam symbolů a zkratk.....</b>	<b>9</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Struktura systému pro balonové lety .....</b>	<b>15</b>
1.1 Balón .....	15
1.2 Modul s mikrokontrolérem .....	16
1.3 GNSS modul .....	16
1.4 Modem pro odesílání dat.....	16
1.5 Napájecí zdroj .....	17
1.6 Způsoby odesílání dat .....	18
<b>2 Návrh a výběr součástek systému pro sledování a odesílání polohy .....</b>	<b>26</b>
2.1 Modul s mikrokontrolérem a modemem pro odesílání dat .....	26
2.2 GNSS modul .....	27
2.3 Teoretická spotřeba energie .....	28
2.4 Dimenzování kapacity napájecího zdroje.....	31
2.5 Hmotnost systému .....	35
<b>3 Praktická část .....</b>	<b>36</b>
3.1 Programování modulu .....	36
3.2 Připojení k síti LoRa TTN .....	37
3.3 Naměřená spotřeba.....	44
<b>4 Závěr .....</b>	<b>49</b>
<b>Seznam literatury a informačních zdrojů.....</b>	<b>51</b>
<b>Přílohy.....</b>	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$I_{sm}, I_{tm}, I_{1st}, I_{645}, I_{1845}$  – průměrný proud pro sleep mode, transmit mode, první start, odesílání dat každých za 10 minut a odesílání dat každých za 30 minut

$U_{in,min}$  – minimálně napětí modulu FiPy

$P_{sm}, P_{tm}, P_{1st}, P_{645}, P_{1845}$  – průměrná spotřeba pro sleep mode, transmit mode, první start, odesílání dat každých za 10 minut a odesílání dat každých za 30 minut

$t_{den}, t_{noc}$  – čas trvání dne a noci

$W_{den}, W_{noc}, W_{let}$  – spotřebované energie v dobu dne, noci a za celý let

$U_{F\check{c}}, I_{F\check{c}}, P_{F\check{c}}$  – napětí, proud a výkon fotovoltaických článků

$C_{bat}, C_{kond}$  – kapacity baterie a kondenzátoru

GNSS – Global Navigation Satellite System, globální družicový polohový systém

GPS – GNSS „Global Positioning System“

Glonass – GNSS „Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema“

IoT – Internet of Things, Internet věcí

LoRa – Long Range

APRS – Automatic Packet Reporting System

WSPR – Weak Signal Propagation Reporter

## Úvod

Práce se zabývá problematikou lokalizace sond zavěšených na balónech plněných héliem, které se používají pro stratosférické výškové experimenty nebo pro sledování vzdušných proudů v atmosféře. Cílem zařízení je měřit svoji polohu vůči GNSS satelitním systémům a odesílat jí pravidelně na větší vzdálenosti pro monitorování polohy sondy. Typicky se využívají pro přenos polohy některé z IoT sítí (Lora, SigFox, LTE-NB), radioamatérských sítí (APRS, WSRP) nebo přenos přes satelitní modemy sítí Iridium, GlobalStar, TDRSS. Vzhledem k tomu, že je omezení užitečné zátěže nesené balónem, máme požadavky na nízkou hmotnost systémů, a vzhledem k vysoké výšce jsou zde i požadavky na určitý teplotní režim.

Balónová stratosférická sonda PilsenCUBE-Strato byla vytvořena za účelem testování elektronických senzorů a kamery pro malý studentský satelit PilsenCUBE II. Její mechanická konstrukce je tvořena kombinací 3D tisku nosného rámu z PLA materiálu a ze tří vrstev vyřezávaných a přes sebe lepených výplní stěn z 5 mm silného extrudovaného polystyrenu. Kombinací 3D tisku nosného rámu a 15 mm silného vlepeného polystyrenového zateplení se podařilo vytvořit dostatečně lehkou platformu pro vynesení meteorologickým balónem až do výšek přes 30 km, která zajistí dostatečnou tepelnou izolaci elektronických systémů od vnějšího prostředí stratosféry a je zároveň dostatečně pevná pro jejich ochranu při padákem brzděném dopadu na zem s dopadovou rychlostí 4 až 6 m/s, aby je bylo možné opakovaně využívat.



**Obr. 1** PilsenCUBE-Strato.

Základem pro testování elektronických modulů (infračervené kamery, akcelerometry a gyroskopy, kamera pro viditelné spektrum) satelitu PilsenCUBE II se staly malé jednodeskové počítače Raspberry Pi Zero, které mají dostatečně malou hmotnost, nízký příkon a vysoký výpočetní výkon zajišťující plynulý záznam videa z letu, obsluhu testovaných elektronických modulů, obsluhu přídavných senzorů pro monitorování prostředí a provádějící záložní přenos dat přes mobilní sítě během přistávání. Původní balónová sonda obsahovala jeden jednodeskový počítač, později byla funkce záznamu předána druhému separátnímu jednodeskovému počítači, aby probíhala obsluha testovaných senzorů s co nejnižší latencí. Stav běhu programů může být indikován na vnější RGB LED diody, takže i během polních podmínek při přípravě vzletu meteorologického balónu může být činnost sondy monitorována bez potřeby jejího rozebrání a připojení diagnostických nástrojů.

Jednodeskové počítače jsou napájeny separátními DC/DC spínanými měniči, které konvertují napětí dvojice paralelně spojených Li-Ion akumulátorů (2x 2400mAh / 3.7V) na stabilizované napětí 5V. Akumulátory mohou být dobíjeny i během přípravy startu externím

USB nabíječem akumulátorů, který se napájí přes USB kabel z běžné power banky pro mobilní telefony nebo z notebooku.

Testované senzory jsou vlepeny do výřezů v jednotlivých stěnách balónové sondy a propojeny na příslušnou I2C sběrnici jednodeskového počítače a je k nim přivedeno stabilizované napájecí napětí rovněž z jednodeskového počítače. Separátní vedení I2C sběrnice a napájení ke každému senzoru v různých stěnách se ukázalo jako ne zcela spolehlivé a praktické. Příliš velké množství vodičů vedených malým prostorem sondy od počítačů k jednotlivým sensorům způsobovalo v kombinaci s některými senzory citlivými na časování průběhů na I2C sběrnici jejich nestabilitu a zasekávání. Pro budoucí testovací lety by bylo vhodné připravit jinou strategii připojování sensorů k jednodeskovým počítačům, aby byla zajištěna jejich vyšší spolehlivost a také možnost jednoduchého přidávání dalších sensorů v krátkém čase, pokud by o testování sensorů projevil zájem externí subjekty, např. formou dodávky celé jedné stěny sondy již osazené senzory a umožňující rychlé napojení na systémy sondy.

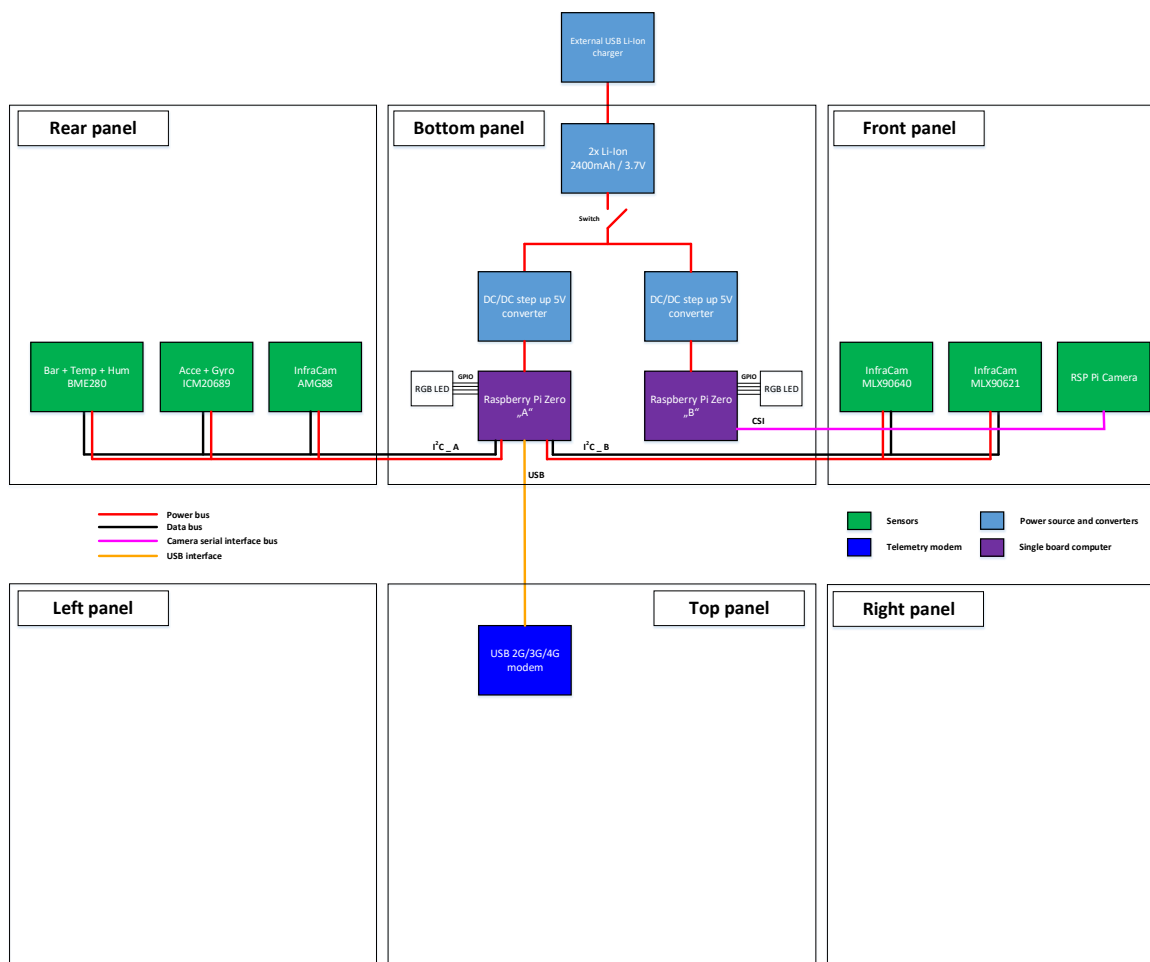


**Obr. 2** Start balónu s PilsenCUBE-Strato.

Průběh letu sondy bývá monitorován senzorem BME280, který měří teplotu, tlak a relativní vlhkost. Volbou umístění senzoru tak lze monitorovat vnější teploty ve stratosféře nebo teploty uvnitř sondy. Z měření atmosférického tlaku lze dopočítávat hrubý odhad nadmořské výšky a případně v budoucnu na základě její znalosti řídit některé experimenty nebo moduly (např. aktivovat modem mobilních sítí jen v nízkých výškách, kde je vyšší šance na spojení se základnovou stanicí).

Modem pro mobilní síť generací 2G, 3G a 4G je připojen přes USB rozhraní k jednodeskovému počítači a je plánován pro zrcadlení obsahu SD karty počítače se záznamem dat senzorů na cloudová uložení během přistávání sondy na padáku, protože sonda může přistát v těžkém terénu s nemožností dostat se fyzicky k záznamu na SD kartě. Dosud nebyl modem při letu využit, protože před plánovaným letem nastaly problémy s připojením k síti operátora v zahraničí, zřejmě z důvodu špatně nastaveného roamingu a které se nepodařilo na poslední chvíli odstranit. Pro ušetření energie akumulátorů byl modem před letem vypnut.

Balónová sonda PilsenCUBE-Strato nemá vlastní sledovací zařízení pro sledování trajektorie letu a pro dohledávání po přistání (GNSS modul pro satelitní určení polohy a radiokomunikační modul pro pravidelné odesílání polohy), protože vždy letěla součástí společných balónových misí (několik sond uvázaných na jednom společném balónu a padáku). Organizátoři těchto letů sledování a dohledání sond zajišťovali. V této práci bude rozebrána možnost přidání autonomního modulu GNSS a použití vysílače APRS, WSRP nebo IoT.



**Obr. 3** Blokové uspořádání balónové sondy a rozmístění senzorů na stěnách.



# 1 Struktura systému pro balonové lety

Pro balony existují 2 základní druhy balonu – super-pressure a zero-pressure. Při dosažení výšky se plyn rozpíná. Běžný stratosférický balon (super-pressure) se při dosažení maximálního tlaku roztrhne a vědecká aparatura přistává na padáku, zatímco beztlakový balon vypouští přebytečný tlak a zůstává unášen proudovými proudy až do západu Slunce. Když slunce zapadne, vzduch se začne ochlazovat a plavidlo klesá. Při letech delších než 1-2 dny je zapotřebí zátěžová rezerva, která kompenzuje ztrátu vztlakové síly plynu (helium, vodík). Tyto balóny nepotřebují žádný motor ani palivo a po každém letu se plně zotaví. Mohou dosáhnout výšky až 42 km a udržet své přístroje ve vzduchu několik hodin. Některé stratosférické balóny mohou létat až jeden měsíc a vážit až 1100 kilogramů. V gondole může být umístěn letový počítač, systém řízení energie a tepla, ovládání motoru a orientace a jeden nebo více vědeckých přístrojů.

## 1.1 Balón

Pro krátkodobé lety se běžně používají různě velké balóny s nosností od několik desítek gramů až do jednotek kilogramů, které mohou letět do výšky až 20-40 km, kde teploty mohou být až minus 40-50 stupňů Celsia.

**Tab. 1** Příklad specifikace dvou super-pressure balonů.

	Malý balón	Největší balón
Materiál:	Směs přírodního kaučuku a latexu	Směs přírodního kaučuku a latexu
Průměr start/prasknutí:	117/300 cm	212/ 1300 cm
Hmotnost:	cca 200g	cca 3000g
Nosnost:	do 200 g	do 2720 g
Rychlost stoupání:	320 m/m	320 m/m
Výška výbuchu:	Max. 23 000 m	Max. 40 000 m
Průměr krku:	3 cm	5 cm

## 1.2 Modul s mikrokontrolérem

Je důležité, aby modul měl mikrokontrolér s podporováním režimu s nízkou spotřebou, kdy mikrokontrolér vyžaduje proud v řádu 10 – 100  $\mu\text{A}$ . To je důležité pro minimalizaci spotřeby, a tím i snížení váhy napájecího systému, aby byl vhodný i pro nejmenší sondy, které se při napájení musí spolehnout jen na malé superkapacitory nebo baterie. Dále musí podporovat UART, SPI, I2C pro připojení GNSS modulu, komunikačního modulu a dalších sensorů. A důležitá je také hmotnost.

Výhodou je, pokud modul již má podporu pro různé komunikační sítě, které by se daly použít jak pro odesílání polohy na velké vzdálenosti, tak pro případné odesílání velkého množství dat.

## 1.3 GNSS modul

Moduly GNSS by měly být více systémové přijímače, které jsou schopné pracovat naráz s několika ze současných systémů (GPS, Galileo, Glonass, BeiDou), opět je nutné zmínit i minimalizaci hmotnosti antény, aby byly použitelné i pro nejmenší sondy. Důležitým požadavkem je spotřeba během aktivního sledování satelitu a podpora režimu s nízkou spotřebou, kdy zůstává napájená paměť s efemeridami a obvod hodin reálného času.

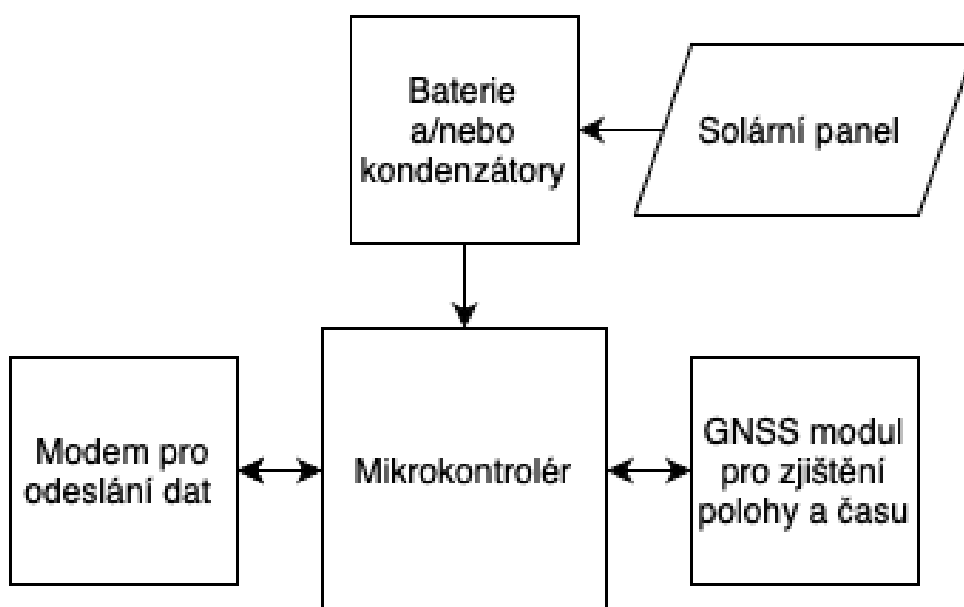
## 1.4 Modem pro odesílání dat

Modem pro odesílání dat by měl podporovat některé ze sítí pro odesílání na velké vzdálenosti (více než 20-40 km), jako je LoRa, Sigfox, radioamatérské sítě APRS, WSRP nebo přenos přes satelitní modemy sítí Iridium, GlobalStar, TDRSS. Udržovat režim nízké spotřeby energie a případně mít podporu pro mobilní sítě 3, 4, 5G v nižších výškách, aby bylo možné odeslat další shromážděná data a polohu, kdy sonda přistává na padáku ještě před dopadem na zem.



## 1.5 Napájecí zdroj

S tímto typem balonu v tab. 1 létáme obvykle několik hodin během dne, což znamená, že nebudeme potřebovat velké množství energie v zásobníku a můžeme použít pouze potřebný počet solárních článků. Pokud však potenciálně uvažujeme o létání po delší dobu, musí zařízení pro ukládání energie splňovat technické požadavky na provoz při nízkých teplotách, být dostatečně lehké a energeticky dostatečné s rezervou na ulétnutí balónu. Standardně se balón plní tak, aby v požadované výšce praskl a na padáku aparatura přistála. Občas se ale nepovede správně naplnit, nedosáhne výšky prasknutí, zůstane níže a je unášen pryč – pak je dobré mít možnost jej stále sledovat, byť třeba s nižší četností komunikace a určení polohy, aby se doba napájení prodloužila.



**Obr. 4** Bloková schéma elektronických systémů pro balonové lety.

Pro ukládání energie a udržování výkonu v noci lze použít superkondenzátory nebo baterie s dostatečnou kapacitou a vhodným rozsahem pracovních teplot.

## 1.6 Způsoby odesílání dat

- LTE NB1

NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) je standard mobilní komunikace pro telemetrická zařízení s malým objemem vyměňovaných dat. Byl vyvinut konsorciem 3GPP v rámci práce na standardech pro buňkové sítě nové generace. První pracovní verze specifikace byla představena v červnu 2016.

Je určeno pro připojení široké škály autonomních zařízení k digitálním komunikačním sítím. Například lékařské senzory, měřiče spotřeby zdrojů, chytrá domácí zařízení atd. V běžném životě se takové komunikační systémy označují jako internet věcí (IoT). NB-IoT je jedním ze tří standardů IoT vyvinutých 3GPP pro mobilní sítě: eMTC (enhanced Machine-Type Communication), NB-IoT a EC-GSM-IoT. Standard eMTC má největší šířku pásma a je nasazen na zařízení LTE. Síť NB-IoT lze nasadit na zařízeních mobilní sítě LTE i samostatně, včetně sítě GSM. EC-GSM-IoT poskytuje nejnižší šířku pásma a je nasazen v sítích standardu GSM.

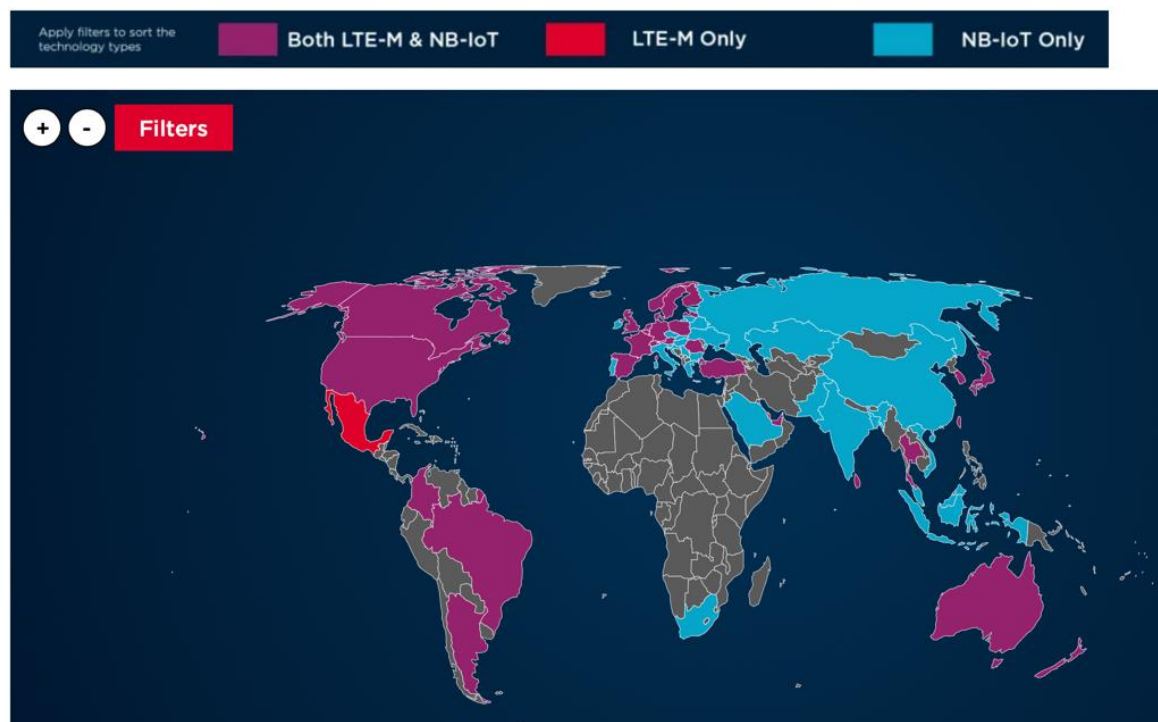
**Tab. 2** Typické parametry spotřeby jednoho z LTE-NB modemu.

Vysílací proud (špičkový):	420 mA (1,5 W)
Přijímací proud (špičkový):	330 mA (1,2 W)

**Tab. 3** Parametry radiového rozhraní LTE NB1 modemu.

3GPP Release	LTE Cat NB1, Release 13
Špičková rychlost downlinku	26 kbit/s
Špičková rychlost uplinku	66 kbit/s (multi-tone) 16.9 kbit/s (single-tone)
Zpoždění	1.6–10 s
Počet antén	1
Duplexní režim	Half Duplex
Šířka pásma příjmu zařízení	180 kHz
Přijímací řetězce	1 (SISO)
Vysílací výkon zařízení	20 / 23 dBm

V současné době pokrytí LTE pro IoT aplikace je velmi dobré na většině zalidněných kontinentů kromě Afriky. Stejně jako u ostatních sítí stále pokrytí roste.



**Obr. 5** Mapa pokrytí LTE-M/NB k listopadu 2020 – převzato z [5].

- **Sigfox**

Sigfox využívá diferenciální binární klíčování s fázovým posunem (DBPSK) a Gaussovo klíčování s frekvenčním posunem (GFSK), které umožňuje komunikaci v průmyslovém, vědeckém a lékařském (ISM) rádiovém pásmu, které využívá frekvenci 868 MHz v Evropě a 902 MHz v USA. Používá úzkopásmový signál tzv. "Ultra Narrowband", který v tomto frekvenčním pásmu prochází s menším útlumem pevnými objekty, a vyžaduje malé množství energie, tzv. "Low Power Wide Area Network" (LPWAN).

Síť je založena na hvězdicové topologii s jedním uzlem a vyžaduje, aby mobilní operátor přenášel datový provoz od základové stanice Sigfox. Signál lze také použít ke snadnému pokrytí velkých oblastí a dosažení podzemních zařízení. V listopadu 2020 pokrývala síť Sigfox IoT celkem 5,8 milionu kilometrů čtverečních v 72 zemích s 1,3 miliardy lidí po celém světě. Mapa pokrytí je znázorněna na obr. 6.

**Tab. 4** Typické parametry spotřeby jednoho z Sigfox modemu.

Vysílací proud (průměrný):	42 mA
Přijímací proud (průměrný):	11.2 mA



## A worldwide footprint

Sigfox 0G network is already available in 72 countries and regions

**Obr. 6** Mapa pokrytí sigfox, k listopadu 2020 – převzato z [7].

- **Iridium**

Iridium je jediným mobilním satelitním operátorem, jehož pokrytí zahrnuje i polární oblasti. Díky téměř 100% pokrytí je mobilní satelitní komunikace Iridium žádaná mezi vládními zákazníky a soukromými společnostmi působícími mimo oblast pokrytí operátorů GSM.



Jedná se o bezdrátovou telefonní síť mobilní osobní komunikace provozovanou na nízkoorbitálních družicích a určenou k poskytování souboru standardních telefonních služeb – přenosu hlasu a dat malého objemu. Mapa pokrytí je znázorněna na obr. 8.

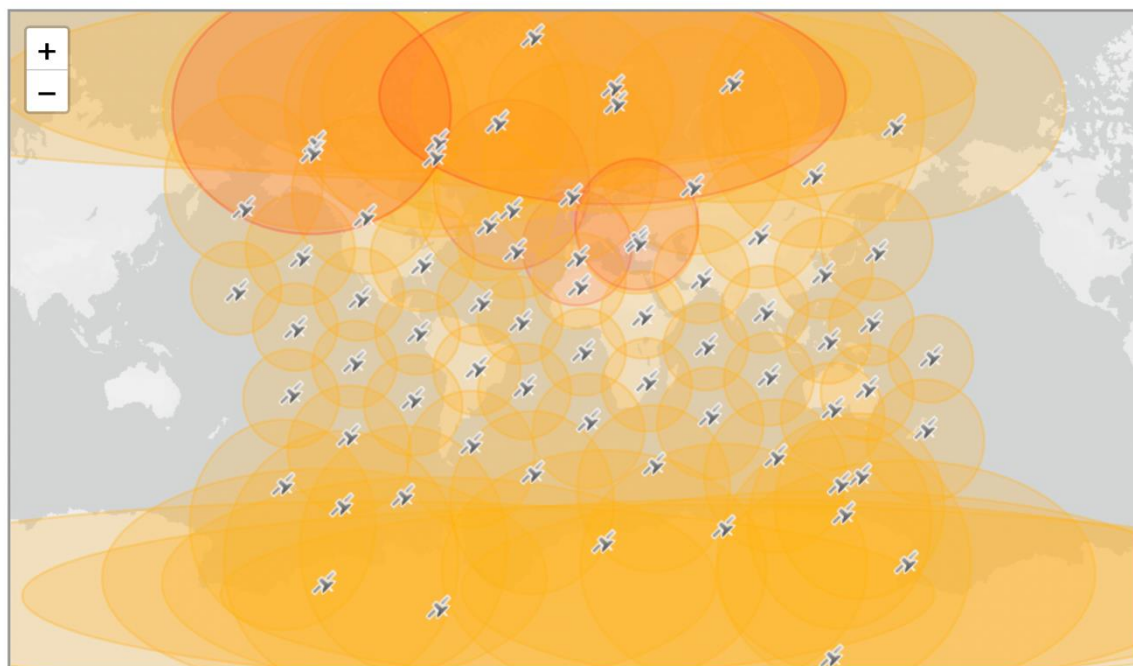
**Obr. 7** Iridium modem

**Tabulka č. 1** Typické parametry spotřeby jednoho z Iridium modemu.

Vysílací proud (průměrný):	145 mA
Vysílací proud (špičkový):	1,3 A
Přijímací proud (průměrný):	39 mA
Přijímací proud (špičkový):	156 mA

## Iridium Coverage Map | Real-Time

Page Updated April 12, 2021



**Obr. 8** Mapa pokrytí Iridium, převzato z [8].

- APRS

APRS (Automatic Packet Reporting System) je obecný název pro radioamatérskou paketovou technologii a protokol. Na tomto protokolu je založen globální komunikační systém. Jeho hlavním úkolem je přenos informací o souřadnicích objektů, zasílání zpráv, přenos dat z meteorologických stanic a další. Pro Evropu je používána frekvence 144,800 MHz.

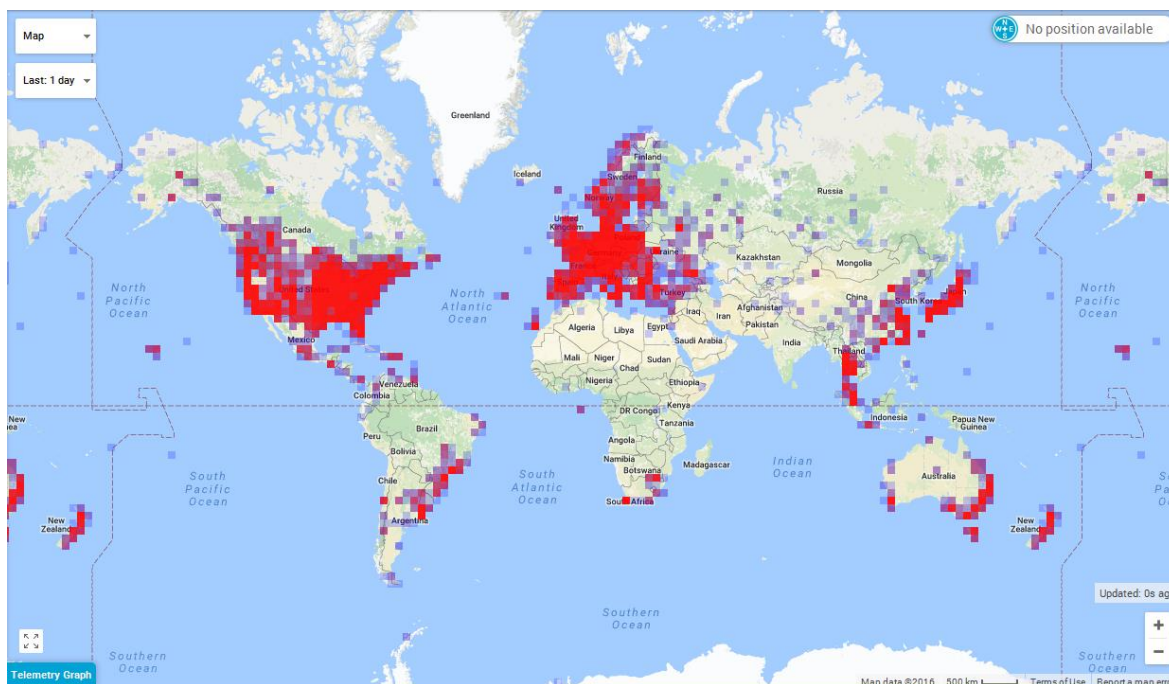
Jedná se v podstatě o standard, který popisuje typy a formáty zpráv, které lze přenášet po síti. Formát paketu se může mírně lišit v závislosti na přenosovém prostředí.

### Typy zpráv:

1. Maják (Beacon) - pravděpodobně nejčastěji používaná zpráva. Obsahuje volací značku stanice, její souřadnice a krátký komentář.
2. Krátká zpráva (Message) - je obdobou SMS a obsahuje volací znak příjemce, odesílatele a text krátké zprávy.
3. Balíček z meteorologické stanice (WX) - obsahuje informace o meteorologických podmínkách v daném místě (teplota, tlak, vlhkost, síla a směr větru).

Nejčastěji používanými typy zpráv jsou majáky a textové zprávy. Ve specifikaci lze nalézt i řadu dalších typů zpráv. Mezi ně patří například zpráva o telemetrii stanice, tj. je možné přenášet volně definovatelné parametry údajů některých senzorů.

Služba APRS Internet Service (APRS-IS) je součástí infrastrukturní složky APRS, která je zodpovědná za sběr informací z pevných frekvencí APRS a jejich odesílání přes internet na vyhrazené servery APRS rozeté po celém světě. Tato komponenta právě dělá z APRS globální systém pro sledování situace v reálném čase, protože kombinuje data z mnoha oblastí, které používají APRS, ale nemají přímé spojení prostřednictvím rádiových vln. Data ze serverů APRS-IS lze později použít pro vizualizaci, agregaci a analýzu v rámci různých systémů a aplikací.



**Obr. 9** Mapa oblasti, odkud byly zachyceny APRS pakety z balonů, převzato z [12].

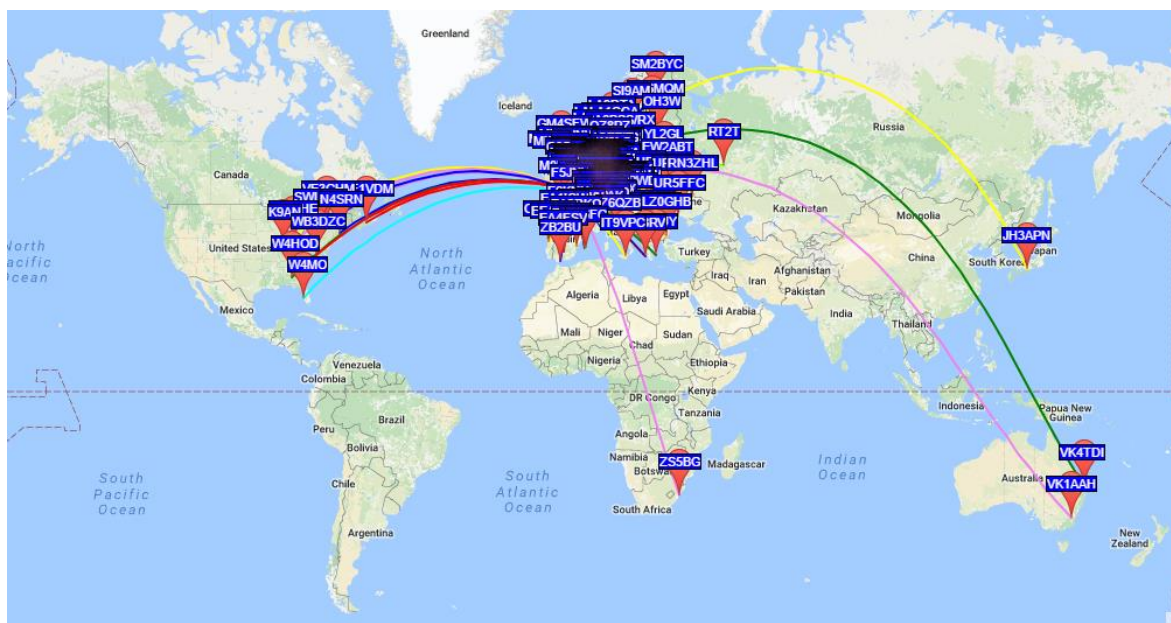
- WSPR

Joseph Hooton Taylor, americký astrofyzik a nositel Nobelovy ceny, vytvořil v roce 2008 program WSPR (Weak Signal Propagation Reporter). Myšlenka programu je jednoduchá – přenášet signál, který nese jen nezbytné minimum informací, které lze díky tomu dekodovat na maximální vzdálenost pro ověření dosahu spojení na krátkých vlnách.

WSPR je co nejjednodušší digitální signál, který vysílá rychlostí pouhých 1,4648 bit/s pro maximalizaci dosahu spojení. Používá frekvenční modulaci (4-FSK) s frekvenčním odstupem 1,4648 Hz, takže šířka pásma signálu je pouze 6 Hz. Odesílaný datový paket má velikost pouze 50 bitů a jsou přidány bity pro opravu chyb (nerekurzivní konvoluční kód, délka omezení  $K=32$ , rychlost= $1/2$ ), takže celková velikost paketu je 162 bitů. Těchto 162 bitů je odvíšláno přibližně za 2 minuty.

Díky úzkopásmovému signálu je systém velmi citlivý. Minimální úroveň odstupů signálu od šumu pro dekodování je -28 dB. Pro příjem signálů WSPR stačí mít přijímač s možností příjmu úzkopásmové frekvenční modulace s přesnou frekvenční referencí.





**Obr. 10** Příklady navázaných spojení v pásmu krátkých vln přes WSPR systém, převzato z [11].

- LoRa

LoRa (Long Range) je patentovaná modulační technika pro rozsáhlé sítě s nízkým výkonem, která je založena na modulačních technikách rozprostřeného spektra odvozených z technologie chirp spread spectrum (CSS) a byla vyvinuta společností Cycleo z francouzského Grenoblu, kterou získala společnost Semtech, zakládající člen LoRa Alliance, a je patentována.

Technologie LoRa je určena pro komunikaci mezi stroji (M2M) a je kombinací speciální modulační metody LoRa a otevřeného komunikačního protokolu LoRaWAN. LoRaWAN definuje deset kanálů, z nichž osm má různé rychlosti přenosu dat od 250 bps do 5,5 kbit/s, jeden kanál LoRa s vysokou rychlostí přenosu dat 11 kbit/s a jeden kanál FSK s rychlostí 50 kbit/s. Maximální výstupní výkon povolený ETSI (European Telecommunications Standards Institute) v Evropě je +14 dBm, s výjimkou pásma G3, pro které je povoleno +27 dBm.

V architektuře LoRa není synchronizace se sítí vyžadována. V asynchronních pásmech určuje pouze povaha koncové aplikace, jak dlouho může zařízení "spát". To pomáhá šetřit energii baterie. Na rozdíl od jednoduchého připojení p2p je u sítě LoRaWAN vše mnohem složitější - zařízení jsou v síti registrována, provoz je šifrován různými klíči atd. Vzhledem k tomu, že síť je veřejná a přístupná veřejnosti, jsou zde velmi důležité otázky ochrany údajů.



V síti LoRaWAN existují 2 typy ověřování:

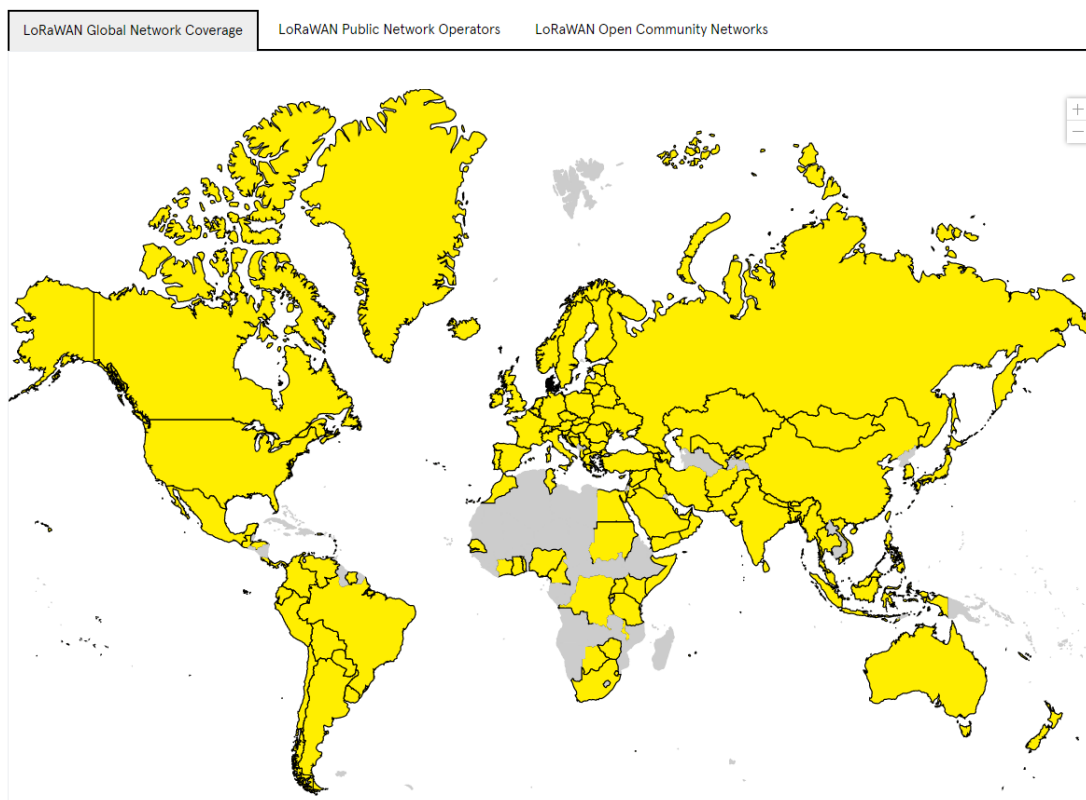
- Over-the-Air Authentication (OTAA). Zařízení jsou zaregistrována v síti a obdrží klíč potřebný k provozu.

- Aktivace ABP (Activation by Personalization). Nastavení jsou předem zapsána v zařízení, není nutné žádné další ověřování. Tento režim je jednodušší, ale má nevýhodu - data jsou jednoduše odesílána vzduchem, není zaručeno, že je rozbočovač přijal. Mapa pokrytí je znázorněna na obr. 11.

**Tab. 5** Typické parametry spotřeby jednoho z LoRa modemu.

Vysílací proud (průměrný):	28 mA
Přijímací proud (průměrný):	11.2 mA

**151** LoRaWAN Network Operators in **167** Countries



**Obr. 11** Mapa pokrytí LoRaWAN, převzato z [6].

## 2 Návrh a výběr součástek systému pro sledování a odesílání polohy

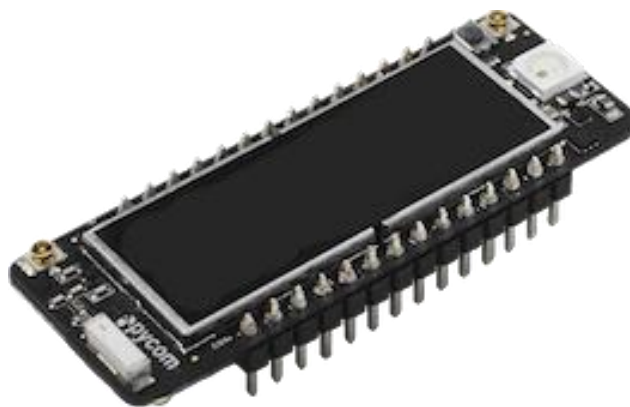
### 2.1 Modul s mikrokontrolérem a modemem pro odesílání dat

S ohledem na výše uvedené informace byl vybrán modul FiPy od společnosti Pycom, protože splňuje požadavky na nízkou hmotnost a provozní teploty. Má také integrovanou 4 MB RAM, 8 MB flash paměti, regulátor vstupního napětí (od 3,5 do 5,5 V), velké množství komunikačních modulů a podporu skriptovacích jazyků.

FiPy obsahuje bezdrátové rádiové moduly WiFi 2,4 GHz IEEE 802.11b/g/n 16Mb/s (/n až 150Mb/s) s dosahem signálu až 1 km, Bluetooth 4.2 standard s nízkou spotřebou (Bluetooth Low Energy, BLE). Deska je také vybavena nízkopříkonovou bezdrátovou technologií LoRa (Long Range) s dosahem signálu až 30-40 km a podporou protokolů LoRaWAN (v sítích LPWAN) a buněčných standardů LTE CAT M1 (eMTC) / LTE CAT NB1 (NB-IoT), které vyvinulo konsorcium 3GPP pro síť nové generace - IoT (13. specifikace LTE Advanced Pro).

PyCom FiPy podporuje programovací jazyk MicroPython a je plně kompatibilní s bezčipovými preprototypovacími deskami.

Hlavní procesor je zcela volný pro běh uživatelské aplikace. Pomocný koprocesor ULP může monitorovat univerzální periferní piny (GPIO), kanály ADC převodníků a monitorovat většinu interních periférií v režimu hlubokého spánku, přičemž odebírá pouze 25 mikroampérů proudu. Síťový procesor FiPy dokáže spravovat připojení WiFi a zásobník IPv6. Modul podporuje protokoly SSL/TLS, WPA-Enterprise a šifrovací algoritmy SHA, MD5, DES, AES pro síťová připojení.

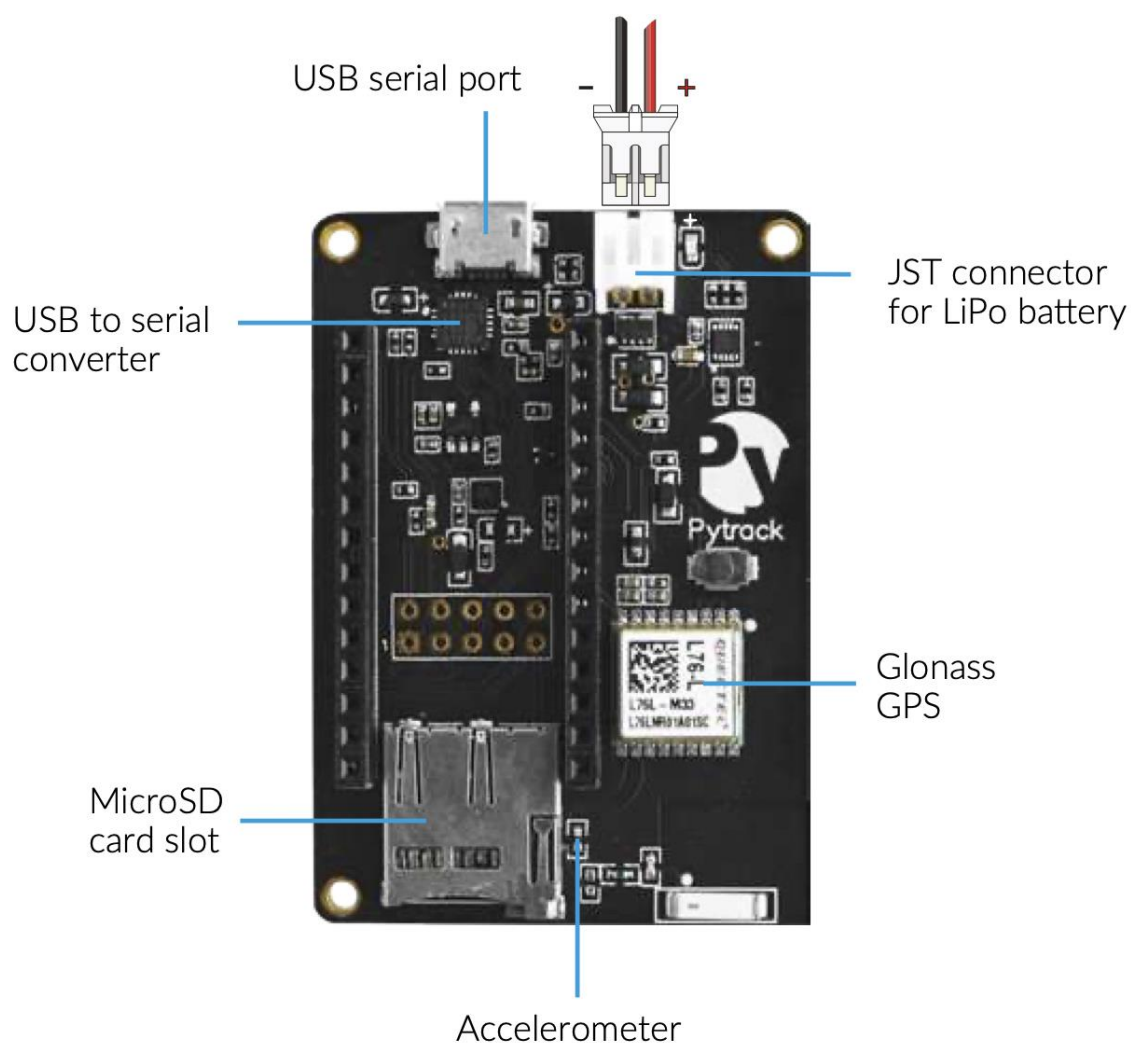


Obr. 12 Modul FiPy.

## 2.2 GNSS modul

Jako modul GNSS jsem zvolil L76 na rozšiřující desce PyTrack pro FiPy, který podporuje GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou a také režimy trvalého a periodického sledování polohy s funkcí hot-start.

Rozšiřující deska má slot pro kartu SD, samostatný konektor pro přímé napájení z LiPo baterie a 3-osý 12bitový akcelerometr.



**Obr. 13** Rozšiřující deska PyTrack.

## 2.3 Teoretická spotřeba energie

Potřebujeme, aby modul FiPy měl po dobu letu trvalé napájecí napětí mezi 3,5 až 5,5 V. Let může trvat několik hodin, jako v našem případě, nebo několik dní, například v případě, že balón zůstane pod hladinou prasknutí a je unášen pryč. Pro průběžné napájení ve dne je možné využít solárních panelů, jako zásobníky energie mohou sloužit superkondenzátory a chemické zdroje energie. Abychom minimalizovali hmotnost kondenzátorů/baterií, měli bychom používat zařízení s nízkou spotřebou energie, úspornými režimy spánku a odesílat polohu pouze jednou za určitý časový úsek. Musíme také trvale napájet modul GNSS, abychom udrželi v paměti uložené efemeridy a v běhu obvod hodin reálného času, a použít režim standby modulu GNSS k co nejrychlejšímu zjištění polohy při dalším startu. První spuštění modulu GNSS může trvat 30 sekund až 2-5 minut (dáno potřebou přijmout nové efemeridy), při použití režimu horkého startu se doba spuštění může zkrátit na 1-5 sekund a v průměru na 10-15 sekund. Vycházejme z výše uvedených údajů a specifikace a vypočítáme spotřebu energie.

Modul FiPy spotřebuje 63 mA v běžném režimu a v režimu hlubokého spánku (deep sleep) jen 25  $\mu$ A.

Pro naše účely bude nejlépe vyhovovat síť LoRa, a to díky své energetické účinnosti, dobrému pokrytí, frekvenci, která nevyžaduje certifikaci, a také možnosti odesílat data bez povinného handshake jako v jiných sítích. LoRa při odesílání dat spotřebuje cca do 28 mA.

Modul Pytrack spotřebuje 25 mA v běžném režimu s GPS a spotřebuje 8  $\mu$ A v režimu standby.

Od sledovacího zařízení budeme požadovat každých 10 minut posílat polohu, to znamená, že 10 minut modul FiPy bude v deep sleep režimu, a předpokládejme, že asi 45 vteřin modul potřebuje pro zjištění a odesílání polohy.

Ze specifikace můžeme spočítat průměrný proud pro sleep mode (moduly jsou uspany, pouze u GNSS modulu jsou drženy efemeridy v paměti a hodiny reálného času), transmit

mode (FiPy modul je probuzen a inicializován, je zjišťována poloha a odeslána) a průměrný proud při prvním startu nebo při startu s již starými efemeridami (tzv. cold start):

Sleep mode:

$$I_{sm} = 0,000025 + 0,000008 = 0,000033 \text{ A}$$

Transmit mode, předpokládejme, že každá část trvá 15 sekund: inicializace, vyhledání polohy a odeslání dat přes LoRa:

$$I_{tm} = \frac{0,063}{3} + \frac{0,063 + 0,025}{3} + \frac{0,028 + 0,025 + 0,063}{3} = 0,089 \text{ A}$$

Spočítáme proud při startu (nejhorší varianta), kdy 15 sekund jde inicializace, 180 sekund zjištění polohy a 15 sekund odeslání:

$$I_{1st} = \frac{0,063}{14} + \frac{(0,063 + 0,025) * 12}{14} + \frac{0,028 + 0,025 + 0,063}{14} = 0,08821429 \text{ A}$$

Spočítáme průměrný proud při odeslání polohy každých 10 minut:

$$I_{645} = \frac{(0,089 * 45) + (0,000033 * 600)}{645} = \frac{4,005 + 0,0198}{645} = 0,00624 \text{ A}$$

Spočítáme průměrný proud při odeslání polohy každých 30 minut (můžeme použít v noci pro ušetření energie):

$$I_{1845} = \frac{(0,089 * 45) + (0,000033 * 1800)}{1845} = \frac{4,005 + 0,0594}{1845} =$$

$$= 0,00220293 \text{ A}$$

Odvodíme rovnice pro výpočet energie spotřebované a potřebné v noci:

$$P = I * U$$

$$P_{sm} = I_{sm} * U_{in,min}$$

$$P_{tm} = I_{tm} * U_{in,min}$$

$$P_{1st} = I_{1st} * U_{in,min}$$

$$W_{den} = P_{645} * t_{den}$$

$$W_{noc} = P_{1845} * t_{noc}$$

$$W_{let} = W_{den} + W_{noc}$$

Odvoďme rovnice pro výpočet požadovaného výkonu solárního panelu:

$$P_{F\check{c}} = \frac{W_{let}}{t_{den}} * \frac{100}{20} = 5 \frac{W_{let}}{t_{den}}$$

Když sluneční článek bude na  $U_{F\check{c}}$  Volt, proud  $I_{F\check{c}}$  bude:

$$I_{F\check{c}} = \frac{P_{F\check{c}}}{U_{F\check{c}}}$$

Odvoďme vzorce pro výpočet kapacity baterie a kondenzátoru, které postačují k zásobování sondy energií.

Kapacita baterie: 
$$C_{bat} = \frac{W_{noc}}{U_{bat}}$$

$$I * t = C * \Delta U$$

$$C = \frac{I * t}{\Delta U}$$

Kapacita kondenzátoru: 
$$C_{kond} = \frac{I_{1845} * t_{noc}}{(U_{kond,max} - U_{in,min})}$$

Spočítáme výkon ve sleep modu:

$$P_{sm} = 0,000033 * 3,5 = 0,0001155 W$$

Spočítáme výkon v transmit modu:

$$P_{tm} = 0,089 * 3,5 = 0,3115 W$$

Spočítáme spotřebu při startu:

$$P_{1st} = 0,08821429 * 3,5 = 0,30875 W$$

Spočítáme výkon při odeslání dat každých 10 minut:

$$P_{645} = 0,00624 * 3,5 = 0,0218245 W$$

Spočítáme výkon při odeslání dat každých 30 minut (můžeme použít pro noční let):

$$P_{1845} = 0,00220293 * 3,5 = 0,00771024 W$$

## 2.4 Dimenzování kapacity napájecího zdroje

### 2.4.1 Varianta krátkého letu během dne

Je, když celou dobu letu budeme mít minimálně 20% nominálního výkonu z fotovoltaických článků dle jeho specifikace (vzaty v potaz neideální podmínky – odklon článku od kolmého směru ke Slunci, zatěžování mimo bod maximálního výkonu), doba letu nepřesáhne 8 hodin a odesílání polohy každých 10 minut, odsud můžeme spočítat spotřebu za celý let, a jaký výkon potřebujeme od fotovoltaického článku:

$$W_{let} = 0,0218245 * 8 = 0,174596 Wh$$

$$P_{F\check{C}} = 0,0218245 * \frac{100}{20} = 0,1091225 W$$

Když článek bude mít výstupní napětí cca 5 volt:

$$I_{F\check{c}} = \frac{0,1091225}{5} = 0,0218245 \text{ A} \approx 21,82 \text{ mA}$$

Napočítal jsem solární články tak, aby v průměru dodal ve dne tolik energie, kolik zařízení spotřebuje, tedy na konci letu by měly být superkapacitory nebo akumulátory stále stejně nabitě.

Určíme kapacitu baterie nebo kondenzátoru, pro „složitý start“:

$$W_{1st} = 0,30875 * \frac{210}{3600} = 0,01801042 \text{ Wh}$$

$$C_{bat} = \frac{0,01801042}{3,7} = 0,00486768 \text{ Ah}$$

$$C_{kond} = \frac{210 * 0,08821429}{(5 - 3,5)} = 12,3500006 \text{ F}$$

Napočítal jsem minimální kapacitu superkapacitoru a akumulátoru, aby se systém dokázal spolehlivě poprvé nastartovat, protože ta první fáze bude mít okamžitý příkon vyšší než dodají solární články.

#### 2.4.2 Noční varianta v létě

Je, když celou dobu letu ve dne budeme mít minimálně 20% nominálního výkonu z fotovoltaických článků dle jeho specifikace a v noci 0%, dobu ve dne budeme spočítat jako 14 hodin, odesílání polohy každých 10 minut ve dne a každých 30 minut v noci, odsud můžeme spočítat spotřebu za celý let (24 hodin), a jaký výkon potřebujeme od fotovoltaického článku a určíme kapacitu baterie nebo kondenzátoru:

$$W_{den} = 0,0218245 * 14 = 0,305543 \text{ Wh}$$

$$W_{noc} = 0,00771024 * 10 = 0,0771024 \text{ Wh}$$



$$W_{let} = 0,305543 + 0,0771024 = 0,3826454 \text{ Wh}$$

$$P_{F\check{c}} = \frac{0,3826454}{14 * 20} * 100 = 0,13665907 \text{ W}$$

Když článek bude na 5 Volt:

$$I_{F\check{c}} = \frac{0,13665907}{5} = 0,02733181 \text{ A} \approx 27,33 \text{ mA}$$

Napočítal jsem solární článek tak, aby v průměru dodal ve dne tolik energie, kolik zařízení spotřebuje dohromady za den a noc, tedy na začátku každého dalšího denního cyklu by měly být superkapacitory nebo akumulátory stále stejně nabitě.

Určíme kapacitu baterie a kondenzátoru. Lepší teplotní stabilitu pro ukládání energie mají superkondenzátory, oni můžou normálně fungovat i při teplotě minus 40-50 stupňů. Když baterie bude na 3,7 V, kondenzátor na 5 V a modul FiPy funguje při napětí od 3,5 do 5,5 V:

$$C_{bat} = \frac{0,0771024}{3,7} = 0,02083849 \text{ Ah}$$

$$C_{kond} = \frac{3600 * 10 * 0,00220293}{(5 - 3,5)} = 52,8703 \text{ F}$$

Napočítal jsem minimální kapacitu superkondenzátoru a akumulátoru, aby se systém dokázal napájet po celou noc v režimu s periodou odeslaní polohy 30 minut.

### 2.4.3 Noční varianta v zimě

Je, když celou dobu letu ve dne budeme mít minimálně 20% nominálního výkonu z fotovoltaických článků dle jeho specifikace a v noci 0%, dobu ve dne budeme počítat jako 8 hodin, odesílání polohy každých 10 minut ve dne a každých 30 minut v noci, odsud můžeme spočítat spotřebu za celý let (24 hodin), a jaký

výkon potřebujeme od fotovoltaického článku a určíme kapacitu baterie nebo kondenzátoru:

$$W_{den} = 0,0218245 * 8 = 0,174596 \text{ Wh}$$

$$W_{noc} = 0,00771024 * 16 = 0,12336384 \text{ Wh}$$

$$W_{let} = 0,174596 + 0,12336384 = 0,29795984 \text{ Wh}$$

$$P_{F\check{c}} = \frac{0,29795984}{8 * 20} * 100 = 0,1862249 \text{ W}$$

Když článek bude na 5 Volt:

$$I_{F\check{c}} = \frac{0,1862249}{5} = 0,03724498 \text{ A} \approx 37,24 \text{ mA}$$

Napočítal jsem solární článek tak, aby v průměru dodal ve dne tolik energie, kolik zařízení spotřebuje dohromady za den a noc, tedy na začátku každého dalšího denního cyklu by měly být superkapacitory nebo akumulátory stále stejně nabitě.

Určíme kapacitu baterie a kondenzátoru. Když baterie bude na 3,7 V, kondenzátor na 5 V a modul FiPy funguje při napětí od 3,5 do 5,5 V:

$$C_{bat} = \frac{0,12336384}{3,7} = 0,03334158 \text{ Ah}$$

$$C_{kond} = \frac{3600 * 16 * 0,00220293}{(5 - 3,5)} = 84,592512 \text{ F}$$

Napočítal jsem minimální kapacitu superkondenzátoru a akumulátoru, aby se systém dokázal napájet po celou noc v režimu s periodou odeslání polohy 30 minut.

## 2.5 Hmotnost systému

Tab. 6

	Součásti sledovacího zařízení:	Hmotnost [g]
1	FiPy	9
2	Pytrack	11
3	Solární panel AM-5907CAR PANASONIC pro 5,9 V (provozní napětí 5 V) a až do 45,7 mA	18,3
4	2 superkondenzátoru SCMT32C755SRBA0 7.5 F, 5 V	2x10
5	Draty, anténa, SD karta a Schottkyho dioda	3
6	2 superkondenzátoru SCCW45B107SSB 100 F, 2,7 V	2x22
7	2 superkondenzátoru SCCX50B207SSB 200 F, 2,7 V	2x40
8	LP103053 Cellevia Batteries, 3,7 V, 90 mA	6
	Hmotnost systému pro krátký let během dne, (1,2,3,4,5)	61,3
	Hmotnost systému, noční varianta v lete, (1,2,3,5,6)	85,3
	Hmotnost systému, noční varianta v zimě, (1,2,3,5,7)	121,3
	Hmotnost systému, při používání chemického zdroje, (1,2,3,5,8)	47,3

Schottkyho dioda je nezbytná, aby se zabránilo vybíjení kapacity přes solární články.

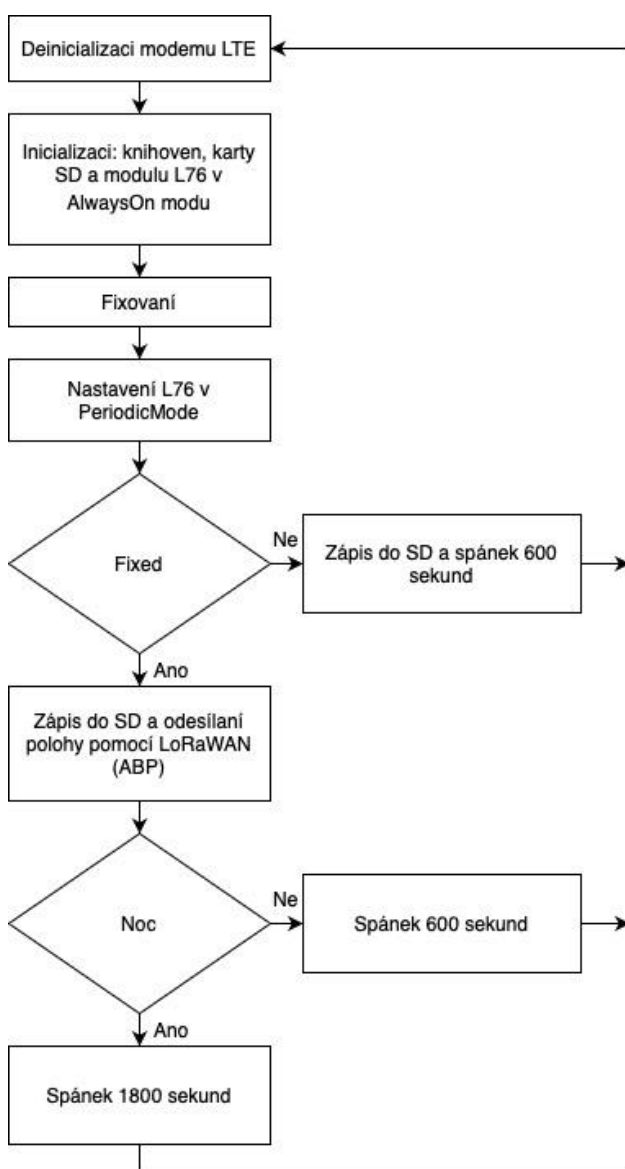
A pokud si vybereme speciální chemický zdroj energie, který pracuje při teplotách minus 40-50, nebo uložíme obvyklou baterii při pracovních teplotách až do minus 20 (například, při krátkém letu zabalit ji do polystyrenu), můžeme výrazně snížit hmotnost zásobníky energie, protože pro práci po celou noc stačí 21 mAh (3,7 V) v létě a 34 mAh (3,7 V) v zimě. Například by stačila LP103053 Cellevia Batteries, 3,7 V, 90 mA, která má hmotnost jenom 6 gramů.

## 3 Praktická část

### 3.1 Programování modulu

Pro programování modulu a rozšiřující desky byly použity knihovny od výrobce Pycoproc\_1.py [9] a navíc knihovna L76GLNSV4.py [10] pro modul GPS, která je k dispozici na GitHub.com.

Aby se minimalizovala spotřeba energie, je celý kód umístěn v souboru Boot.py, který se spustí jako první při zapnutí modulu. Ve výchozím nastavení však modul FiPy má napájený modem LTE, který je třeba při spuštění co nejdříve deinitializovat, aby se ušetřila energie.



Obr. 14 Blokový diagram kódu.

Základní smyčka programu provádí při prvním spuštění i při každém probuzení z hlubokého spánku (deep sleep režim modulu FiPy) tyto kroky:

- deaktivace modemu LTE
- inicializace karty SD a záznam logu
- inicializace modulu GPS
- vyhledávání polohy
- přepnutí GPS do periodického režimu
- odeslání polohy pomocí LoRa
- indikace stavu pomocí LED (diagnostika – deaktivováno při letu)
- přepnutí modulu FiPy a rozšiřující desky PyTrack do režimu spánku

Celý kód je zapsán v souboru Boot.py tak, aby byl spuštěn co nejdříve a ušetřil co nejvíce času a energie. Kód programu je uveden v příloze A – Boot.py. A v příloze B je komunikace pomocí LoRaWAN.

Do programového kódu lze také snadno přidat podmínku přepnutí do nočního režimu v závislosti na denní době přijaté z modulu GPS.

### 3.2 Připojení k síti LoRa TTN

TTN (The Things Network) je globální, otevřená, bezplatná a decentralizovaná síť internetu věcí. Síť umožňuje připojení věcí k internetu s využitím malého množství energie a dat. Otevírá tak případy použití, které dosud nebyly možné. Využívá technologii LoRaWAN. LoRa je bezdrátová technologie s nízkou spotřebou energie, malou šířkou pásma a velkým dosahem, která využívá otevřenou datovou frekvenci.

Teď pro testování posíláme informace o zeměpisné délce, šířce a kolik trvalo určení polohy. V budoucnu bude možné kód upravit tak, aby odesílal pouze méně precizní formát čísel s informacemi o zeměpisné délce, šířce, výšce a času, čímž se zkrátí doba odesílání a ušetří energie. V současné době odeslání trvá v průměru 3 sekundy a zpráva obsahuje v průměru 432 bitů.

Především je třeba zjistit ID zařízení, což lze provést odesláním příkazu do modulu:

```
from network import LoRa
import binascii
print(binascii.hexlify(LoRa().mac()).upper()).
```

Poté přejděte na stránku [www.staging.thethingsnetwork.org](http://www.staging.thethingsnetwork.org) a zaregistrujte vlastní aplikaci.

The screenshot shows the 'ADD APPLICATION' page in the TTN Console. At the top, there is a warning banner: 'Warning: The Things Network is moving to The Things Stack (V3) and will shut down V2 clusters in December 2021. Move your gateways and devices to a v3 cluster now! Click here to read more.' Below the warning, the breadcrumb 'Applications > Add Application' is visible. The main form contains the following sections:

- Application ID:** A text input field with the description 'The unique identifier of your application on the network'.
- Description:** A text input field with the description 'A human readable description of your new app' and an example 'Eg. My sensor network application'.
- Application EUI:** A text input field with the description 'An application EUI will be issued for The Things Network block for convenience, you can add your own in the application settings page.' and a placeholder 'EUI issued by The Things Network'.
- Handler registration:** A dropdown menu with the description 'Select the handler you want to register this application to' and the selected option 'ttn-handler-eu'.

At the bottom right of the form, there are two buttons: 'Cancel' and 'Add application'.

Obr. 15 Webová stránka TTN [14], registrace vlastní aplikaci.

Potom se mu zobrazí karta Zařízení, kam může přidat náš modem (může jich být několik). Stisknete tlačítko "register device". Zobrazí se okno, do kterého je třeba zadat ID zařízení.

The screenshot shows the 'REGISTER DEVICE' page in the TTN Console. At the top, there is a warning banner: 'Warning: The Things Network is moving to The Things Stack (V3) and will shut down V2 clusters in December 2021. Move your gateways and devices to a v3 cluster now! Click here to read more.' Below the warning, the breadcrumb 'Applications > diplomalexber > Devices' is visible. The main form contains the following sections:

- Device ID:** A text input field with the description 'This is the unique identifier for the device in this app. The device ID will be immutable.'
- Device EUI:** A text input field with the description 'The device EUI is the unique identifier for this device on the network. You can change the EUI later.' and a placeholder '0 bytes'.
- App Key:** A text input field with the description 'The App Key will be used to secure the communication between you device and the network.' and a placeholder 'this field will be generated'.
- App EUI:** A text input field with the value '70 B3 D5 7E D0 04 17 E3' and a dropdown arrow.

At the bottom right of the form, there are two buttons: 'Cancel' and 'Register'.

Obr. 16 Webová stránka TTN [14], registrace zařízení.

Po otevření parametrů zařízení zvolíme režim ABP a obdržíme všechny potřebné klíče pro ověření.

The screenshot shows the 'Settings' page for a device named 'zcuflpyzond'. The breadcrumb trail is 'Applications > diplomalexber > Devices > zcuflpyzond > Settings'. The page has three tabs: 'Overview', 'Data', and 'Settings'. On the left, under 'DEVICE SETTINGS', 'General' is selected. The main content area is titled 'SETTINGS' and contains the following fields:

- Description:** A text input field with a green checkmark icon on the right.
- Device EUI:** A text input field containing '70 B3 D5 49 93 D1 E6 9B' with a green checkmark and '8 bytes' label.
- Application EUI:** A dropdown menu showing '70 B3 D5 7E D0 04 17 E3'.
- Activation Method:** Two radio buttons, 'OTAA' (selected) and 'ABP'.
- Device Address:** A text input field containing '26 01 1B 82' with a green checkmark and '4 bytes' label.
- Network Session Key:** A text input field containing '49 7F 01 9D A1 5A 0C A9 83 A7 57 63 27 4F FF 07' with a green checkmark and '16 bytes' label.
- App Session Key:** A text input field containing '31 7A 16 BB 72 56 91 6D C6 72 EA 84 5D CB 9C 01' with a green checkmark and '16 bytes' label.
- Frame Counter Width:** Two radio buttons, '16 bit' and '32 bit' (selected).
- Frame Counter Checks:** A checked checkbox.

At the bottom of the settings area, there are three buttons: 'Delete Device' (in red), 'Cancel', and 'Save'.

**Obr. 17** Webová stránka TTN [14], nastavení zařízení, klíče.

Modem odesílá data "tak, jak jsou", bez záruky, že ověření proběhlo úspěšně bez handshake. Pro odeslání dat je nutné do kódu vložit klíče `nwk_swkey`, `app_swkey`, `dev_addr`.

Pro zjednodušení kódu jsem použil knihovnu dodavatele FiPy – „network“. Kód pro komunikace pomocí LoRa je uveden ve příloze B - `lora_abp_com.py`.

Přijaté datové pakety se zobrazují na kartě Data. Pro každé přijaté datum, čas a frekvenci příjmu, a také přibližný čas ve vzduchu. Data jsou odesílána ve formátu HEX a musí být dekodována, aby byla čitelná.

Applications > diplomalexber > Data

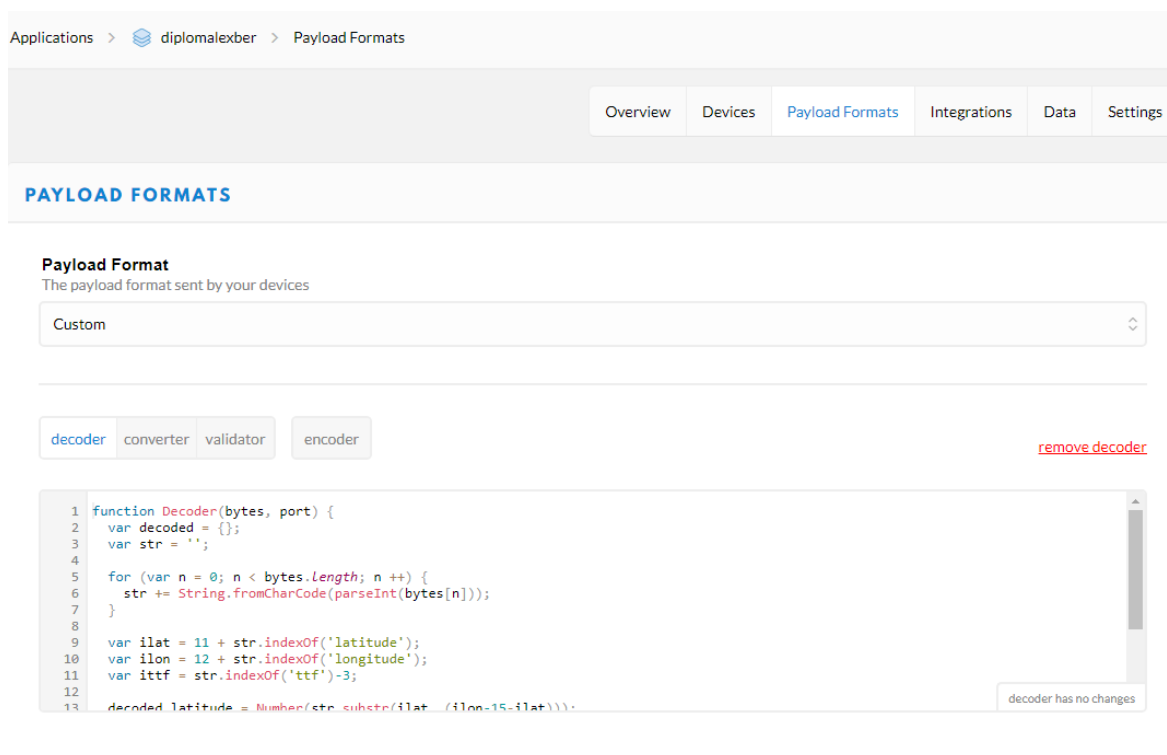
Filters: [uplink](#) [downlink](#) [activation](#) [ack](#) [error](#)

	time	counter	port			
▲	21:50:55	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 32 39 2C 20 27 6C
▲	21:40:08	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 37 37 2C 20 27 6C
▲	21:29:13	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 38 39 38 2C 20 27 6C
▲	21:18:20	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 35 32 2C 20 27 6C
▲	21:07:53	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 33 35 2C 20 27 6C
▲	20:57:18	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 37 33 2C 20 27 6C
▲	20:46:42	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 36 36 2C 20 27 6C
▲	20:36:11	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 32 38 2C 20 27 6C
▲	20:25:44	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 34 32 2C 20 27 6C
▲	20:15:19	0	2	retry	dev id: <a href="#">zcufigpyzond</a>	payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 27 27 2C 20 27 6C 6F 6E 67 69 74 75

Obr. 18 Webová stránka TTN [14], přijatá a odeslaná data.



Dekódování můžeme nakonfigurovat pomocí JavaScriptu na kartě "Payload Formats". Zde můžete také nakonfigurovat převodník pro odesílání zpráv.



**Obř. 19** Webová stránka TTN [14], nastavení dekodéřu a konvertoru.

```
function Decoder(bytes, port) {
  var decoded = {};
  var str = "";

  for (var n = 0; n < bytes.length; n++) {
    str += String.fromCharCode(parseInt(bytes[n]));
  }

  var ilat = 11 + str.indexOf('latitude');
  var ilon = 12 + str.indexOf('longitude');
  var ittf = str.indexOf('ttf')-3;

  decoded.latitude = Number(str.substr(ilat, (ilon-15-ilat)));
  decoded.longitude = Number(str.substr(ilon, (ittf-ilon)));

  decoded.result = str;
  return decoded;
}
```

Po provedení všech těchto nastavení se přijaté zprávy automaticky dekodují. A přijatá data se použijí v různých integracích.

Applications > diplomalexber > Data

### APPLICATION DATA

Filters: [uplink](#) [downlink](#) [activation](#) [ack](#) [error](#)

time	counter	port	
21:25:58	0	2	retry dev id: <a href="#">zcuflpyzond</a> payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 34 36 2C 20 27 6
21:15:38	0	2	retry dev id: <a href="#">zcuflpyzond</a> payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 35 32 2C 20 27 6
21:05:18	0	2	retry dev id: <a href="#">zcuflpyzond</a> payload: 7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 35 31 2C 20 27 6

**Uplink**

**Payload**

```
7B 27 6C 61 74 69 74 75 64 65 27 3A 20 34 39 2E 37 35 39 34 36 2C 20 27 6C 6F 6E 67 69 74 75 64 65 27 3A 20 31 33 2E 33 37 32 33 33 2C 20 27 74 74
```

**Fields**

```
{
  "latitude": 49.75946,
  "longitude": 13.37233,
  "result": "{\"latitude\": 49.75946, 'longitude': 13.37233, 'ttf': 1}"
}
```

**Metadata**

```
{
  "time": "2021-05-30T19:25:58.429225942Z",
  "frequency": 868.3,
  "modulation": "LORA",
  "data_rate": "SF7BW125",
  "coding_rate": "4/5",
  "gateways": [
    {
      "gtw_id": "eui-3133303733003c00",
      "timestamp": 2745206449,
      "time": "",
      "channel": 1,
      "rssi": -109,
      "snr": 0.5
    }
  ],
  "latitude": 49.759487,
  "longitude": 13.372583,
  "altitude": 320,
  "location_source": "registry"
}
```

**Estimated Airtime**

107.776 ms

Obr. 20 Webová stránka TTN [14], přijatá a odeslaná data.

Například na mapách to vypadá jako na obr. 21.

Applications > diplomalexber > Devices > zcuřipyzond

Network Session Key <> [refresh] [eye] ..... [ID]

App Session Key <> [refresh] [eye] ..... [ID]

Status ● 7 minutes ago

Frames up 0 [reset frame counters](#)

Frames down 0

**LOCATION**

Altitude 320m

lat 49.75954000  
lng 13.37259800

Map showing Pilsen, Czech Republic, with labels for PILSEN 1, PILSEN 2, PILSEN 3, and PILSEN 4. Other locations include Chotikov, Bolevec, Malesice, Mesto Touškov, Bdenéves, Kozolupy, Vochov, Myslinka, Vejprnice, Skvrnany, Letkov, Kysice, Ejovice, and Klabava.

**Obr. 21** Webová stránka TTN [14], status a poloha zařízení.

### 3.3 Naměřená spotřeba

**Příloha C** obsahuje soubor protokolu, z něhož lze získat údaje o době inicializace, vyhledávání polohy, přepnutí modulu GPS do periodického režimu a odeslání polohy prostřednictvím LoRa. Údaje získané z tohoto souboru jsou uvedeny v Tab. 7.

**Tab. 7** Čas jednotlivých částí programu.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	průměr bez staru	průměr pro každou část	část
12163	11970	11990	11960	12100	11969	11899	11849	11888	11949	11974	11953	11953	inicializace
125976	20263	17309	21083	24790	28071	20407	46532	20223	39538	36419	26468	14515	čas zjištění polohy
134616	21268	21239	26569	32672	31045	21430	49559	21320	42478	40220	29731	3262	nastavení periodik mode
137681	24332	24303	29633	36017	34110	24494	52629	24364	45546	43311	32825	3094	odesílání pomocí LoRa

V příloze D – Měření (foto) jsou uvedeny fotografie měření proudu multimetrem METEX M-4640A při napájení ze zdroje 5 V. Z měření jsem zjistil, že modul spotřebovává při:

- Inicializace - 62 mA
- Zjištění polohy - 77 mA
- Odesílání dat - 117 mA
- Režimu spánku - 17,5 uA

Po určení časové a proudové spotřeby každé části můžeme vypočítat skutečnou spotřebu energie při odesílání dat každých 10 a 30 minut a potřebná zařízení pro ukládání energie.

**Tab. 8** Vypočet průměrného proudu a spotřeby s měření.

Část programu	Proud během části, [A]	10 min, [A]	30 min, [A]
Inicializace	0,062	0,001171042	0,000404329
Zjištění polohy	0,077	0,00176623	0,000609832
Nastavení Periodic mode	0,062	0,000319654	0,000110368
Odesílání pomocí LoRa	0,117	0,000572076	0,000197522
Spánek	0,0000175	0,0000165923	1,71866E-05
	Průměr proudu, [A]	0,003845594	0,001339238
	Průměr spotřeby, [W]	0,019227972	0,006696191

### 3.3.1 Varianta krátkého letu během dne

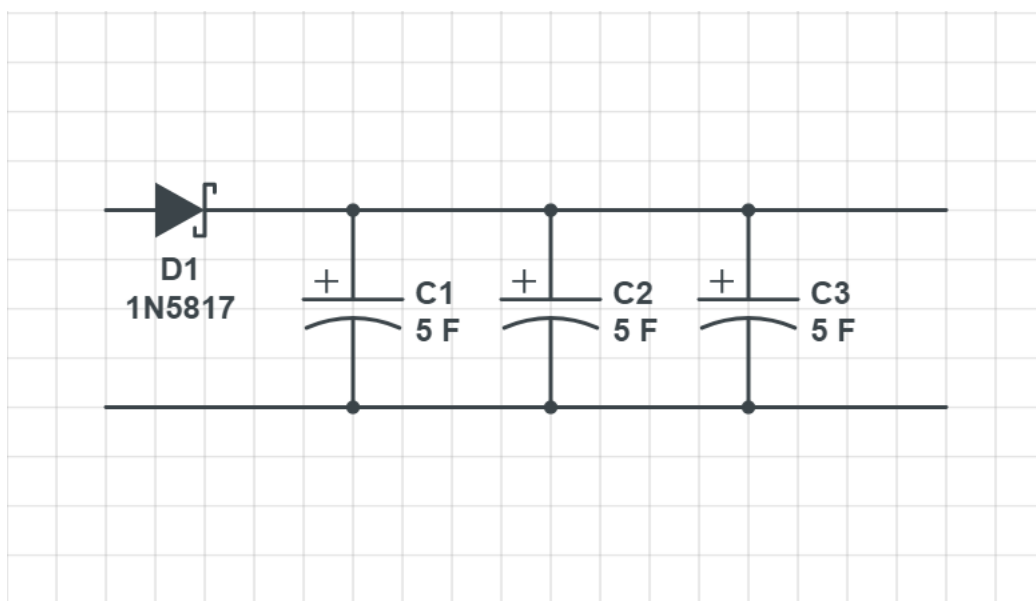
Vypočet spotřebované energie:

$$W_{den} = W_{let} = 0,019227972 * 8 = 0,15382376 Wh$$

Vypočet kapacity baterie:

$$C_{bat} = \frac{0,15382376}{3,7} = 0,04157399 Ah$$

Může stačit jeden chemický článek, nebo při používání solárního panelu se superkondenzátory potřebujeme mít jenom energie pro první start.



**Obr. 22** Schéma ukládání elektrické energie pomocí superkondenzátoru (15 F, 5 V).

### 3.3.2 Noční varianta v letě

Vypočet spotřebované energie:

$$W_{den} = 0,019227972 * 14 = 0,26919158 \text{ Wh}$$

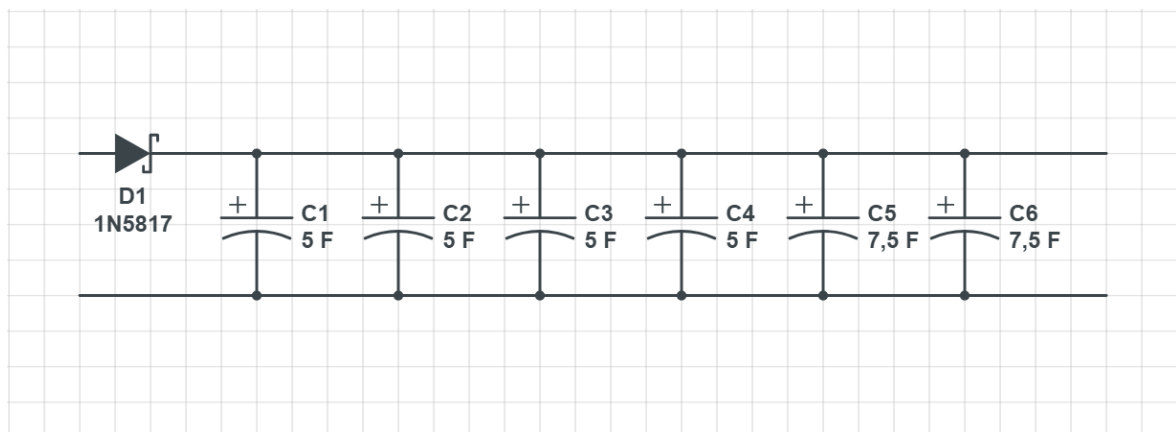
$$W_{noc} = 0,006696191 * 10 = 0,06696191 \text{ Wh}$$

$$W_{let} = 0,26919158 + 0,06696191 = 0,33615349 \text{ Wh}$$

Vypočet kapacity baterie a kondenzátoru:

$$C_{bat} = \frac{0,06696191}{3,7} = 0,01809781 \text{ Ah}$$

$$C_{kond} = \frac{3600 * 10 * 0,001339238}{(5 - 3,5)} = 32,14171 \text{ F}$$



**Obr. 23** Schéma ukládání elektrické energie pomocí superkondenzátoru (35 F, 5 V).

### 3.3.3 Noční varianta v zimě

Vypočet spotřebované energie:

$$W_{den} = 0,019227972 * 8 = 0,15382376 Wh$$

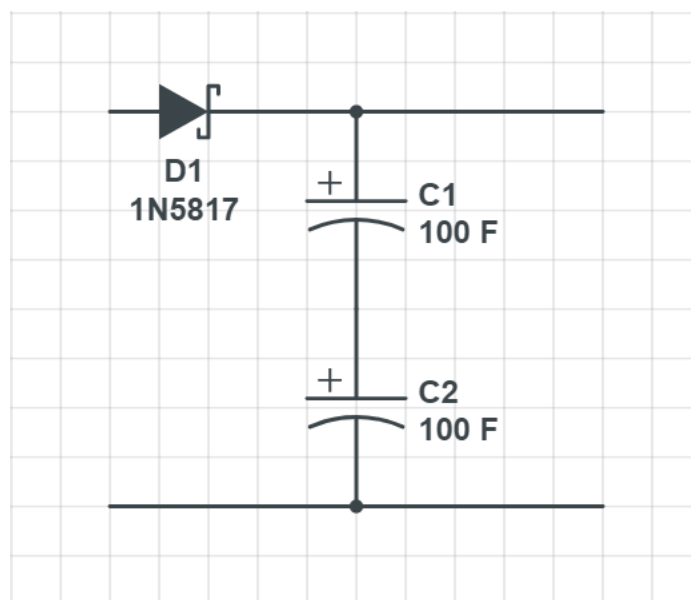
$$W_{noc} = 0,006696191 * 16 = 0,107139056 Wh$$

$$W_{let} = 0,15382376 + 0,107139056 = 0,260962816 Wh$$

Vypočet kapacity baterie a kondenzátoru:

$$C_{bat} = \frac{0,107139056}{3,7} = 0,0289565 Ah$$

$$C_{kond} = \frac{3600 * 16 * 0,001339238}{(5,4 - 3,5)} = 40,60006 F$$

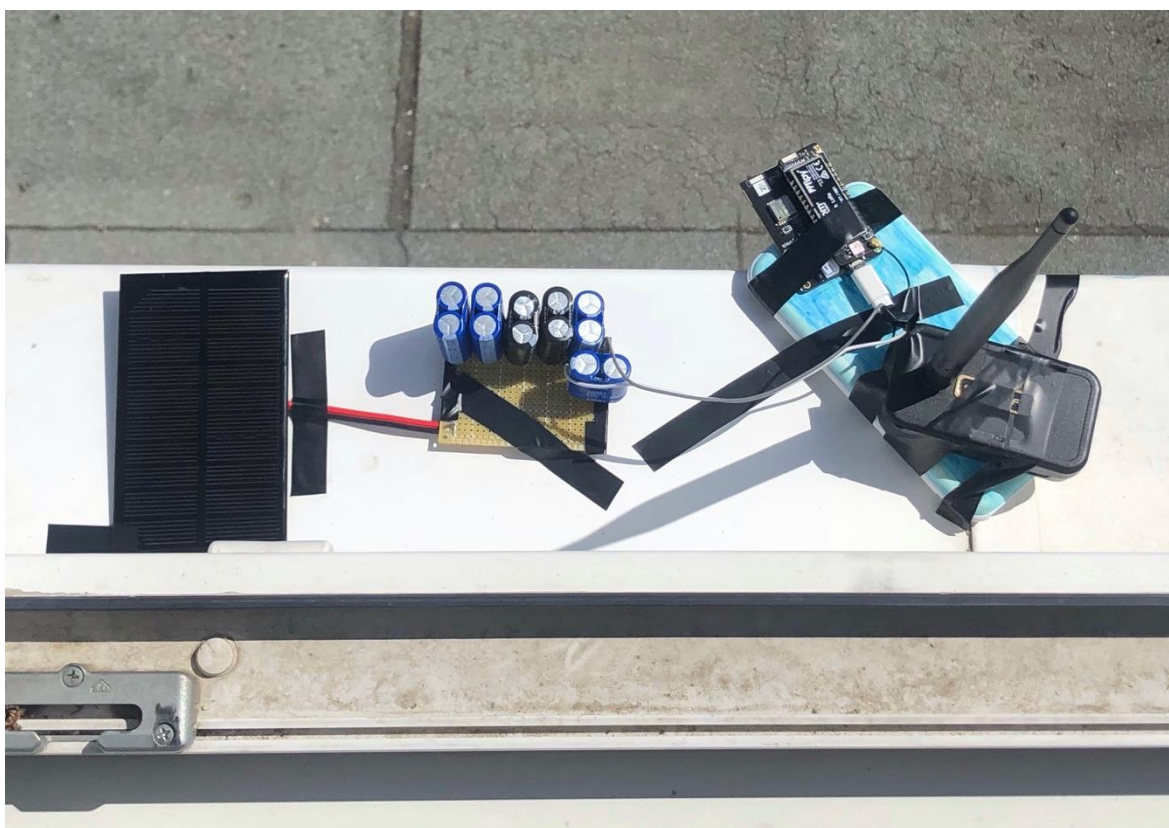


**Obr. 24** Schéma ukládání elektrické energie pomocí superkondenzátoru (50F, 5.4V).



## 4 Závěr

V současné době je projekt realizován z důvodu uzavření univerzitních laboratoří a distanční výuce kvůli pandemické situaci jako domácí prototyp pro testování obslužného sw a upřesnění spotřeby v různých režimech činnosti. Je sestaven ze solárního panelu s Schottkyho diodou, superkondenzátorů o kapacitě 35 faradů a modulu FiPy s anténou ze stavebnice a rozšiřující desky PyTrack. Celková hmotnost je 169 gramů. Zařízení může být vestavěno přímo do sondy PilsenCUBE-Strato nebo mu může být v budoucnu vytvořeno vlastní mechanické řešení vhodné pro balónové lety (např. zateplený box při využití chemických zdrojů energie), s lehčí anténou a lehkými tenkovrstvými solárními články. Jak vypadá prototyp, můžete vidět na obr. 25.



**Obr. 25** Prototyp pro testování obslužného sw a testování napájecího zdroje.

Na sestaveném prototypu jsem stihl zrealizovat zjišťování polohy, její odesílání přes LoRa systém do sítě TTN a hlavně zabývat se způsoby, jak snížit spotřebu energie všech částí systému a dostat se z průměrné spotřeby 0,3 W (při plném běhu všech součástí bez využití úsporných režimů) na 0,019 W (0,007 W) v požadovaných módech provozu. Během práce jsem se naučil pracovat s modulem FiPy a jednou ze sítí internetu věcí, studoval jsem

MicroPython a aplikoval možnosti napájení v tzv. ostrovním režimu pro potřeby malé sondy pomocí superkondenzátorů a chemického zdrojů jako zařízení pro ukládání energie.

Praktické měření spotřeby energie ukázalo, že je ještě nižší než teoretické výpočty, a to díky rychlejšímu určování polohy a odesílání dat, než jsem na začátku v předběžných kalkulacích předpokládal. Díky tomu je možné dodatečně ušetřit na hmotnosti zásobníků elektrické energie (superkapacitorů, případně chemických zdrojů). A z chemické baterie s kapacitou 90 mAh (3,7 V) může systém fungovat až 17 hodin v režimu odesílání polohy každých 10 minut nebo do 50 hodin v režimu odesílání polohy každých 30 minut.

Při závěrečném testování jsem zaznamenal pouze 5% míru selhání přenosu dat přes LoRa systém, což je podle mého názoru velmi dobrý výsledek pro ověřování typu ABP bez handshake a plně dostačující pro potřeby jednoduché balónové sondy.

Z časových důvodů a pandemických omezení v souvislosti s Covid-19 jsem nestihl dokončit provedení lepší integrace s mapami, navrhnout co nejlehčí způsob propojení článků mezi sebou, nebo vypočítat jednoduchou drátovou anténu pro systém LoRa, dále jsem chtěl ještě zpracovat možnost použití chemického napájecího článku určeného pro nízké teploty (minus 40-50 stupňů), poskytující nižší hmotnost oproti superkapacitorům.

Bod 2 zadání (návrh pomocných obvodů zvyšujících spolehlivost sondy při nestabilitě senzorů) nebyl po domluvě s vedoucím práce realizován, protože by jej vzhledem k pandemické situaci a nemožnosti využití laboratoří k oživování nebylo možné distančně prakticky zrealizovat. Práce byla proto cílena pouze do oblasti návrhu sledovacího zařízení.

Další práce na tomto zařízení mohou vést k implementaci využití vnitřní paměti GNSS přijímače jako automatického loggeru, aby nebylo nutné pro každé určení polohy probouzet procesor Fipy modulu s proudovými špičkami před deaktivací LTE součásti. Dále by bylo možné měnit četnost odesílání dat a měření polohy, pokud sonda nezvykle rychle začne klesat (kvůli snadnějšímu dohledání) nebo naopak méně často pokud výška sondy je stabilní, umožnit v nastavení GNSS modulu lokalizaci i jen na základě almanachu (méně přesné) s tím, že efemeridy (jejich platnost bývá 3-4 hodiny) se nechají obnovit méně často (méně často poběží 30s start přijímače do určení polohy), všechny tyto věci by ještě dále mohly snížit spotřebu s odlehčením napájecího systému.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/LTE-M>
- [3] O. Apilo, M. Hiivala a A. Kuosmonen, “Measured GPS performance under LTE-M in-device interference“ - 2018 9th ESA Workshop, Dec. 2018.
- [4] DUDÁČEK, L. PilsenCUBE-Strato – stratosferic test of the sensors for PilsenCUBE-II satellite. In Elektro- technika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 13-16. ISBN: 978-80-261-0785-9
- [5] <https://www.gsma.com/iot/deployment-map/>
- [6] <https://lora-alliance.org>
- [7] <https://www.sigfox.com/en/coverage>
- [8] [https://www.groundcontrol.com/Iridium\\_Coverage\\_Map.htm](https://www.groundcontrol.com/Iridium_Coverage_Map.htm)
- [9] <https://github.com/pycom/pycom-libraries/releases/>
- [10] <https://github.com/andrethamac/L76GLNSV4>
- [11] <http://wspnnet.org/drupal/wspnnet/map>
- [12] <http://tt7hab.blogspot.com/2017/02/aprs-automatic-packet-reporting-system.html>
- [13] <https://www.cls-telemetry.com/iridium-solutions/iridium-products/modems/9603n/>
- [14] <https://v2console.thethingsnetwork.org>

## Přílohy

### Příloha A – Boot.py

```
# deinicializace LTE modemu
import pycom
from network import LTE
lte = LTE()
pycom.lte_modem_en_on_boot(False)
lte.deinit()

# inicializace knihoven
import machine, os, utime
from machine import SD
from pycoproc_1 import Pycoproc
from lora_abp_com import LoraABP_Sent
from L76GNSV4 import L76GNSS

# inicializace SD karticky a logovani
pycom.rgbled(0x0f000f)
sd = SD()
os.mount(sd, '/sd')
f = open('/sd/gps-record.txt', 'a')
f.write("Start up ticks ms { }\n".format(utime.ticks_ms()))
f.close()

# inicializace PyTrack a L76
py = Pycoproc(Pycoproc.PYTRACK)
L76 = L76GNSS(pytrack=py)
L76.setAlwaysOn()

# pokus zjisteni polohy a logovani
L76.get_fix(debug=False)

# nastaveni PeriodicMode pro L76
L76.setPeriodicMode(2,20000,40000,60000,60000)

pycom.heartbeat(0)
if L76.fixed():
    pycom.rgbled(0x000f00)
    f = open('/sd/gps-record.txt', 'a')
    f.write("FIXED!!! t = { }\n".format(utime.ticks_ms()))
    f.close()
else:
    pycom.rgbled(0x0f0000)
    f = open('/sd/gps-record.txt', 'a')
    f.write("UNFIXED! t = { }\n".format(utime.ticks_ms()))
    f.close()
    machine.idle()
    py.setup_sleep(600)
```

```
py.go_to_sleep(gps=True)

# cteni polohy a casu z L76
pycom.rgbled(0x0000f0)
coord = L76.coordinates(debug=False)
timme = L76.getUTCDateTime(debug=False)

# logovani
f = open('/sd/gps-record.txt', 'a')
f.write("Start sending t = {}\n".format(utime.ticks_ms()))
f.close()

# odeslani polohy pomoci LoRa
LoraABP_Sent(str(coord))

# logovani polohy a casu
f = open('/sd/gps-record.txt', 'a')
f.write("End sending and go to sleep {} - {} - {}\n".format(coord, timme,
utime.ticks_ms()))
f.close()

# nastaveni a prechod v rezim spanku o 10 minut
machine.idle()
py.setup_sleep(600)
py.go_to_sleep(gps=True)
```

**Příloha B - lora\_abp\_com.py**

```
from network import LoRa
import socket
import ubinascii
import struct

def LoraABP_Sent(x):
    # Initialise LoRa in LORAWAN mode.
    lora = LoRa(mode=LoRa.LORAWAN, region=LoRa.EU868)

    # ABP authentication params
    dev_addr = struct.unpack(">I", ubinascii.unhexlify('26011B82'))[0]
    nwk_swkey = ubinascii.unhexlify('497F019DA15A0CA983A75763274FFF07')
    app_swkey = ubinascii.unhexlify('317A16BB7256916DC672EA845DCB9C01')

    # join a network using ABP (Activation By Personalization)
    lora.join(activation=LoRa.ABP, auth=(dev_addr, nwk_swkey, app_swkey))

    # create a LoRa socket
    s = socket.socket(socket.AF_LORA, socket.SOCK_RAW)

    # set the LoRaWAN data rate
    s.setsockopt(socket.SOL_LORA, socket.SO_DR, 5)

    # make the socket blocking
    # (waits for the data to be sent and for the 2 receive windows to expire)
    s.setblocking(True)

    # send data
    s.send(x)

    # set the LoRa power on transmit mode only(save energy)
    lora.power_mode(LoRa.TX_ONLY)

    s.setblocking(False)
```

**Příloha C - gps-record\_250521.txt**

Start up ticks ms 12163  
FIXED!!! t = 125976  
Start sending t = 134616  
End sending and go to sleep {'latitude': '49.75962', 'longitude': '13.37265', 'tff': 0} - 2021-05-25T18:15:19+00:00 - 137681  
Start up ticks ms 11970  
FIXED!!! t = 20263  
Start sending t = 21268  
End sending and go to sleep {'latitude': 49.75942, 'longitude': 13.37281, 'tff': 1} - 2021-05-25T18:25:44+00:00 - 24332  
Start up ticks ms 11990  
FIXED!!! t = 17309  
Start sending t = 21239  
End sending and go to sleep {'latitude': 49.75928, 'longitude': 13.37297, 'tff': 0} - 2021-05-25T18:36:11+00:00 - 24303  
Start up ticks ms 11960  
FIXED!!! t = 21083  
Start sending t = 26569  
End sending and go to sleep {'latitude': 49.75966, 'longitude': 13.37258, 'tff': 0} - 2021-05-25T18:46:42+00:00 - 29633  
Start up ticks ms 12100  
FIXED!!! t = 24790  
Start sending t = 32672  
End sending and go to sleep {'latitude': 49.75973, 'longitude': 13.37252, 'tff': 0} - 2021-05-25T18:57:18+00:00 - 36017  
Start up ticks ms 11969  
FIXED!!! t = 28071  
Start sending t = 31045  
End sending and go to sleep {'latitude': 49.75935, 'longitude': 13.37272, 'tff': 1} - 2021-05-25T19:07:53+00:00 - 34110  
Start up ticks ms 11899  
FIXED!!! t = 20407  
Start sending t = 21430  
End sending and go to sleep {'latitude': 49.75952, 'longitude': 13.37276, 'tff': 1} - 2021-05-25T19:18:20+00:00 - 24494  
Start up ticks ms 11849  
FIXED!!! t = 46532  
Start sending t = 49559  
End sending and go to sleep {'latitude': 49.75898, 'longitude': 13.3726, 'tff': 1} - 2021-05-25T19:29:13+00:00 - 52629  
Start up ticks ms 11888  
FIXED!!! t = 20223  
Start sending t = 21320  
End sending and go to sleep {'latitude': 49.75977, 'longitude': 13.37267, 'tff': 1} - 2021-05-25T19:40:08+00:00 - 24364  
Start up ticks ms 11949  
FIXED!!! t = 39538  
Start sending t = 42478

End sending and go to sleep {'latitude': 49.75929, 'longitude': 13.37238, 'ttf': 1} - 2021-05-25T19:50:55+00:00 - 45546



**Příloha D – Měření (foto)**

