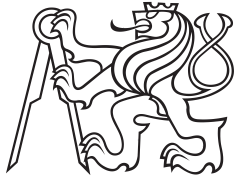


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Meteorologická stanice s podporou LoRa

Martin Volf

Vedoucí: Ing. Robert Bešák, Ph.D.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Volf** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **508500**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Meteorologická stanice s podporou LoRa

Název bakalářské práce anglicky:

LoRa Weather Station

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout meteorologickou stanici pro měření veličin jako jsou teplota, vlhkost, směr a síla větru, množství srážek a případně dalších. Naměřená data z meteostanice budou zasílaná na server prostřednictvím technologie LoRaWAN. Vytvořte na serveru jednoduchou aplikaci pro vizualizaci naměřených hodnot. V práci se také zaměřte na analýzu spotřeby energie a životnost baterie pro různé režimy zasílání naměřených dat na server.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. Marr. Big Data: Using SMART Big Data, Analytics and Metrics To Make Better Decisions and Improve Performance. Wiley. 2015. ISBN 9781118965832.
- [2] C. Kühnel. Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes. Elektor Verlag. 2022. ISBN 3895764949
- [3] S. Pradeeka. Beginning Lora Radio Networks with Arduino: Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks. APress. 2019. ISBN 9781484243565.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Robert Bešťák, Ph.D. katedra telekomunikační techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Robert Bešťák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce za věcné rady při vypracování bakalářské práce a také vyučujícím předmětu TPS za úvod do světa korektní sazby dokumentů.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 20. května 2024

Abstrakt

Tato práce se zabývá tvorbou prototypu meteostanice využívající výhody IoT a popisem rozhodnutí, které tento proces provází. V práci je podrobně vysvětlena specifikace LoRaWAN, jež je využita pro komunikaci meteostanice se sběrným zařízením. Především se čtenář seznámí s problematikou spotřeby zvoleného zařízení a faktory, které ji ovlivňují.

Klíčová slova: LoRa, IoT, meteostanice, mikrokontrolér, Nízká spotřeba

Vedoucí: Ing. Robert Bešťák, Ph.D.

Abstract

This project is focused on the process of building a prototype of an IoT-based weather station and the decision-making behind it. LoRaWAN specification is deeply explained in this project since it is used for communication with weather stations. The project is focused on decisions regarding power consumption and the factors affecting it.

Keywords: LoRa, IoT, weather station, microcontroller, Low-power

Obsah

Úvod	1	2 Implementace	17
1 Teoretická část	3	2.1 Hardware	17
1.1 Bezdrátové technologie pro IoT	3	2.1.1 Senzory	18
1.2 LPWAN	4	2.1.2 Mikrokontrolér	20
1.3 LoRa	8	2.1.3 LoRa komunikační čip	20
1.3.1 Historie	8	2.1.4 Baterie	21
1.3.2 Třídy koncových zařízení	9	2.1.5 LoRa gateway	21
1.3.3 Adaptivní rychlost přenosu dat	11	2.2 Firmware	22
1.4 LoRaWAN koncové zařízení	11	2.3 Aplikace	24
1.4.1 Výběr koncového zařízení	12	3 Otestování, výsledky a diskuze k výsledkům	27
1.5 Sběr meteorologických údajů	14	3.1 Parametry měření	27
1.5.1 Teplota	14	3.2 Spotřeba	28
1.5.2 Vlhkost vzduchu	15	3.2.1 Faktory ovlivňující spotřebu energie a kapacitu baterie	28
1.5.3 Kondenzace vodních par v atmosféře	15	3.2.2 Měření spotřeby pomocí osciloskopu	29
1.5.4 Proudění vzduchu	16	3.3 Cenová kalkulace	31
		3.4 Porovnání hodnot	32

Závěr 37

Literatura 39

Obrázky

1.1 Rozdělení technologií pro komunikaci v IoT dostupné z [2]. . .	4	2.2 Zásuvka s pasivními součástkami.	18
1.2 Historický vývoj sítí LPWAN[5]. . .	5	2.3 Různé typy anemometrů využívající rotace pro měření[23]. . .	19
1.3 Počet připojených zařízení dle LPWAN technologie[7].	6	2.4 Schéma zapojení meteostanice. . .	20
1.4 Topologie protokolu LoRaWAN[9].	8	2.5 náhradní Baterie ER26500 + SPC1520[28].	21
1.5 Architektura protokolu LoRaWAN[10].	9	2.6 Milesight G67 sběrný bod[32]. . .	22
1.6 Vizualizace komunikace v třídách podle specifikace LoRaWAN [15]. . .	10	2.7 Obsah hexadecimální zprávy pro sběrný bod.	23
1.7 Závislost spotřeby a potřebné citlivosti na použité rychlosti[16]. . .	11	2.8 Blokové schéma algoritmu proměnného intervalu posílání dat.	24
1.8 Jednoúčelový uzel připraven k použití[17].	12	2.9 Seznam zpráv s ověřením implementace proměnného intervalu.	24
1.9 Víceúčelový uzel od firmy DecentLab[18].	13	2.10 Grafické rozhraní aplikace.	25
1.10 Teplotní charakteristiky dostupné z [22].	15	2.11 Přiblížený graf teploty s hodnotami.	26
1.11 Vznik a vypadávání srážek[22].	16	3.1 Fotografie kompletního zapojení v provozu.	27
1.12 Příklady použití proudnic[20]. . .	16	3.2 Závislost životnosti baterie na vybíjecím proudu[30].	28
2.1 Koncové zařízení ve vodotěsném krytu.	17	3.3 Průběh napětí při vyslání zprávy.	29
		3.4 Kalkulačka v prostředí Excel pro odhad životnosti baterie[30].	30

3.5 Grafy teplotních charakteristik. .	32
3.6 Grafy relativní vlhkosti.	33
3.7 Grafy síly větru.	34
3.8 Grafy srážek.	35

Tabulky

1.1 Souhrn srovnávací vlastnosti sítí LPWAN[2].	7
1.2 Souhrn srovnávací parametry koncových zařízení.	13
3.1 Porovnání změřené a odhadnuté životnosti baterie	30
3.2 Porovnání počtu zpráv dle intervalů.	31
3.3 Souhrn cenové kalkulace (ceny bez DPH).	31



Úvod

Cílem této práce je navrhnout meteorologickou stanici využívající síť LoRa k přenosu dat. Práce je především zaměřena na optimalizaci energetické efektivity procesů při získávání a následném předávání meteorologických dat. Toho je zde dosaženo proměnnou délkou intervalů k odeslání dat v závislosti na změnách hodnot a použití vhodných součástí pro stavbu zařízení. Výsledný prototyp meteostanice bude sloužit jako základ pro budoucí komerční použití ve sféře menších projektů. Oproti současným řešením by mělo zařízení a jeho připojení být levnější a jednodušší na implementaci.

Meteorologická data z povrchu Země jsou velmi přínosná a dají se využít například pro optimalizaci procesů v zemědělství nebo při plánování rozmístění fotovoltaických panelů, zelených ploch a mnoha jiných prvků ovlivňujících místní klima nebo energetickou efektivitu ve městech a obcích. Některé z těchto aplikací však vyžadují přesná lokální data, která nám současné meteostanice pokrývající velké oblasti nemohou dát.

Hlavním přínosem IoT řešení je zjednodušení zpracování dat a přenesení výpočetního výkonu mimo oblast v blízkosti senzoru. Tím se otevírá možnost spolupráce měření z více senzorů a sběrných bodů. Dají se tedy škálovat dle nároků na pokrytí a přesnost. Další z mnoha výhod je komunikace pomocí bezdrátových technologií jako je WiFi, Bluetooth, LoRa nebo Zigbee, tím pádem odpadá nutnost strukturované kabeláže a samotná implementace a montáž je velmi jednoduchá.

V první části se práce zaměřuje na obecné pochopení jednotlivých stavebních bloků pro tvorbu meteorologické stanice od hardwarového po softwarové řešení. V části druhé se pak zaměřuje na otestování zařízení v provozu a optimalizaci jeho spotřeby.

Kapitola 1

Teoretická část

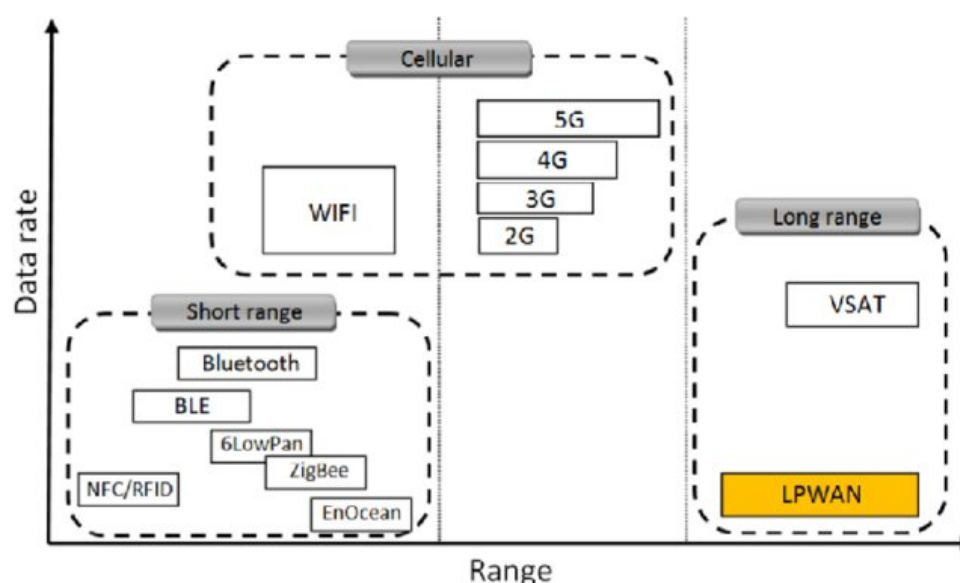
Pojem IoT (*Internet of Things*) je tu s námi již od roku 2000, kdy se ukázal ve formě technologie RFID (*Radio Frequency Identification*) tagů a dalších M2M (*Machine To Machine*) implementací. Od té doby se IoT rozvinulo v rozsáhlé sítě senzorů, zařízení a aktuátorů reagujících na naměřená data. Tyto sítě začaly sloužit v různých odvětvích průmyslu, z nichž se tato práce zaměřuje na oblast meteorologie, kde lze IoT s výhodou využít.

1.1 Bezdrátové technologie pro IoT

Zvolené technologie v projektech internetu věcí definují jejich pole působnosti a zásadní vlastnosti. Je tedy třeba se rozhodnout, která z nich nejlépe vyhoví požadavkům aplikace. V zadání je již zmíněno, že je potřeba použít komunikaci skrze síť LoRa. Nicméně je vhodné zmínit i další sítě pro IoT využívající jiné technologie, aby bylo osvětleno, proč je nejvíce vyhovující. IoT sítě lze rozdělit například podle vzdálenosti, přes kterou v síti lze komunikovat ku rychlosti přenosu dat, jak je vidět na obrázku č. 1.1.

V sítích krátkého dosahu dominuje technologie BLE (*Bluetooth Low Energy*), které má široké využití na poli mobilních zařízení a také jejich odvětví tzv. nositelných zařízení (*wearables*). Oproti předchůdci je jeho dosah až 100 metrů s nižší latencí, zároveň je BLE šetrné k baterce, což z něj dělá vhodného kandidáta pro spoustu IoT aplikací vyžadujících nízkou latenci a spolehlivost[1]. Dále sem patří již zmiňované RFID, kde se na velmi malou vzdálenost zapisují, čtou či přepisují hodnoty tzv. RFID tagů. Především se používá pro identifikaci a monitoring objektů[1]. Tato skupina technologií se však pro potřeby meteorologie příliš nehodí, což plyne především z jejich malého dosahu[2].

Do kategorie středního dosahu lze zahrnout technologie, jako je Zigbee, Thread nebo již hojně používaná technologie v domácnostech WiFi. Tyto sítě se stále pro aplikaci meteorologie nehodí, neboť jsou zkonstruovány tak, aby měly pokrytí přibližně velikosti jedné domácnosti či menší budovy.



Obrázek 1.1: Rozdělení technologií pro komunikaci v IoT dostupné z [2].

Další nevýhodou je také u ZigBee a WiFi větší spotřeba energie v porovnání s ostatními[1].

Následující skupinu, která nám vyplňuje prostor mezi středním a velkým dosahem, představují mobilní sítě 2. až 5. generace, které také lze pro meteostanici do určité míry použít. Jejich hlavní výhodou je již vybudovaná infrastruktura a s ní související lepší pokrytí pro zařízení. Jejich specifikace ale nejsou dělané s přílišným zaměřením na malou spotřebu energie a je nutné, aby zařízení v síti neustále kontrolovalo svůj stav spojení se sítí a odesílalo metriky, aby mohlo případně reagovat na příkazy nebo upravit své nastavení v závislosti na vytíženosti sítě[2].

Na poslední kategorii sítí s velkým dosahem se více zaměřím. Zde se nachází sítě využívající satelitní spojení VSAT, které ještě nejsou ve světě IoT příliš používané a jejich přednost, jež tkví ve větších přenosových rychlostech[3], není pro aplikaci meteostanice příliš důležitá. Dále se v kategorii nacházejí sítě LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Ty se pro aplikaci meteostanice vzhledem k parametrům hodí nejvíce a dále se na jejich hlavní současné zástupce zaměřím.

1.2 LPWAN

Bezdrátové sítě LPWAN jsou velmi důležité a široce využívané při komunikaci mezi zařízeními využívající baterie jako zdroj energie. Dle [4] základní kameny bezdrátových sítí typu LPWAN vznikaly již na počátku 90. let. Jedna z prvních byla síť Alarmnet od společnosti ADEMCO, jež monitorovala

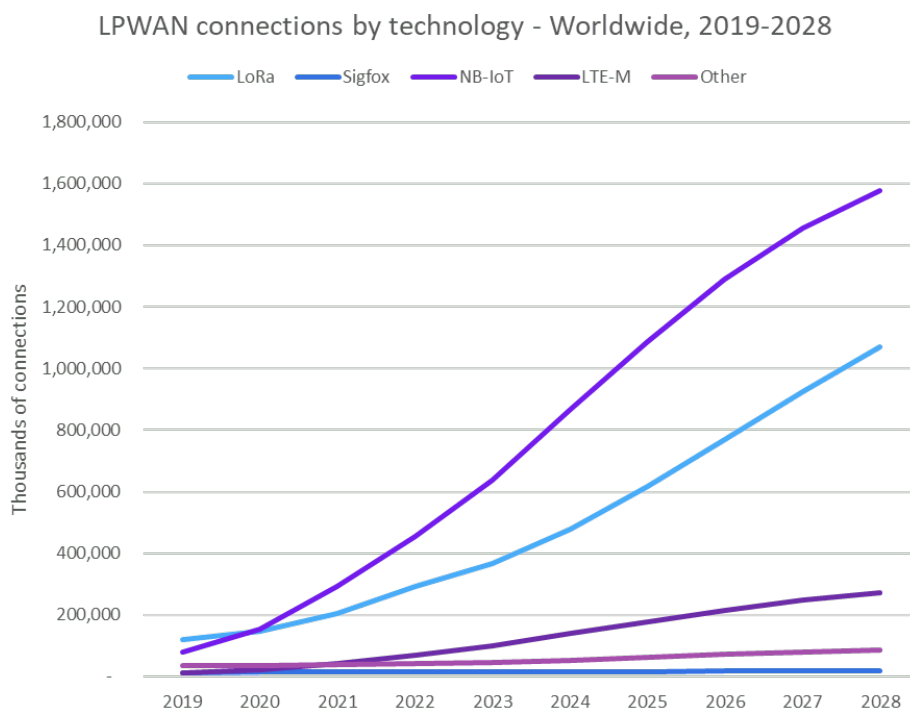


Obrázek 1.2: Historický vývoj sítí LPWAN[5].

alarmové systémy a jejich senzory ve frekvenčním pásmu kolem 900 MHz. Současně s ní vznikala síť ARDIS (*Advanced Radio Data Information Service*), která pomocí velmi malých datových toků předávala informace o zásilkách a online transakcích, čímž pomáhala automatizaci tohoto průmyslu. Tyto sítě byly pouze jednoúčelové a zařízení mimo systémy od firem, které tyto sítě vytvořily nebylo možné integrovat. Nicméně posloužily jako základy pro moderní síť LPWAN, které známe dnes.

Moderní sítě LPWAN jsou univerzální a umožňují přenos dat z různých aplikací. Prvenství v této kategorii měla v roce 2009 ve Francii síť SigFox[6]. V této době byla bezdrátová zařízení čím dál tím dostupnější a SigFox nabízel velmi jednoduché a cenově rozumné připojení do své sítě. SigFox se nadále rozvíjel i mimo Francii a s pomocí lokálních operátorů zprostředkovává end-to-end připojení do svojí sítě[4]. Zanedlouho potom začali rozvíjet LPWAN sítě např. aliance LoRa, Ingenu a také hráči na poli buňkových rádiových sítí se skupinou 3GPP. Jejich vývoj v počtu připojených zařízení v současné době je vidět na obrázku č. 1.3 a jasně z něj vyplývá, že hlavními konkurenty sítě LoRa jsou bezpochyby NB-IoT a LTE-M. Také je v grafu zmíněn Sigfox, který je v současné době v úpadku, jelikož je zaměřen na velmi jednoduché aplikace vyžadující malý objem dat.

Sigfox má velkou spoustu omezení po technické stránce. Nejzásadnějším z nich je limitovaný počet zpráv, které lze poslat během dne, a omezená velikost zprávy na 12 bytů. S tím souvisí i potřebná přenosová rychlost. Ta dosahuje pouhých 100 b/s, avšak tuto rychlost je SigFox schopný udržet až na vzdálenosti nižších desítek kilometrů[2]. V případě meteorostanice je rozumný rozestup mezi odesláním zpráv s meteorologickými daty 5-15 minut, a tudíž bychom se mohli v nejhorším případě dostat až na dvojnásobek denního maxima Sigfoxu, které činí 140 zpráv. Současně s tím chceme meteorologická data přesná, a to si vyžaduje větší objem dat, obzvláště pokud by bylo v plánu



Source: Omdia LPWAN Market Report - 2022

© 2023 Omdia

Obrázek 1.3: Počet připojených zařízení dle LPWAN technologie[7].

meteostanici rozšiřovat o další senzory.

Další body ztrácí SigFox z pohledu finančního[6]. V malých sítích do 1000 zařízení se totiž platí za každé zařízení připojené do sítě. Cena se pak odvíjí podle limitu odesílaných zpráv a toho, zda chceme zařízení lokalizovat pomocí technologie Atlas Native. Cena jednoho připojení se pak pohybuje v rozsahu 150 až 300 korun pro Českou republiku, což SigFox dělá ještě více nevhodnou variantou pro aplikaci meteostanice.

NB-IoT je technologie skupiny 3GPP a stejně jako mobilní sítě má výhodu v již vybudované infrastruktuře díky společnému médiu GSM a LTE sítí. Toto však nelze brát pouze jako výhodu, neboť se jedná o licencované pásmo, tudíž pásmo placené. Stejně jako sdílí s mobilními sítěmi infrastrukturu, tak s ní i neduhy spojené s nutností mít stále zapnutý přijímač pro stálé připojení k síti. Tato skutečnost neplatí pouze v případě, že poskytovatel připojení podporuje technologie eDRX (*Extended Discontinuous Reception*) nebo PSM (*Power Saving Mode*), které velmi ovlivňují spotřebu energie uspaním koncového zařízení na určitou dobu. Oproti mobilním sítím má NB-IoT zúžené pásmo 200 kHz, což mohla napovědět jeho zkratka NB (*Narrow Band*), a nepožaduje se hlášení metrik, které nejsou pro IoT důležité, jako jsou např. data o kvalitě spojení nebo informace o agregaci nosné. Naopak některé služby jsou pro IoT užitečné a technologie NB-IoT se snaží je využít co nejefektivněji, aby mohlo

Tabulka 1.1: Souhrn srovnávací vlastnosti sítí LPWAN[2].

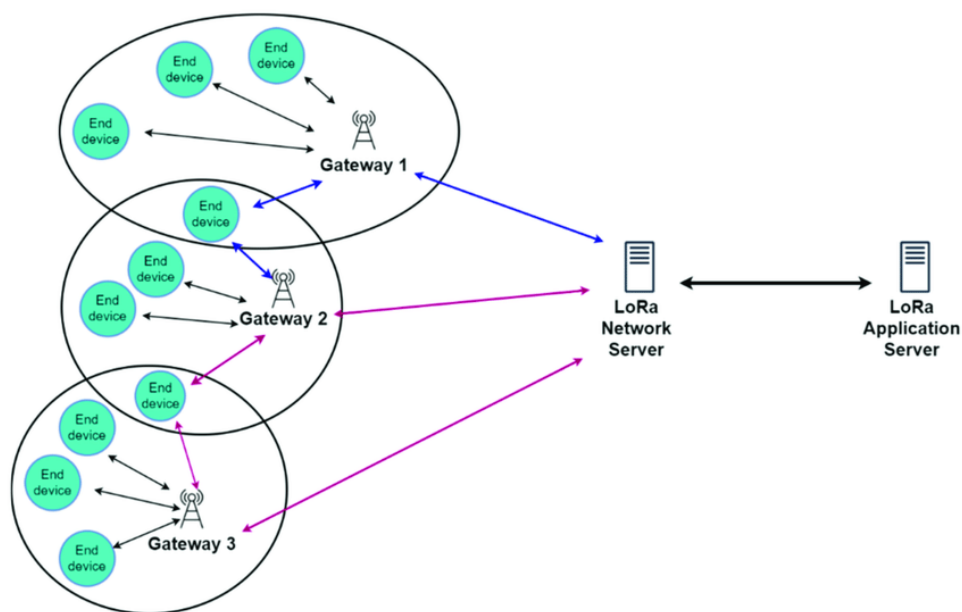
Parametr	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulace	BPSK	CSS	QPSK
Frekvence	Nelicencované ISM pásmo ^a	Nelicencované ISM pásmo	Licencované frekvence LTE
Šířka pásma	100 Hz	250 a 125 kHz	200 kHz
Max. přenos. rychlost	100 b/s	50 kb/s	200 kb/s
Obousměrný provoz	Limitovaný/Half- duplex	Ano/Half- Duplex	Ano/Half- duplex
Max. počet zpráv ^b	140	Neomezeno	Neomezeno
Max. velikost zprávy	12 B	243 B	1600 B
Dosah	10 km (urban ^c) 40 km (rural ^d)	5 km (urban) 20 km (rural)	1 km (urban) 10 km (rural)
Odolnost vůči rušení	Velká	Velká	Malá
Šifrování a Ověřování	Ne	Ano	Ano
Adaptivní přenos. rychlost	Ne	Ano	Ne
Lokalizace	Ano (RSSI)	Ano (TDOA)	Ano

^a868MHz pro Evropu^bběhem 24 hodin^cve více zabydlených oblastech^dv méně zabydlených oblastech

být připojeno co nejvíce zařízení v oblasti jedné buňky. I přes všechny snahy se ale mezi LPWAN technologiemi rozhodně neřadí mezi nejúspěšnější[2].

Co se finanční stránky týče, je jeho nevýhodou už zmiňované licencované pásmo u operátorů, a tedy nutnost pořízení tarifu pro svoje zařízení. Samozřejmě jsou k dispozici odstupňované úrovně, které poskytují různý objem dat a počet SMS zpráv, které zařízení mohou poslat. Jejich cena se pohybuje kolem 450 korun za každé zařízení[8]. Pokud by zařízení přečerpalo některý z limitů, je nutné SIM kartu dobít, čímž se cena tím dále navyšuje. Vzhledem k cenové relaci meteostanice je tato částka téměř nepřijatelná. Další nevýhodou je omezená volnost rozvoje aplikace a případné dobudování infrastruktury bude také v rukou poskytovatele.

LTE-M (*Long Term Evolution for Machines*) představuje skupinu technologií ze skupiny 3GPP pro IoT zařízení. Opět používá jako médium mobilní LTE síť, ale oproti NB-IoT používá širší pásmo 1,4 MHz, tedy může poskytnout vyšší přenosové rychlosti až do 1 Mbit/s v obou směrech, což je mnohem více, než nabízí většina LPWAN technologií[4]. Této rychlosti se využívá zejména ve složitějších projektech, kde je zapotřebí nízká latence a častý přenos většího objemu dat. LTE-M také na rozdíl od NB-IoT podporuje me-



Obrázek 1.4: Topologie protokolu LoRaWAN[9].

zibunkový roaming, což je výhodné, pokud se nejedná o zařízení statické jako v případě meteostanice. Obě technologie podporují eDRX a PSM, ale tyto funkce nemusí být podporované u poskytovatele IoT připojení, a i přes jejich implementaci jsou NB-IoT a LTE-M stále méně úsporné než konkurenční LoRa a Sigfox.

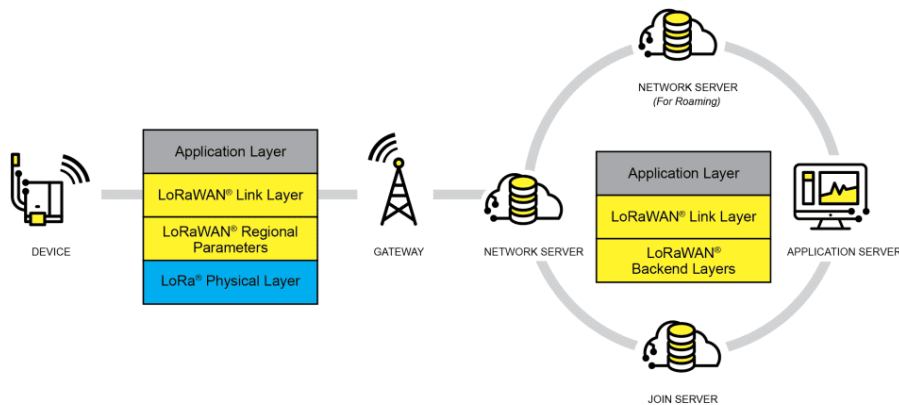
1.3 LoRa

Síť LoRa se řadí mezi nejvíce rozšířené LPWAN sítě. Její klíčové vlastnosti jsou obousměrná komunikace na dlouhou vzdálenost, koncové šifrování, podpora zařízení v pohybu a jejich lokalizace a v neposlední řadě otevřený prostor pro bezplatný rozvoj vlastní aplikace[10].

Její architektura formuje topologii rozšířených hvězd, viz obrázek č. 1.4. Jednotlivá zařízení se rozdělují na koncová zařízení, jejichž úkolem je sběr dat a následné odeslání na sběrný bod. Již zmíněné sběrné body slouží jako překladač, který surová data z koncových zařízení převede na IP (*Internet Protocol*) pakety a naopak. Sběrné body posílají pakety skrze standardní IP síť na aplikační servery, kde se data dále zpracují[11]. Grafické znázornění topologie architektury lze vidět na obrázku č. 1.5

1.3.1 Historie

Název LoRa z anglického *Long Range* pochází původně z techniky modulace s rozprostřeným spektrem vyvinutou společností Semtech v roce 2014. Je



Obrázek 1.5: Architektura protokolu LoRaWAN[10].

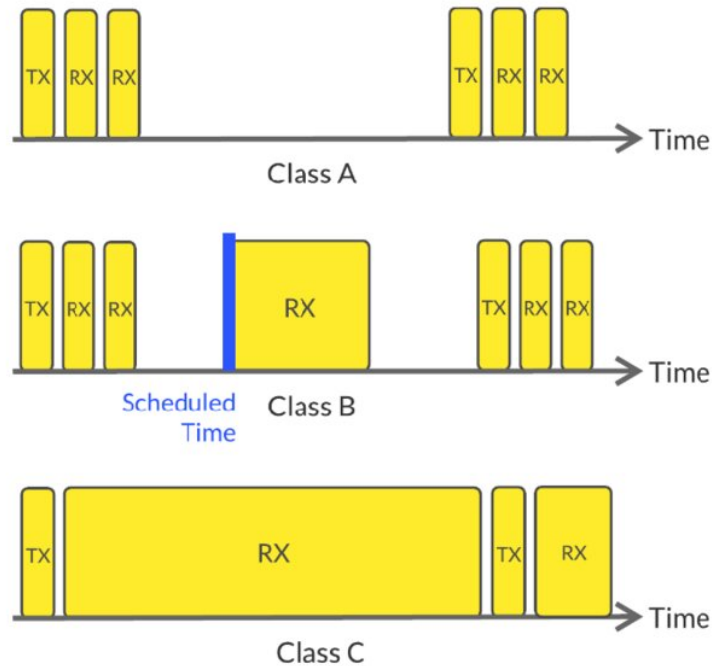
založena především na principech CSS (*Chirp Spread Spectrum*) modulace, která umožňuje přenos většího objemu dat přes stejné médium a větší odolnost vůči šumu[12], což se v IoT aplikacích pracujících s malým vysílacím výkonem velice hodí. LoRa tedy definuje fyzickou vrstvu, jenže to pro implementace v průmyslu a obecný rozvoj nestačí, proto se začalo pracovat na společném standardu, který by mohl technologii LoRa využít.

Zde přichází na scénu otevřený komunikační protokol a standard používaný v sítích LoRa, LoRaWAN. Ten je standardizovaný a spravovaný neziskovou společností LoRa Alliance již od roku 2015 [12], kdy byla společnost založena. Současně s ní vznikla i první specifikace LoRaWAN, která byla později v roce 2021 schválena mezinárodní telekomunikační unií (ITU-T) jako standard pro komunikaci v LPWAN sítích [13]. V současné době čítá aliance kolem 500 členů z různých odvětví průmyslu. Mezi nimi jsou i velká jména jako Amazon, Cisco, Comcast MachineQ, STMicroelectronics a spousta dalších firem, jež se podílejí na vývoji technologií spojených s LoRaWAN[14].

1.3.2 Třídy koncových zařízení

Koncové zařízení lze dále rozdělit do tříd podle způsobu komunikace se sběrným bodem. A to od třídy A, která se ohlašuje podle své aplikace v různých časových intervalech, je tedy šetrná na spotřebu energie až po třídu C, která se zaměřuje na co nejmenší zpoždění při komunikaci[11].

Třída A slouží jako základ pro třídu B a C. Sdílejí základní funkcionality, jako je metodika připojení ke sběrným bodům a ověřování nebo koncové šifrování. Také proto musí podle [11] každé zařízení být kompatibilní s třídou A. Koncové zařízení třídy A komunikují obousměrně pomocí uplink zpráv odesílaných v intervalech určených koncovým zařízením. Tyto uplink zprávy pak následují dvě krátká okna pro příjem zpráv ze sběrného bodu v přesně



Obrázek 1.6: Vizualizace komunikace v třídách podle specifikace LoRaWAN [15].

daných intervalech vypočítaných na základě délky zprávy a regionálních nastavení dle specifikace[11]. Tato okna lze využít pro nastavení zařízení, jež zařizujeme pomocí MAC příkazů. Pokud se však v těchto oknech zpráva nedoručí, musí se počkat na další uplink zprávu. Tento typ komunikace může být z principu nespolehlivý, jelikož nám nezaručuje doručení ani příjem zpráv. Na druhou stranu je to výhodou pro úsporu energie, protože prostor pro komunikaci je nejmenší možný, viz obrázek č. 1.6. Třída je tedy vhodná především pro senzory s omezenou kapacitou baterie bez nutnosti výrazné vnější správy.

Koncové zařízení třídy B mají oproti třídě A synchronizované okno pro příjem navíc. To se hodí především pro aktuátory, kde je potřeba určitým způsobem jejich funkci řídit. V těchto oknech posílá sběrný bod stejně jako v předchozím případě MAC příkazy, pomocí nichž ovládá funkce koncového zařízení.

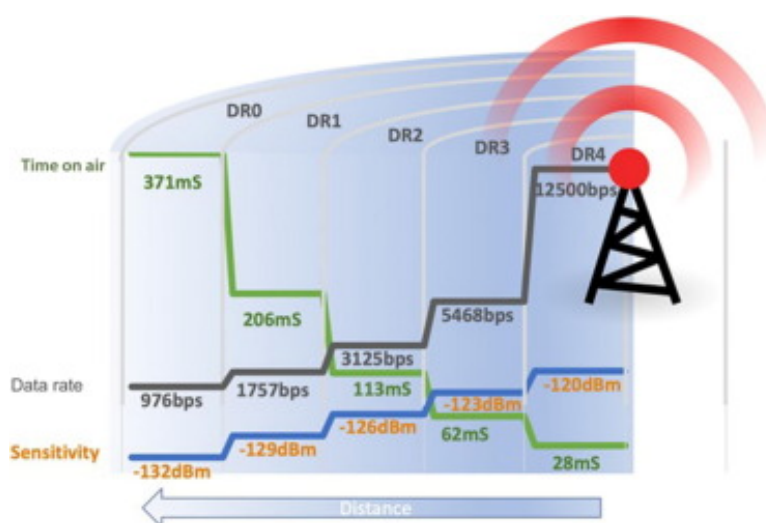
Třída C nabízí oproti předchozím velmi odlišný typ komunikace. Má totiž neustále otevřené okno pro příjem, kromě chvílí, kdy zrovna zařízení vysílá, viz obrázek č. 1.6. To znamená, že je zařízení stále dostupné a je možné ho ovládat téměř kdykoliv. Tato skutečnost se podepíše nejen na latenci, ale i na spotřebě daného zařízení. Tudíž je tato třída vhodná pro zařízení, jež mají

stálý zdroj napájení nejlépe ze sítě.

Pro aplikaci meteostanice bude nejlepší zvolit třídu A z důvodu úspory energie a minimálních požadavků na vnější správu a latenci.

1.3.3 Adaptivní rychlost přenosu dat

Mimo vysílání po různých kmitočtech ve svém pásmu LoRaWAN umožňuje nastavovat rychlost přenosu dat, tj. DR (*Data Rate*) v závislosti na vzdálenosti ke sběrnému bodu a vlastnostech prostředí mezi nimi. Dle [16] nejlepších výsledků z hlediska úspory energie dosahujeme při nejvyšších rychlostech (DR4) z důvodu velmi krátkého času vysílání. Nižší rychlosti používané na delší vzdálenosti tento čas prodlužují a zároveň s tím roste spotřeba energie. Tuto závislost lze vidět na obrázku č. 1.7. Dalším důvodem pro adaptivní úpravu rychlosti může být interference mezi kanály při vyšších rychlostech v hustě osazených sítích LoRa. Rychlost a další parametry může upravovat jak sběrný bod, tak koncové zařízení samotné, pokud se dostane do situace, kdy si sběrný bod neví s nastavením rychlosti rady[11]. To se může stát, pokud je například zařízení v pohybu. Funkce adaptivní rychlosti nemusí být implementována, ale z hlediska úspory energie se jedná značnou úsporou, jelikož opět nastavujeme pouze nezbytně nutné prostředky potřebné pro přenos, což se pro prodloužení životnosti meteostanice nepochybně hodí.



Obrázek 1.7: Závislost spotřeby a potřebné citlivosti na použité rychlosti[16].

1.4 LoRaWAN koncové zařízení

Z praktického hlediska jsou LoRaWAN uzly (*LoRaWAN Nodes*) pouze spojením mikrokontroléru a LoRa modulu pro komunikaci[12]. Jedná se o typický příklad koncového zařízení v sítích LoRa. Mikrokontrolér zde spojuje

a řídí senzory a aktuátory. V závislosti na složitosti aplikace zpracovává data, která pak s pomocí LoRa modulu odešle na sběrný bod. LoRa modul se zde stará pouze o fyzický příjem a vysílání signálu společně s jeho modulací.

Lze si teoreticky sestavit vlastní řešení, které aplikaci bude vyhovovat na míru s vlastní volbou každé z částí. To se ovšem může vyplatit pouze tehdy, pokud chceme mít naprostou jistotu o kvalitě zpracování a funkce, jelikož každá malá část projde pod rukou vývoje. To je nákladné a vzhledem k promítnutí nákladů na vývoj do koncové ceny zařízení je vhodné částku za vývoj udržet na minimální hodnotě. Druhou možností je využít trhu, kde se nachází mnoho zhotovených komerčních řešení[12]. Některá z nich jsou již připravena k jednoúčelovému použití a stačí je jen přidat do svojí sítě. Jedná se například o senzory otevření dveří viz obrázek č. 1.8. Vnitřním zapojením bývají velmi jednoduché a většinou obsahují pouze dostačující mikrokontrolér pro zpracování signálu a řízení LoRa modulu. Často také bývají napájeny z komerčně dostupných baterií, které se snadno vyměňují bez větších znalostí uživatele.

Další skupinu na trhu tvoří zařízení, která lze upravovat dle svojí aplikace a nemusí mít jednotný účel. Jedná se o vývojové desky anebo zařízení s vyššími řadami mikrokontrolérů. Většinou je možné si takové zařízení pořídit v různých variantách se stejnou částí, která data zpracovává. Příklad takového zařízení je vidět na obrázku č. 1.9. Toto řešení rozhodně ušetří spoustu problémů a nákladů při vývoji, a proto se nyní zaměřím na správnou volbu takového zařízení.



Obrázek 1.8: Jednoúčelový uzel připraven k použití[17].

1.4.1 Výběr koncového zařízení

V komerčním prostoru se nabízí spousta výrobců těchto zařízení a špatně se porovnávají mezinárodně kvůli jejich dostupnosti. Proto je porovnávám dle cenové relace v České republice a nutných parametrů pro vývoj meteostanice. Mezi ně patří dostatečný počet vstupů a výstupů a nejlépe integrovaná



(a) : Senzor vlhkosti půdy (b) : Albedometr (c) : Senzor tlaku, hladiny

Obrázek 1.9: Víceúčelový uzel od firmy DecentLab[18].

Tabulka 1.2: Souhrn srovnávací parametry koncových zařízení.

Parametr	Dragino LSN50 v2	Milesight UC501	Solidus Tech MU-TH-IP65
Počet analog. vstupů	2	2	3
Počet dig. vstupů	18	2	5
Mikrokontrolér	STM32	STM32	Neuvedeno
Baterie	Li/SoCl ₂	Li/SoCl ₂	Li/SoCl ₂
Kapacita	8500 mAh	3x9000 mAh	2x2600 mAh
Stupeň krytí	IP68	IP67	IP65/68
Citlivost příjmu	-148 dBm	-137 dBm	Neuvedeno
Spotřeba energie ve spánku	2,7 μ A	Neuvedeno	3.5 μ A
Spotřeba energie při vysílání	125/44 mA	Neuvedeno	80 mA
Integrované funkce	Teplota, Vlhkost	žádné	Teplota, Vlhkost
Cena pro koncového zákazníka	1980 Kč	4260 Kč	3120 Kč

možnost měření některé z veličin ze zadání. V cenové relaci kolem 3000 korun se nachází zařízení od firmy Dragino, Milesight a Solidus Tech. Jejich zástupci jsou parametrově porovnání v tabulce č. 1.2.

Zařízení od firmy **Milesight** nabízí v podstatě kompletní řešení, ke kterému stačí pouze přidat senzory skrze sériovou linku, SDI-12, nebo obecné GPIO (*General Purpose Input Output*) piny. Zařízení sice běží na mikrokontroléru z rodiny STM32, které jsou známé pro jednoduchý rozvoj vlastních aplikací. Zde však zařízení takové úpravy nepodporuje.

Solidus Tech nabízí velmi minimální řešení a pro další rozvoj aplikace zde není příliš prostoru. Dokumentace ohledně zařízení je nedostatečná, a tedy nevhodná pro vývoj. Výhodou je použití běžně dostupných baterií typu AA, které lze snadno vyměnit.

Dragino je z hlediska ceny, úspory energie a citlivosti na přijímaný signál parametrově nejlepší. Kapacita baterie je dostatečně velká, a pokud by to lépe vyhovovalo aplikaci, lze jej zakoupit s baterií o kapacitě 4000 mAh. Také je na rozdíl od ostatních open-source pro vývoj vlastních aplikací s bohatou dokumentací, viz [19]. Se zařízeními od firmy Dragino mám také zkušenosti z minulých projektů, a proto jej volím i pro aplikaci meteostanice.

1.5 Sběr meteorologických údajů

Meteorologické jevy a procesy zahrnují širokou škálu časoprostorových měřítek od sledování malých turbulencí po sledování globálního klimatu. Vizualizaci dat je pak nutné upravit podle toho, na jaké jevy se chceme v aplikaci zaměřit. Například pokud se chceme zaměřit na zkoumání počasí¹, pak budeme požadovat údaje o průběhu a tvaru bouře. Nebo se můžeme chtít zaměřit na zkoumání dlouhodobého klimatu², pak nás budou zajímat statistické celky jako např. změny průměrného množství srážek, průměrné teploty atd.[20].

Moderní meteorologie využívá dat z atmosférických měření a výstupů numerických modelů, který tato data zpracují. Získání těchto dat je úkolem meteostanice a IoT řešení poskytuje data, která jsou v síti jednotně formátovaná. Díky lokalizaci je také známa poloha měření. To znamená, že získaná data se dají lépe zpracovat. Pro interval mezi měřeními byl vybrán jako orientační zdroj hodnot stanice ČHMÚ (Českého Hydrometeorologického Ústavu). Ten na automatizovaných stanicích měří v intervalech 10 minut. Data pak aktualizuje na webových stránkách každých 30 minut[21].

1.5.1 Teplota

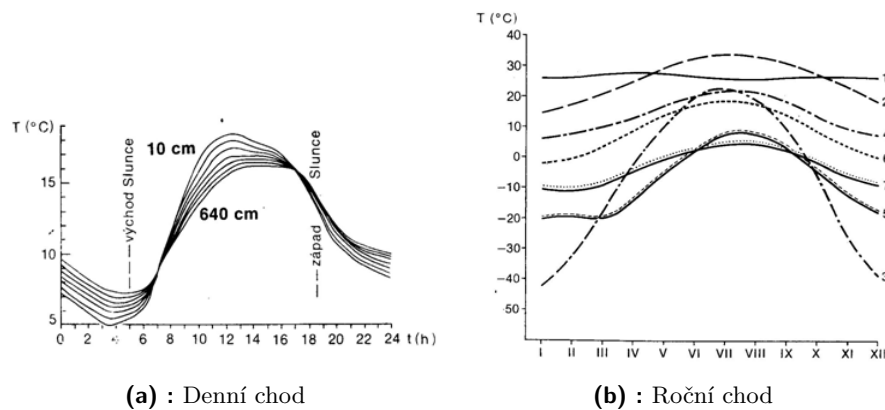
Teplota vzduchu je základní meteorologický prvek a měří se ve výšce 2 m nad zemským povrchem. Označuje se jako přízemní teplota [22]. U teplotních charakteristik je nezbytné znát jejich průběh. V klimatologii se proto sleduje denní a roční chod. Denní chod vyjadřuje teplotní změny během 24 hodin, roční chod analogicky vyjadřuje změnu teploty během jednoho roku, k čemuž se používají denní, dekádové či měsíční charakteristiky. Příklad těchto charakteristik je možné vidět na obrázku č. 1.10.

Teplota je závislá na spoustě faktorů, jako je například nadmořská výška, proudění vzduchu a adiabatické děje³, které za určitých podmínek nastávají. Nejdůležitější z nich bude pro tuto aplikaci závislost na nadmořské výšce, která je dána vertikálním teplotním gradientem průměrně stanoveným na 0.65 °C na 100 metrů[22].

¹stav atmosféry v určitém místě a čase

²statistické údaje o počasí za určitý časový interval

³děj, kdy nedochází k výměně energie s okolní atmosférou



Obrázek 1.10: Teplotní charakteristiky dostupné z [22].

1.5.2 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu představuje základní meteorologický prvek vyjadřující množství vodních par ve vzduchu. K vyjádření obsahu vodních par v atmosféře se využívají charakteristiky jako tlak vodních par, relativní nebo absolutní vlhkost vzduchu a teplota rosného bodu[22]. Většinou se udává vlhkost relativní v procentech. Tu lze vyjádřit z následujícího vzorce[22]

$$R = \left(\frac{e}{E}\right) \cdot 100[\%], \quad (1.1)$$

kde e vyjadřuje parciální tlak vodní páry ve směsi se suchým vzduchem a E vyjadřuje maximální tlak, kdy vzduch nedokáže pojmout více vodní páry, tedy stav nasycení při dané teplotě.

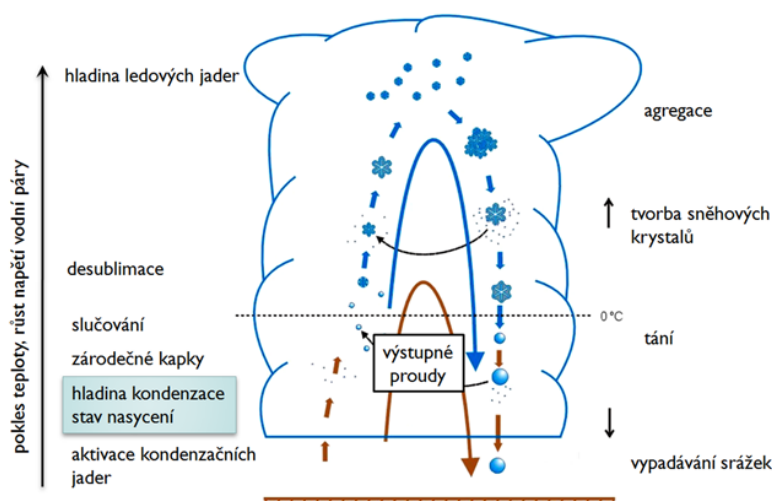
1.5.3 Kondenzace vodních par v atmosféře

Zdrojem vodních par pro atmosféru je aktivní povrch, proto s nadmořskou výškou obsah vodní páry ve vzduchu klesá, k čemuž přispívá také její kondenzace⁴. Z aktivního povrchu jsou vodní páry vynášeny do větší výšky, kde v důsledku celkového poklesu teploty vzduchu desublimují⁵ a tvoří tak ledová jádra. Ledová jádra a oblačné kapky pak tvoří oblak, jenž udržuje velmi malé výstupné proudění vzduchu. Pokud se jich nahromadí příliš mnoho, výstupné proudění již nestačí k udržení srážek ve vzduchu a z oblaku začnou vypadávat, tedy vznikají tzv. vertikální srážky[22]. Tento proces je vizualizován na obrázku č. 1.11

Množství srážek pak představuje další meteorologickou charakteristiku, která se uvádí v mm vodního sloupce. Jeden milimetr srážek tak odpovídá jednomu litru vodu na 1 m^2 . Množství srážek se nejčastěji sleduje v denním, měsíčním nebo ročním chodu a označuje se jako srážkový úhrn[22].

⁴změna skupenství z plynného na kapalné

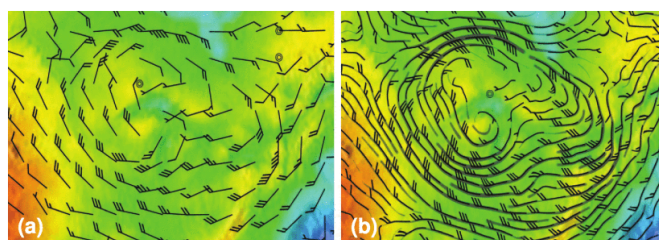
⁵děj, při kterém látka přechází ze skupenství plynného přímo do skupenství pevného



Obrázek 1.11: Vznik a vypadávání srážek[22].

1.5.4 Proudění vzduchu

Vítr je zjednodušeně proudící vzduch. Jeho proudění je závislé na prostorovém rozmístění polí atmosférického tlaku a má vždy tendenci rozdílné hodnoty tlaku vyrovnávat. Proudí tedy z oblasti vyššího tlaku do oblasti nižšího tlaku. U větru rozlišujeme jeho směr a rychlost. Okamžitý stav pole proudění větru lze na základě orientace vektorového pole vyjádřit pomocí čar, tzv. proudnic. Ty mohou vypadat například takto, viz obrázek č. 1.12. Mezi hlavní příčiny proudění vzduchu patří síla horizontálního tlakového gradientu, Coriolisova síla, odstředivá síla a síla tření[22].



Obrázek 1.12: Příklady použití proudnic[20].

U větru jako meteorologického prvku se měří jeho rychlost a směr. Vítr, který svou rychlost mění v krátké době o více než 5 m/s, se označuje jako nárazovitý. Směr větru se stanovuje z oblasti, odkud vane, a udává se ve stupních azimutu. Vítr vanoucí ze severu na východ proudí pod azimutem 0° a označuje se jako severní vítr. Východní vítr pak analogicky vane pod azimutem 90° z východu na západ. Mění-li vítr svůj směr o více jak 45° , označuje se jako proměnlivý vítr[22].

Kapitola 2

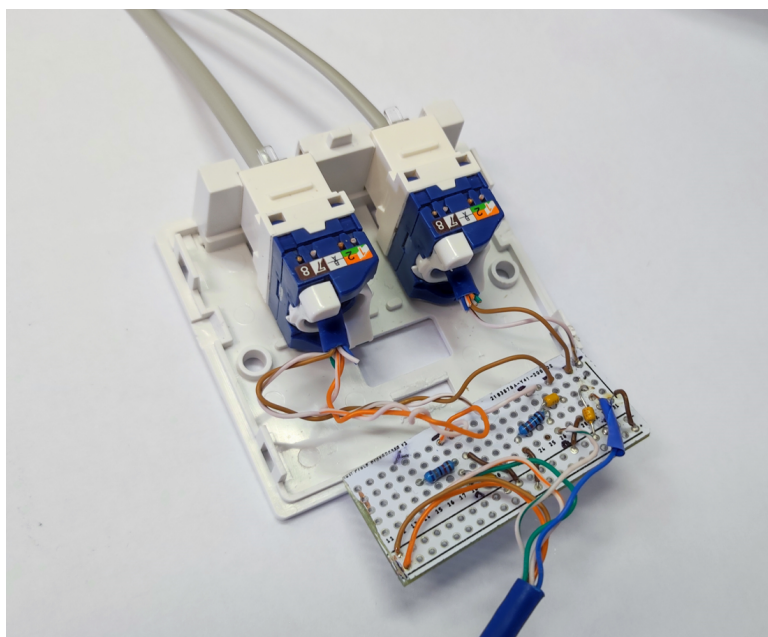
Implementace

2.1 Hardware

Pokud se jedná o hardwarové řešení meteostanice, bylo více než vhodné využít stávající vodotěsný kryt, který je akorát velký pro baterku a hlavní část mikrokontroléru s LoRa modulem, tedy dražší komponenty meteostanice. Na obrázku č. 2.1 lze zapojení této části vidět. Stačilo pouze přidat vodotěsný vstup pro připojení vnějších senzorů a pro jejich správnou funkci zapojit pasivní součástky upravující signál do podoby, kterou je mikrokontrolér schopen zpracovat. Tyto součástky jsem ukryl do telefonní zásuvky, jež je alespoň minimálně ukrývá před vnějšími vlivy. Vnitřní uspořádání zásuvky lze vidět na obrázku č. 2.2. Toto řešení se mi zdálo rozumné z důvodu modularity a případné snadnosti oprav. Také se v zásuvce nenachází drahé součástky a případná výměna by nebyla příliš nákladná.



Obrázek 2.1: Koncové zařízení ve vodotěsném krytu.



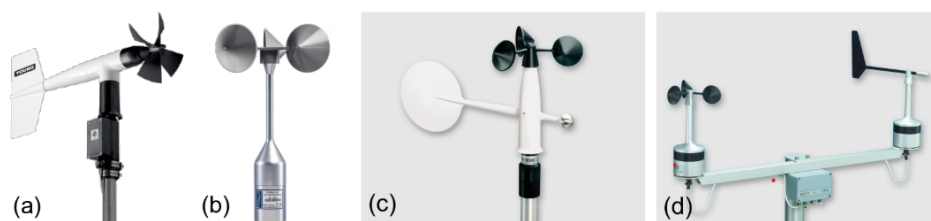
Obrázek 2.2: Zásuvka s pasivními součástkami.

■ 2.1.1 Senzory

Volba senzorů byla velmi přímočará. Kritérii aplikace jsou jednoduchost, cenová dostupnost a co nejmenší spotřeba energie. Meteostanice v tuto chvíli měří sílu a směr větru, objem srážek, teplotu a vlhkost vzduchu.

Pro měření síly větru jsou využívány **anemometry**[23]. Mezi nejčastěji používané patří turbínové, šálkové, teplotní a ultrazvukové. Turbínové anemometry jsou závislé na jejich poloze vůči směru větru, tedy nezachytí správnou hodnotu, pokud nejsou správně nasměrovány. Tento problém se dá vyřešit sofistikovaně spojením s otočným senzorem směru větru, jak lze vidět na obrázku č. 2.3, ale pro jednoduchost a modularitu je lepší senzory oddělit. Termální anemometry využívají závislost odvodu tepla s měnící se silou větru. Již z jejich principu je jasné, že bude potřeba mít vyhřívaný element. To je pro bateriově napájené řešení velmi nepraktické, a proto ho z výběru vyřazují. Ultrazvukové senzory mají velmi podobný problém jako termální a jejich cena bývá výrazně vyšší. Proto byl vybrán šálkový anemometr, který je nezávislý na směru větru a jeho konstrukce není příliš složitá. V tomto případě se jedná o spínač, který sepne při každé otáčce pomocí jazýčkového relé a magnetu. Pro měření směru větru je standardním senzorem větrná korouhev, která v závislosti na úhlu otočení mění svůj elektrický odpor.

Princip, na kterém fungují **srážkoměry**, je vcelku sebevysvětlující z definice v sekci 1.5.3. Podstatou je změřit objem napadaných srážek na nějakou plochu. To se v praxi dá provést ombrometry, které mají nádobu s rýskami



Obrázek 2.3: Různé typy anemometrů využívající rotace pro měření[23].

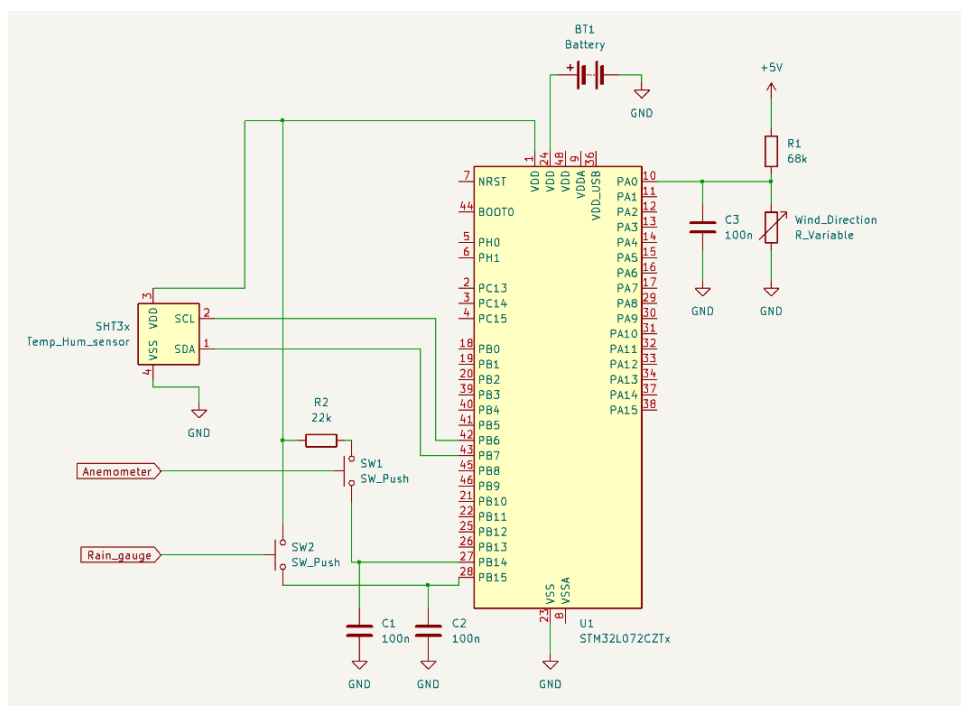
naznačující úhrn srážek za časové období. Je však nutné je ručně vyprazdňovat, což z nich nedělá příliš vhodný nástroj pro automatizované měření. Další skupinou jsou člunkové srážkoměry. Ty srážky měří pomocí svádění napadajících srážek na dělený překlápěcí člunek, který se překlápí při určitém úhrnu a vodu propustí skrze mřížku ven. Počet překlopení je zaznamenán opticky, mechanicky či magneticky, a měření je tím pádem automatické a bezúdržbové. Tyto srážkoměry jsou v principu velmi jednoduché, a tedy vhodné pro aplikaci IoT meteostanice. Je možné tyto srážkoměry doplnit o topný element, aby byl schopný měřit srážky i z napadaného sněhu. To však vyžaduje stálou spotřebu energie a tomu se v IoT aplikacích v ideálním případě chceme vyhnout.

Teplotní senzory jsou vůbec nejrozšířenější skupinou senzorů a existuje mnoho způsobů, jak teplotu měřit. Nejběžnějšími senzory jsou termistory typu NTC a PTC a metalické či polovodičové senzory. Tyto součástky mění svůj odpor v závislosti na teplotě, a tím pádem i úbytek napětí, který na nich vzniká. Zde si lze zvolit prakticky jakýkoliv. Záleží zde pouze na balancování ceny, přesnosti a citlivosti v našem rozsahu teplot. V případě této meteostanice je výhodné využít dodaný senzor teploty a vlhkosti SHT31 připravený na venkovní použití.

Vlhkoměry jsou senzory založené na hygroskopických vlastnostech¹ některých materiálů. Například mechanické využívají lidských vlasů, které přirozeně mění svoji délku v závislosti na pohlčené vlhkosti. Elektrické pak opět využívají změny odporu nebo změny kapacity na základě vlastností hygroskopických materiálů[24]. Jak bylo zmíněno, je vhodné použít již dodaný senzor SHT31, který je založen na kapacitních změnách polymerového dielektrika pohlčujícího vlhkost[25].

Schéma zapojení senzorů bylo vcelku jednoduché, což bylo naším cílem. Jedná se o spínací obvody, které jsou připojeny na digitální vstupy. Mikrokontrolér pak pouze čítá jejich náběžné či sestupné hrany. Senzor směru větru je založen na analogovém čtení hodnoty úbytku napětí na proměnném rezistoru v napěťovém děliči. Senzory jsem doplnil o malé odrušovací kondenzátory, které pomáhají ošetřit nejen mechanické zákmity, ale i vnější harmonické rušení[26]. Jediný senzor, jenž využívá složitější sběrnice I2C, je senzor teploty

¹schopnost pohlcovat a udržovat vlhkost



Obrázek 2.4: Schéma zapojení meteostanice.

a vlhkosti SHT31. To je ale pro tyto senzory běžné, a pokud bychom chtěli stanici rozšiřovat o více senzorů, tak adresaci I2C sběrnice lze s výhodou využít.

2.1.2 Mikrokontrolér

Dragino LSN50 disponuje mikrokontrolérem z rodiny STM32 jmenovitě řady L0. Ty disponují nejnižší spotřebou z řad mikrokontrolérů STM32. Konkrétně osazený má procesor ARM Cortex M0+ architektury RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) pracující na frekvenci 32 MHz, 192 kB programové paměti, 6 kB paměti typu EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) pro data a 20 kB RAM (*Random Access Memory*) pro různé procesy, které v aplikaci poběží. Dále má spoustu vstupů a výstupů pro periférie, jak je vidět z tabulky č. 1.2. Také disponuje řadou pokročilých sběrnic, jako jsou I2C, SPI, I2S a UART včetně jeho úsporné verze LPUART. Z požadavků na periférie tedy mikrokontrolér více než dostává pro aplikaci meteostanice i s prostorem na budoucí rozšíření. Více o mikrokontroléru lze zjistit z [27].

2.1.3 LoRa komunikační čip

Použitý komunikační čip je založen na SX1276/78 od společnosti Semtech a nabízí velmi dobré parametry pro dlouhý dosah, spolehlivost a nízkou



Obrázek 2.5: náhradní Baterie ER26500 + SPC1520[28].

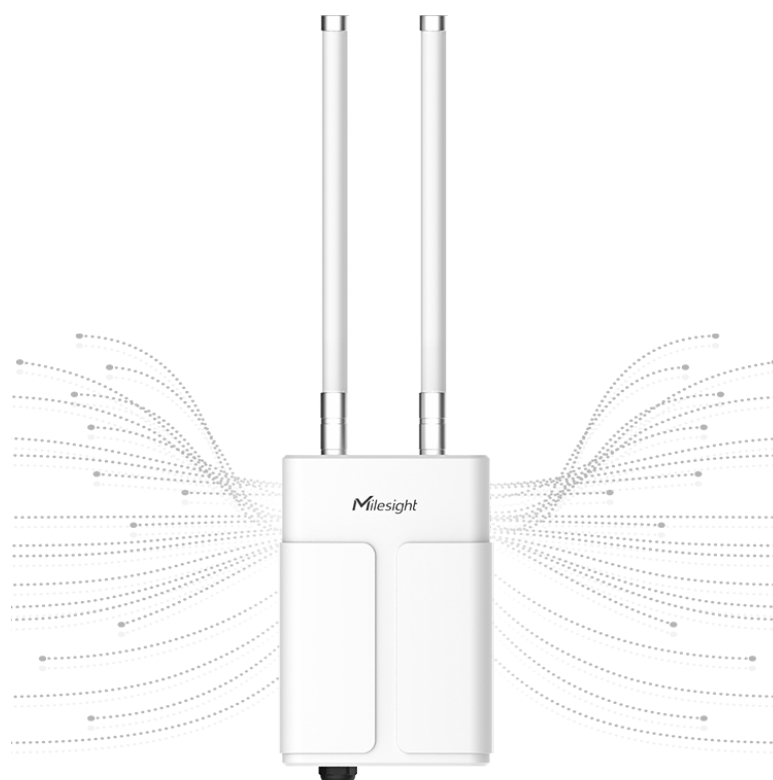
spotřebu energie. Může dosáhnout citlivosti až -148 dBm a vysílacího výkonu $+20$ dBm s použitím levných a dostupných materiálů na výrobu. Čip je nejen schopný LoRa modulace, ale i ostatních komerčně užívaných, jako je FSK, GFSK, MSK, GMSK. Zároveň čip obsahuje různé obvody, díky nimž se dále zlepšují jeho vlastnosti zpracování, o kterých se lze dočíst z [29].

■ 2.1.4 Baterie

V zařízení je použita baterie ER26500 v kombinaci se superkondenzátorem SPC1520. Baterie je typu LiSOC12, jenž se řadí mezi nedobíjecí primární baterie, které mají velkou kapacitu. Jsou dlouhodobě skladovatelné a mají velmi nízkou míru samovybíjení (méně než 1 % za rok při 20 °C)[30]. Tyto baterie jsou vhodné jako zdroj energie pro aplikace, které vyžadují dlouhodobý bezúdržbový provoz, nebo jako záložní zdroje pro paměťové integrované obvody[31]. Jak lze vidět na obrázku č. 2.5 velikostně i tvarově odpovídá bateriím typu D (velký monočlánek). Samotná baterie měří 61,5 mm na délku a 34,2 mm v průměru. Společně se superkondenzátorem tedy není příliš skladná a vyplňuje tak téměř celý kryt. Nicméně velikost baterie je na úkor předpokládané životnosti kolem 5 let přijatelná.

■ 2.1.5 LoRa gateway

LoRa gateway je zavedený pojem pro zařízení sloužící jako sběrný bod pro zařízení koncová. Pro testování v provozu byla použita LoRa gateway UG67 od firmy Milesight, kterou lze vidět na obrázku č.2.6. Ta je schopná poskytnout připojení až 2000 zařízení do vzdálenosti 15 km v přijatelných podmínkách. Je určena pro venkovní provoz, tedy disponuje ochranou IP67[32]. Nepatří mezi



Obrázek 2.6: Milesight G67 sběrný bod[32].

nejlevnější, nicméně má dobré pokrytí a na malé projekty vystačí pouze jedna. Kromě funkce sběrného bodu slouží také jako *Network Server*, který ovládá další sběrné body, aplikace a uživatele, kteří si data zobrazují. Mezi typické úkony Network serveru patří koncové šifrování, autentifikace, odstranění duplicitních zpráv a ovládání adaptivní rychlosti přenosu diskutovaného v sekci 1.3.3. Jeho hlavním úkolem je však směrování dat na správný aplikační server, kde se data dále vizualizují a zpracovávají[33].

■ 2.2 Firmware

Veškerý hardware se však neobejde bez programového řízení. Poskytnutý open-source kód od společnosti Dragino pro tvorbu firmwaru řeší spoustu funkcí již v základu. Jde například o metody ověřování a řízení LoRa modulu samotného. Na stránkách zařízení jsou vytvořeny tzv. *white papers*, které popisují různé implementace, na které lze Dragino LSN50 použít, viz [19]. Avšak není zdokumentovaný žádný pokus o aplikaci meteorostanice s tímto zařízením, a tak se neobešel bez nutných úprav.

Zpráva:

01b6	00000196	00000001	007a	0333	24
------	----------	----------	------	------	----

Směr větru

Síla větru

Srážky

Teplota

Vlhkost

Baterie

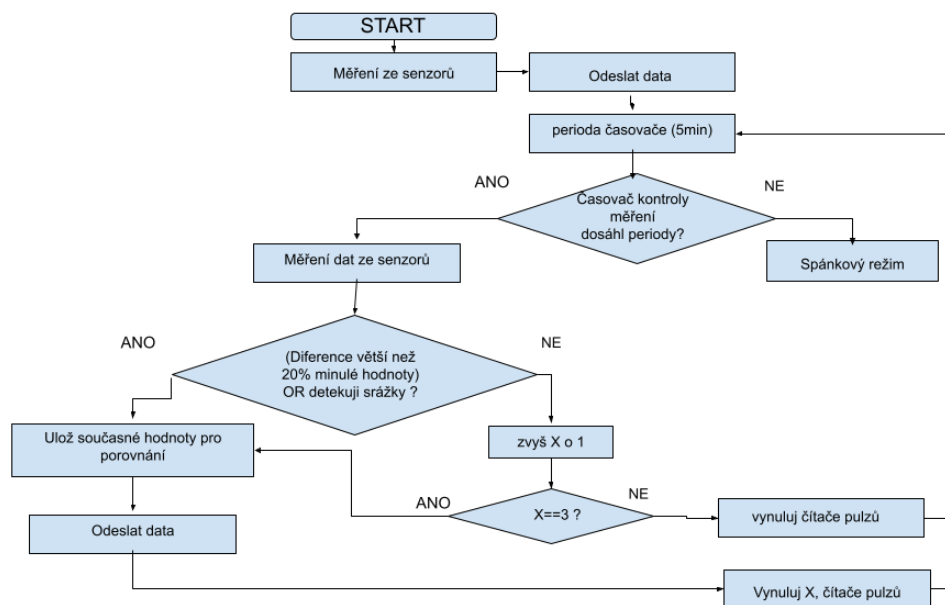
Obrázek 2.7: Obsah hexadecimální zprávy pro sběrný bod.

Mou prvotní myšlenkou bylo, že si potřebný kód budu připravovat v prostředí STMCubeIDE, kde lze některé věci, jako obsluhu časovačů a nastavení vstupů a výstupů, řešit graficky. Vygenerovaný kód v jazyku C pak ručně doplnit o logiku, kterou chci použít. Výhodou STMCubeIDE je integrovaný mód, kde lze mikrokontrolér připojit skrze ST-link a vyzkoušet si ho na živém zařízení s vypisováním hodnot a krokováním[34]. To se mi však za celou dobu vývoje nepodařilo i přesto, že zařízení vyvedené piny pro připojení skrze ST-Link má. Pravděpodobný důvod bude fyzický přepínač mezi nahráváním a spouštěním kódu, který lze vidět v levém horním rohu zařízení na obrázku č. 2.1.

Kód jsem tedy upravoval a kompiloval v prostředí Keil μ Vision 5, protože byl doporučen dokumentací. Část kódu, která čte ze senzorů, není příliš zajímavá. Jedná se o jednoduché použití přerušení k čítání pulzů, čtení dat z A/D převodníku, která se průměrují z 6 po sobě jdoucích měření. Nakonec je implementováno klasické čtení ze senzoru po I2C sběrnici. Tato data se pak ukládají do hexadecimální zprávy podle šablony na obrázku 2.7 a odešlou.

Podstatně zajímavější částí je kód pro proměnlivé odesílání dat, který má za účel úsporu energie. Jeho rozhodovací algoritmus je popsán blokovým schématem na obrázku č. 2.8. Pro úsporu energie se zaměřuje na užitečnost dat, která se nakonec dostanou na sběrný bod. V prvním kroku odešleme počáteční data, aby se budoucí data měli s čím další data porovnávat, a nastaví se perioda pro kontrolní měření. Kontrola je řešena přerušением při přetečení časovače, který běží nezávisle na programu. Ve smyčce kontrolního měření se data opět změní a porovnají s předchozími. V současné chvíli je práh užitečnosti dán diferencí jedné z veličin větší než 20 % z minulé hodnoty. Data jsou rovněž užitečná, při zaznamenání jakéhokoliv množství srážek, které je potřeba načítat pokaždé. Pokud jsou některá z dat uznána za užitečná, uloží se jejich hodnoty pro budoucí porovnávání a data se následně odešlou. Při každém běhu tohoto cyklu nulujeme čítače, které běží v pozadí, aby nevznikl problém s přetečením datových typů. Tato smyčka může proběhnout bez odeslání dat pouze 3krát, aby byla zachována přesnost měření, která by s vynechanými daty samozřejmě klesala. Vynechaná data by pak musely být interpolovány², což by bylo složité na implementaci.

²nalezení přibližné hodnoty funkce v nějakém intervalu, je-li její hodnota známa jen v některých jiných bodech tohoto intervalu[35]



Obrázek 2.8: Blokové schéma algoritmu proměnného intervalu posílání dat.

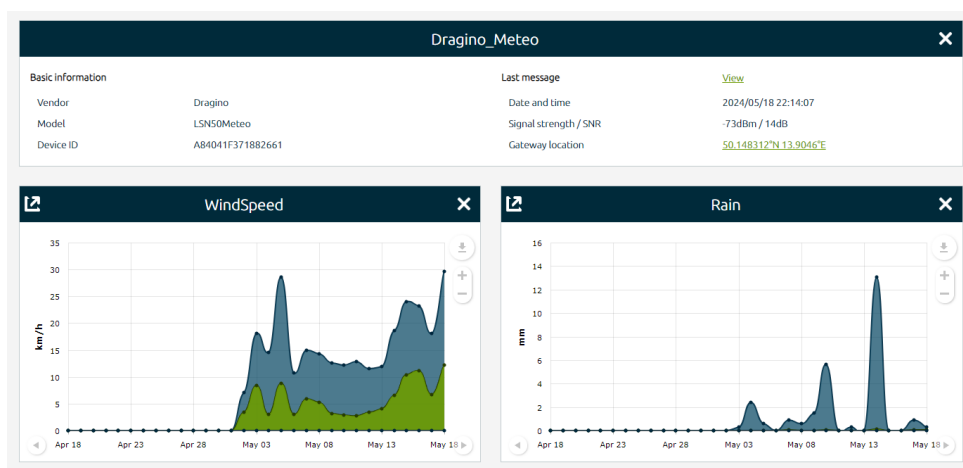
Date and time	Device	Payload	Value count	Action
2024-05-19 19:39:00	Dragino_Meteo	03bb000001ea000...	2 / 5 / 0	
2024-05-19 19:24:00	Dragino_Meteo	03bb00000191000...	2 / 5 / 0	
2024-05-19 19:19:00	Dragino_Meteo	03bb00000093000...	2 / 5 / 0	
2024-05-19 19:14:00	Dragino_Meteo	03bb000000d3000...	2 / 5 / 0	
2024-05-19 19:04:00	Dragino_Meteo	00dd000000a4000...	2 / 5 / 0	

Obrázek 2.9: Seznam zpráv s ověřením implementace proměnného intervalu.

2.3 Aplikace

Jak bylo zmíněno v sekci 2.1.5, *Network server* je integrovaný ve sběrném bodě a podle identifikačního čísla koncového zařízení přeměruje data na správný aplikační server. V případě této sítě se využívá aplikační server od společnosti Maxifi. Na něm si lze zařízení rozdělit do skupiny a poté s daty dále pracovat dle určených pravidel. Data ze zpráv pak lze po zpracování vizualizovat, ukládat do databáze a použít dle libosti. Maxifi aplikační server umožňuje nejen vizualizaci zpracovaných dat, ale i seznam všech přijatých zpráv se surovými daty. To se může hodit především při ověřování správné funkce, jako je například implementovaný algoritmus na intervaly zpráv, viz obrázek č. 2.9. Z časových značek lze vidět, že se interval skutečně mění. Na obrázku č. 2.10 lze vidět grafy změřených hodnot a vyčtené informace o zařízení a jeho poslední zprávě dle nastavení.

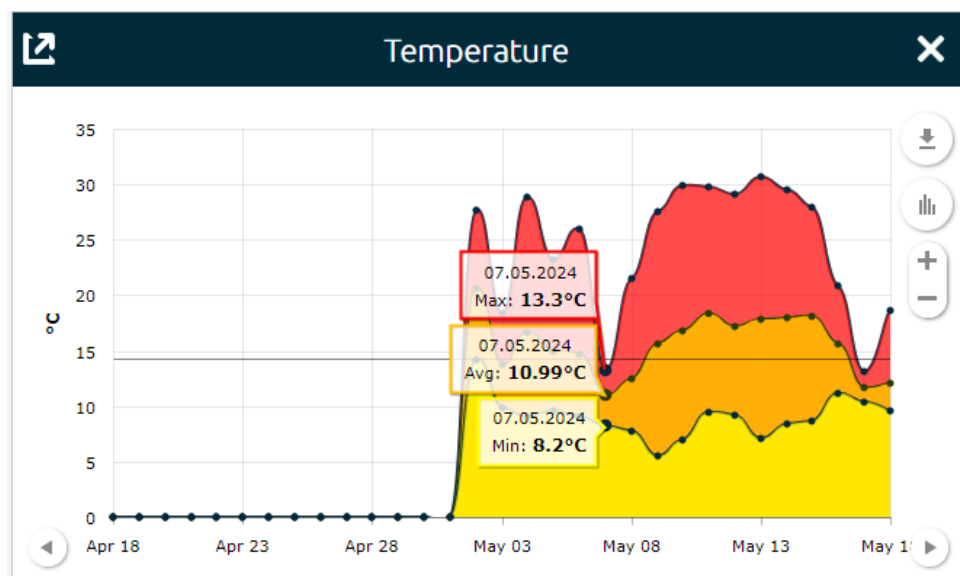
Grafy jsou vykreslené za pomoci amCharts, který usnadňuje práci s jejich vizualizací a případnou úpravou. Grafy mají základně nastavené rozlišení jednoho dne a zobrazují hodnoty maximální, minimální a průměrné rozlišené



Obrázek 2.10: Grafické rozhraní aplikace.

barvami, viz obrázek č. 2.11. Přetažením myši přes oblast, kterou chceme zobrazit, si zobrazíme detailnější data v daném intervalu. Podle zvolené oblasti se zvolí i rozlišení, a to od velikosti 1 dne po interval mezi přijatými zprávami, tedy nejmenší možné. Hodnoty maximálních, minimálních a průměrných hodnot se poté přepočítají za daný časový úsek dle rozlišení. Tato data pak lze snadno exportovat do formátů JPG, PNG, SVG či PDF.

Jediný problém, který jsem nedokázal vyřešit, byla vizualizace úhrnu srážek. Údaj o srážkách by totiž měl být uváděn v denním, měsíčním nebo ročním úhrnu, viz sekce 1.5.3. Jelikož je zařízení umístěné do fungující sítě a databáze, ukázalo se být složité zasahovat do stávající struktury a nepodařilo se vytvořit nový typ grafu. Pro údaj o přesném úhrnu srážek je potřeba přiblížit graf na úroveň jednotlivých měření a úhrn manuálně sečíst. Průměrné hodnoty jsou však stále platné a mají své využití, viz sekce 1.5.



Obrázek 2.11: Přibližný graf teploty s hodnotami.

Kapitola 3

Otestování, výsledky a diskuze k výsledkům

Otestování je nedílnou součástí vývoje prototypu. Je zapotřebí ověřit parametry a funkce, které byly implementovány, a proto se otestováním jednotlivých částí implementace v této kapitole budu zabývat.

3.1 Parametry měření

Zařízení bylo umístěno pod střechou dětské skluzavky, viz obrázek č. 3.1b. To je sice v ideální výšce, pro měření teploty viz sekce 1.5.1, ale zároveň problematické. To především z důvodu absence tepelné izolace mezi zařízením a střechou. Při slunečných dnech dopadají na střechu sluneční paprsky a zahřívají ji na vyšší teplotu, a to včetně prostoru pod ní. To se projeví vyššími maximálními teplotami změřenými v tomto místě. Senzory pro měření větru a srážek jsou umístěny mimo střechu, jak je vidět na obrázku č. 3.1a. Tím pádem by je nemělo nic výrazně ovlivňovat.



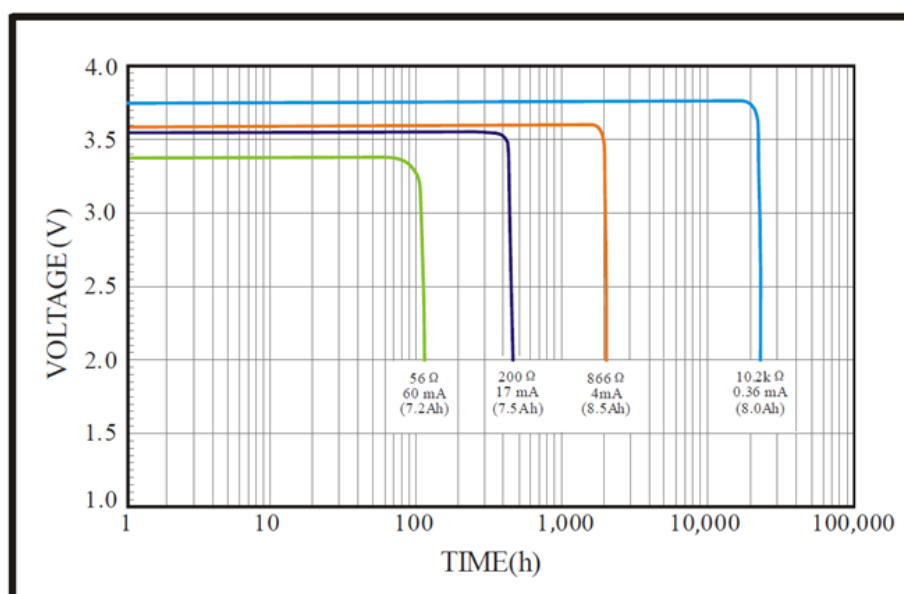
(a) : Senzory větru a srážek

(b) : Fotografie zařízení v provozu

Obrázek 3.1: Fotografie kompletního zapojení v provozu.

Mezi koncovým zařízením a sběrným bodem je vzdálenost přibližně 300 metrů vzdušnou čarou bez jakýchkoliv překážek. To jsou vcelku ideální podmínky pro přenos. A na obrázku č. 2.10 je vidět, že hodnota přijímaného

1. Typical discharge profile at +20 °C (Typical value)



Obrázek 3.2: Závislost životnosti baterie na vybíjecím proudu[30].

signálu dosahuje hodnot kolem -70 dBm, což je velmi dobré v porovnání s maximální citlivostí dosahující až -148 dBm, viz kapitola 2.1.3.

3.2 Spotřeba

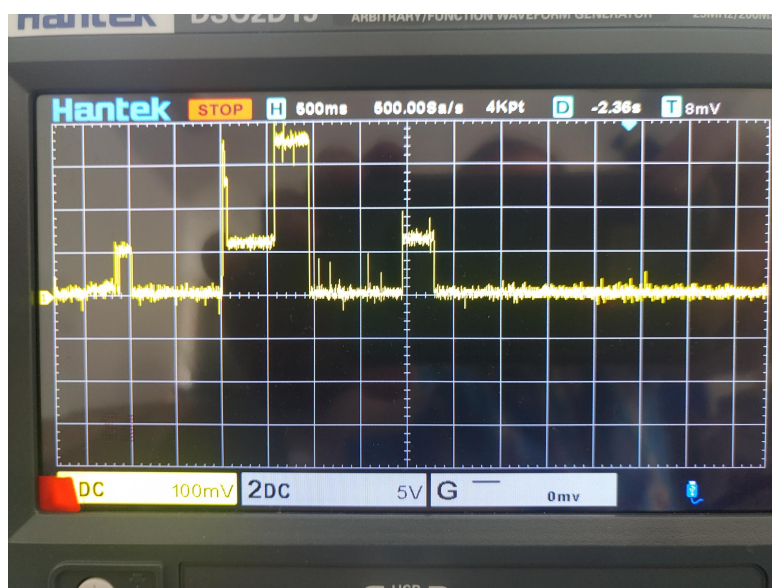
Spotřeba energie je bezpochyby jedním z hlavních parametrů, na které je třeba se zaměřit při vývoji IoT zařízení. V této sekci se budu touto problematikou a jejím řešením hlouběji zabývat.

3.2.1 Faktory ovlivňující spotřebu energie a kapacitu baterie

Spotřeba zařízení je závislá na mnoha faktorech, které lze nastavit, aby aplikaci vyhovovaly co nejlépe. V tomto případě byla zvolena komunikace skrze síť LoRa, která poskytuje dostatečné pokrytí za stále nízké spotřeby při přenosu, viz[36].

i přes vhodnou technologii přenosu bude spotřeba závislá na vzdálenosti a vlastnostech prostředí mezi bránou a komunikujícím modulem, tedy spotřebou při určitém vysílacím výkonu. Proto je třeba rozmisťovat zařízení a sběrné brány s rozvahou.

Zároveň baterii nevybíjíme konstantním proudem a neprovozujeme zařízení za ideálních teplotních podmínek. Tuto závislost lze vidět na obrázku č.



Obrázek 3.3: Průběh napětí při vysílání zprávy.

3.2. Aby byla závislost na vybíjecím proudu zmírněna, je použit duální systém baterie a superkondenzátoru[37], který nejen zmírňuje vliv již zmíněné závislosti, ale i dle [38] prodlužuje dobu, po kterou je baterie schopná dodávat dostatečné napětí.

3.2.2 Měření spotřeby pomocí osciloskopu

Dle[39] lze s určitou přesností určit stav nabití baterie pomocí vzorce

$$SOC_t = SOC_0 - \frac{1}{Q_0} \int \eta I_{(t)} dt \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

kde SOC_t (*State of Charge*) je současný stav nabití baterie, SOC_0 je stav nabití baterie v počátku, Q_0 označuje jmenovitou hodnotu kapacity baterie určenou výrobcem a η je koeficient účinnosti nabíjení a vybíjení. Dále máme ve vzorci okamžitou hodnotu proudu $I_{(t)}$, kterou integrujeme přes čas t .

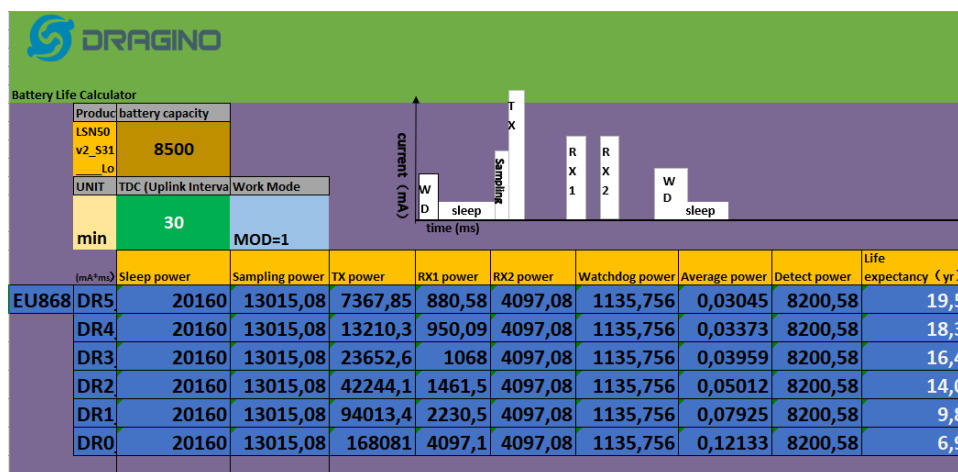
Právě zmíněný integrál vyobrazuje spotřebu energie zařízení, kterou chci spočítat. Samotný průběh proudu změřit nelze, a proto se uchýlím ke standardní metodě měření proudu[40]. A to pomocí průběhu napětí na rezistoru o známé hodnotě, který lze vidět na obr.3.3. Hodnota rezistoru je $4,7 \Omega$ a výpočet integrálu si lze usnadnit rozdělením na lehce integrovatelné segmenty, kde lze považovat napětí za konstantní. Jednotlivé segmenty pak integrujeme podle vzorce

$$Q_i = \int_{t_1}^{t_2} \frac{U_{seg}}{R_{mer}} dt, \quad (3.2)$$

kde Q_i je spotřeba energie i -tého segmentu v Ah (Ampérhodinách), U_{seg} je hodnota napětí segmentu, R_{mer} je odpor použitého rezistoru a t_1, t_2 označují

Tabulka 3.1: Porovnání změřené a odhadnuté životnosti baterie

Mód	Interval odesílání [min]	Životnost (měřená) [rok ^a]	Životnost (odhad) [rok]
Pomalý	30	16	12,4
Normální	10	5,5	6,5
Rychlý	5	2,7	3,8

^akalendářní roky (365dní)**Obrázek 3.4:** Kalkulačka v prostředí Excel pro odhad životnosti baterie[30].

hranice časového úseku segmentu. Po sečtení všech segmentů získám hodnotu 0,03015 mAh na jednu zprávu.

Stálá spotřeba v úsporném módu byla změřena multimetrem s dostatečně malým rozsahem. Naměřenou hodnotu odebíraného proudu $7 \mu\text{A}$ považuji za nulovou, jelikož na celkovou spotřebu nemá výrazný vliv.

Z těchto předpokladů lze vypočítat teoretickou životnost baterie o kapacitě 8500 mAh při různých intervalech odesílání dat, viz tabulka č. 3.1. Dalším nástrojem, který lze použít pro ověření naměřených dat, je kalkulačka životnosti baterie přímo od výrobce Dragino[30]. Zde vycházely hodnoty velmi podobné, viz tabulka č. 3.1. Data v tabulce jsou průměrem z odhadů pro různé rychlosti uvedené v kalkulačce, viz 3.4.

Spočítané hodnoty platí, pokud bychom data posílali se stejnou četností. V sekci 2.2 byl popsán algoritmus, který tento interval prodlužuje v závislosti na užitečnosti dat. Délka intervalu může být 5-15 minut. Pro určení počtu ušetřených zpráv vůči statickým hodnotám intervalu byla využita funkce aplikační serveru pro zobrazení zpráv, viz sekce 2.3. Zobrazené zprávy byly omezeny časovým úsekem od 3.5.-17.5, tedy dobu 14 dní. Za tento časový úsek bylo celkem přijato 2292 zpráv. Porovnání se statickými intervaly lze

Tabulka 3.2: Porovnání počtu zpráv dle intervalů.

Interval	5 minut	10 minut	proměnný
Počet zpráv	4032	2016	2292
Počet uspořenéých zpráv	1740	-276	-

vidět v tabulce č. 3.2. Tam lze vidět, že počet uspořenéých zpráv je 1740 oproti intervalu 5 minut a oproti 10 minutám 276 zpráv přibylo. Přidaná data jsou však v oblasti výrazných změn, a zlepšují tak přesnost oproti intervalu 10 minut.

3.3 Cenová kalkulace

Jedním z parametrů je i cena koncového zařízení, která by měla být nižší než ceny současných komerčně dostupných řešení. V této sekci bude provedena cenová kalkulace pro výrobu jednoho zařízení a poté výrobu více kusů v rádech nižších desítek pro menší projekt, viz tabulka č. 3.3. Ceny v tabulce jsou uvedené bez DPH.

Hlavními položkami jsou samotné Dragino a sada senzorů. Firma Dragino nám poskytla ceny pro dodání více zařízení. Sady senzorů jsou za stejnou cenu a stejně jako většina ze součástí pochází z firmy Hadex[41]. Mezi pasivní součástky patří rezistory a kondenzátory, které jsou použity pro úpravu signálů. Další položkou jsou spojovací materiály. Ta obsahuje UTP (*unshielded twisted pair*) kabel, univerzální desku plošných spojů, telefonní zásuvku s konektory a pájku na zapájení součástí.

Tabulka 3.3: Souhrn cenové kalkulace (ceny bez DPH).

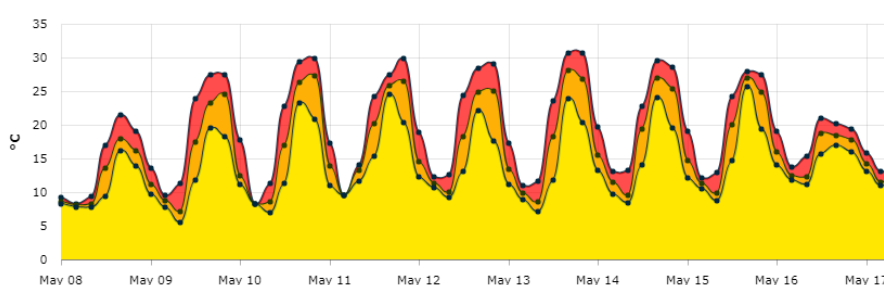
Položka	1 zařízení	více zařízení
Dragino LSN50	1800 Kč	1165 Kč
Sada senzorů	850 Kč	850 Kč
Pasivní součástky	11 Kč	2 Kč
Spojovací materiál	129Kč	120 Kč
Celková cena	2790 Kč	2137 Kč

Pro porovnání se současným trhem meteostanic jsem si zvolil meteostanici GARNI 975 komunikující skrze WiFi, která nabízí měření stejných charakteristik, viz [42]. Většina domácích meteostanic obsahuje zařízení navíc, které data ze senzorů přijímá a směruje dále ke zpracování na cloudové úložiště. Plní tedy funkci sběrného bodu pro jedno zařízení. Tuto meteostanici si lze zakoupit za 2873 Kč bez DPH[42]. Cena za jeden kus se příliš neliší, ale při výrobě více kusů cena výrazně klesá. Zároveň je třeba připomenout, že se zcela neshodují jejich cílová použití. Spojit data více domácích stanic dohromady může být problematické. A jejich montáž mimo domácnost je v podstatě ne-

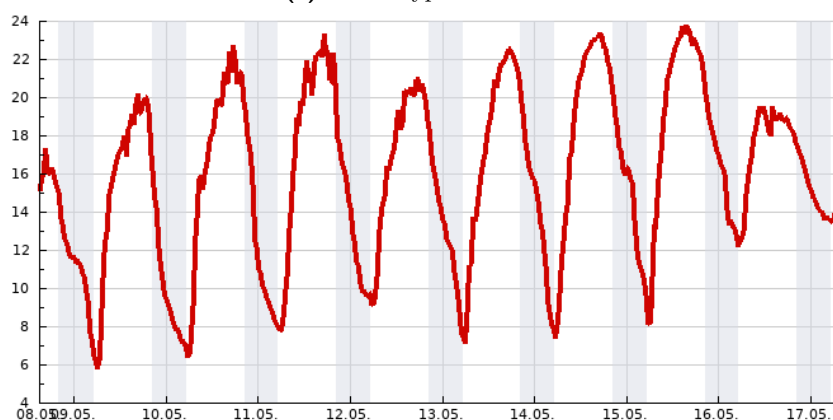
možná, kvůli malému dosahu technologie WiFi a nutnosti napájení, viz sekce 1.1. Naproti tomu prototyp s komunikací skrze síť LoRa tento problém nemá, a je vyvíjen se záměrem na spolupráci více zařízení a určité škálovatelnosti.

3.4 Porovnání hodnot

Pro porovnání a ověření naměřených hodnot jsem si vybral veřejně dostupnou amatérskou meteostanicí Garni 2055 Arcus ve městě Slaný dostupnou z [43]. A to z důvodu absence archivních dat z meteostanic Českého meteorologického ústavu v blízkosti umístění testované meteostanice. Grafy meteostanice jsou týdenními průběhy veličin od 8.5. - 17.5. 2024 a jsou dostupné z [43].



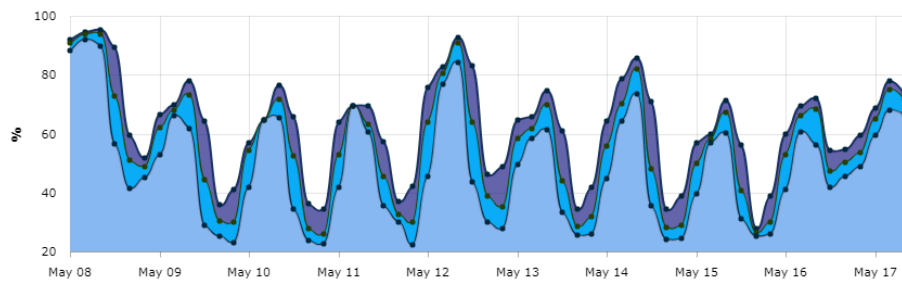
(a) : Prototyp meteostanice



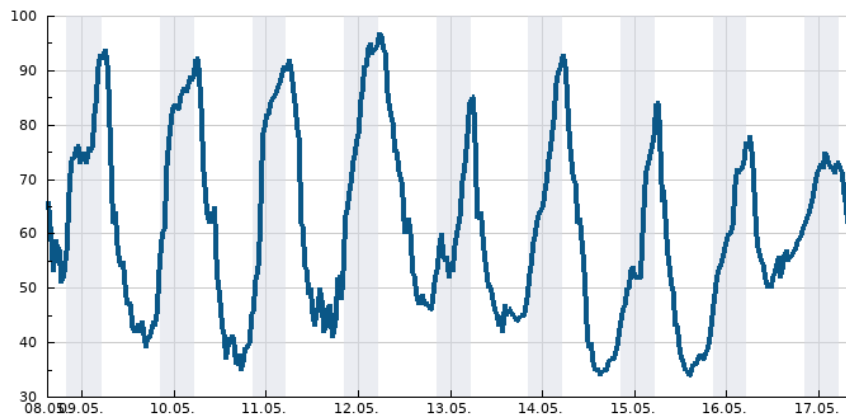
(b) : Komerčně dostupná meteostanice

Obrázek 3.5: Grafy teplotních charakteristik.

Na obrázku č. 3.5 je vidět teplotní charakteristiky. Lze sledovat určitou korelaci dat, která by měla být vzhledem k vzdálenosti namístě. Nicméně z důvodů popsaných v sekci 3.1 dosahuje při slunečných dnech o 3 až 5 stupňů výše, než by měla být. Při další implementaci by bylo vhodné zařízení se senzory teploty umístit na vhodnější místo. Nejvhodnějším řešením by bylo uzavřít zařízení do radiačního štítu, aby při montáži nevznikala omezení výběrem vhodného místa.



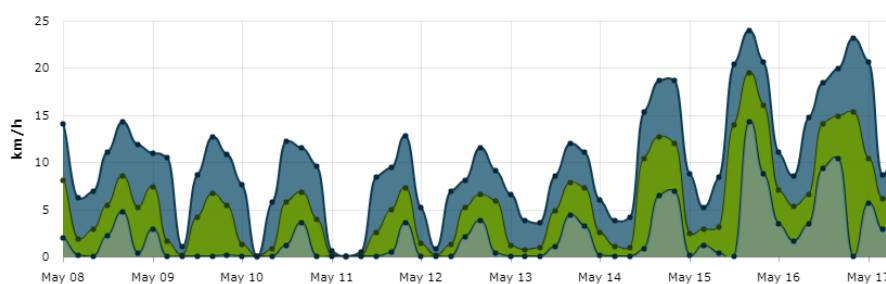
(a) : Prototyp meteostanice



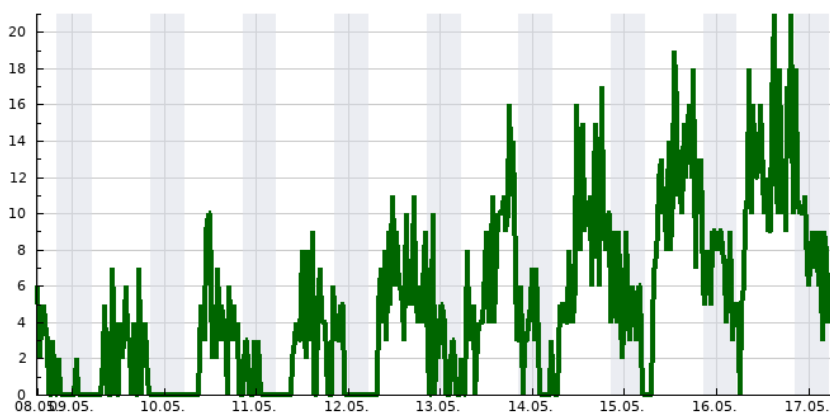
(b) : Komerčně dostupná meteostanice

Obrázek 3.6: Grafy relativní vlhkosti.

Na obrázku č. 3.6 je vidět, že grafy vlhkosti jsou si také podobné, ale už v předchozím případě bylo vidět, že rozlišení, s kterým je obrázek vykreslen je výrazně menší než v případě testované meteostanice. Proto jsou zde změny hodnot strmější, k čemuž přispívá také vyšší vertikální osa. Nicméně v tomto případě hodnoty nebyly příliš ovlivněny nevhodným umístěním.



(a) : Prototyp meteostanice

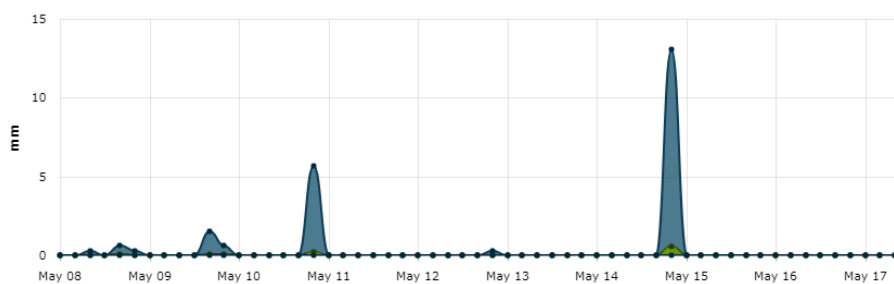


(b) : Komerčně dostupná meteostanice

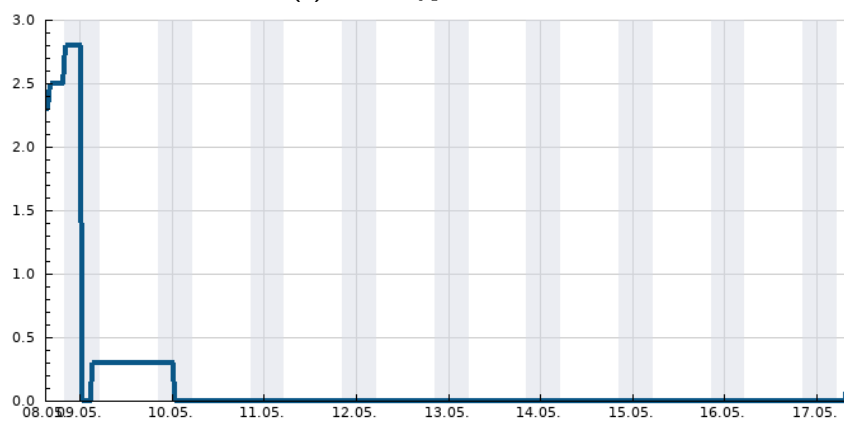
Obrázek 3.7: Grafy síly větru.

Na obrázku č. 3.7 jsou vidět grafy rychlosti větru. V tomto případě meteostanice měří pouze průměrnou rychlost za 5 minut. V současné verzi není firmware uzpůsoben k měření rychlosti nárazových větrů, viz sekce 1.5.4. Grafy průměrných rychlostí spolu opět korelují a hodnoty jsou víceméně stejné, což se u rychlosti větru dá považovat za normální odchylku, pokud měříme na 20 km vzdálených místech.

Na obrázku č. 3.8 lze vidět, jak se grafy týkající se srážek výrazně liší. To samozřejmě může být způsobeno i vzdáleností mezi stanicemi, ale především jinými daty, která zobrazují. V modré barvě na obrázku 3.8a je zobrazena maximální naměřená hodnota během 5 minut. Je zde vidět i zelenou barvou naznačená průměrná hodnota během jednoho dne. Zatímco na obrázku druhém je vyobrazen průběh úhrnu. Zde tedy grafy nesedí a je zapotřebí udělat test vůči senzoru, který je na stejném místě. Lze si také povšimnout výkyvu 15.5., kde je hodnota příliš vysoká a během dne dle záznamů vůbec nepršelo. Označujeme ji tedy za chybu měření.



(a) : Prototyp meteostanice



(b) : Komerčně dostupná meteostanice

Obrázek 3.8: Grafy srážek.



Závěr

Cílem práce bylo navrhnout prototyp meteostanice komunikující skrze síť LoRa měřící veličiny, jako jsou teplota, vlhkost, směr a síla větru a množství srážek. Výstupem je funkční zařízení s aplikací, na jejichž základech bude v budoucnosti vyvinuto zařízení určené do komerčního prostoru.

V práci byla popsána řada rozhodovacích parametrů potřebná k výběru správných stavebních bloků k naší aplikaci a jejich ověření. Z naměřených hodnot spotřeby potvrzených přibližně stejnými hodnotami od výrobce lze usoudit, že pro aplikaci bylo vybráno správně.

Zjistili jsme, že životnost baterie silně závisí na četnosti odesílaných zpráv, a proto je vhodné jej softwarově ovládat v závislosti na intenzitě změn, a tudíž nutnosti aktualizovat změřená data. To se zde podařilo implementovat a z naměřených zpráv během 14 dní se ušetřilo 1407 zpráv oproti statickému intervalu se stejným rozlišením. Tudíž se podařilo značně zmírnit spotřebu energie a prodloužit životnost zařízení.

Za nejnütnější rozšíření do budoucna považuji doplnění o radiační štít, aby měření teploty nebylo závislé na slunečním svitu. Dále pak doplnění vizualizace úhrnu srážek do aplikace. V pozdějších verzích by bylo možné přidat další senzory pro měření veličin, jako je intenzita slunečního záření, atmosférický tlak nebo jiné. Lze se také v budoucnu zaměřit na spolupráci více zařízení a pomocí numerických modelů jejich data využít pro výzkum počasí a klimatu.



Literatura

- [1] ZANAJ, Eljona, Giuseppe CASO, Luca DE NARDIS, Alireza MOHAMMADPOUR, Özgü ALAY a Maria-Gabriella DI BENEDETTO. *Energy Efficiency in Short and Wide-Area IoT Technologies—A Survey*. Technologies [online]. 2021, 9(1) [cit. 2024-05-11]. ISSN 2227-7080. Dostupné z: doi:10.3390/technologies9010022
- [2] MEKKI, Kais, Eddy BAJIC, Frédéric CHAXEL a Fernand MEYER. *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment*. ICT Express. 2019/03/01, 5(1), 1-7. Dostupné z: doi:10.1016/j.ict.2017.12.005
- [3] *IoT Connectivity: Connecting the Internet of Things with VSAT Networks*. FasterCapital [online]. 2024 [cit. 2024-05-11]. Dostupné z: <https://fastercapital.com/content/IoT-Connectivity-Connecting-the-Internet-of-Things-with-VSAT-Networks.html>
- [4] ONUMANYI, Adeiza J., Adnan M. ABU-MAHFOUZ a Gerhard P. HANCKE. *Low Power Wide Area Network, Cognitive Radio and the Internet of Things: Potentials for Integration: Potentials for Integration*. Sensors [online]. 2020, 20(23) [cit. 2024-04-23]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20236837
- [5] *The Past, Present, and Future of LPWAN*. In: Link Labs [online]. 2017 [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.link-labs.com/blog/past-present-future-lpwan>
- [6] Sigfox. *Home - Sigfox 0G Technology* [online]. 2024 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.sigfox.com/>
- [7] *LPWAN connections by technology - WorldWide*, 2019-2028 [online]. In: . [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://omdia.tech.informa.com/pr/2023/apr/omdia-lpwan-iot-connections-to-grow-23-cagr-from-2022-to-2028-driven-by-growth-in-nb-iot-and-lorawan-technologies>

- [8] *Tarify pro IoT zařízení - Vodafone*. Vodafone [online]. 2024 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/podnikatele/internet-veci/iot-easy-connect/>
- [9] BANTI, Konstantina, Ioanna KARAMPELIA, Thomas DIMAKIS, Alexandros-Apostolos BOULOGEORGOS, Thomas KYRIAKIDIS a Malamati LOUTA. *LoRaWAN Communication Protocols: A Comprehensive Survey under an Energy Efficiency Perspective: A Comprehensive Survey under an Energy Efficiency Perspective*. Telecom. 2022/05/25, 3, 322-357. Dostupné z: doi:10.3390/telecom3020018
- [10] *What is LoRaWAN® Specification* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
- [11] LORA ALLIANCE. *LoRaWAN Specification 1.1* [online]. 2017 [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-1>
- [12] KÜHNEL, Claus. *Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes*. 1. Elektor Verlag, 2022. ISBN 9781484243565.
- [13] *LoRaWAN standard Approved by ITU-T*. IEEE Communications Society - IEEE ComSoc [online]. 2021 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.comsoc.org/node/18836>
- [14] SEMTECH. *LoRa Alliance Ecosystem* [online]. 2024 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.semtech.com/lora/ecosystem/lora-alliance>
- [15] BUURMAN, Ben, Joarder KAMRUZZAMAN, Gour KARMAKAR a Syed ISLAM. *Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges*. IEEE Access. 2020/01/20, PP, 1-1. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2020.2968057
- [16] MEHIC, Miralem, Mugdim DULIMAN, Nejra SELIMOVIC a Miroslav VOZNAK. *LoRaWAN End Nodes: Security and Energy Efficiency Analysis: Security and Energy Efficiency Analysis*. Alexandria Engineering Journal. 2022, 61(11), 8997-9009. ISSN 1110-0168. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.035>
- [17] *Door sensor for substation and building monitoring*. In: WithTheGrid [online]. 2023 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://withthegrid.com/door-sensor-for-substation-and-building-monitoring/>
- [18] *Devices / Device Repository for LoRaWAN*. The Things Network [online]. 2024 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/device-repository/>

- [19] CHEN, Edwin. DRAGINO. LSN50 and LSN50-V2 - LoRaWAN Sensor Node User Manual [online]. 2022 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20LoRaWAN%20End%20Nodes/LSN50%20%26%20LSN50-V2%20%20LoRaWAN%20Sensor%20Node%20User%20Manual/>
- [20] RAUTENHAUS, M., M. BÖTTINGER, S. SIEMEN, R. HOFFMAN, R. M. KIRBY, M. MIRZARGAR, N. RÖBER a R. WESTERMANN. *Visualization in Meteorology—A Survey of Techniques and Tools for Data Analysis Tasks*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2018, 24(12), 3268-3296. ISSN 1941-0506. Dostupné z: doi:10.1109/TVCG.2017.277950
- [21] Portál ČHMÚ *Aktuální situace : Aktuální stav počasí : Česká republika : Stanice : Grafy automatických stanic* . Portál ČHMÚ [online]. 2024 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/grafy-automatickych-stanic>
- [22] *Meteorologické prvky a jejich klimatologické charakteristiky*. RUDA, Aleš. MASARYKOVA UNIVERZITA. Klimatologie a hydrogeografie pro učitele [online]. 2014 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/03-prvky.html
- [23] SUOMI, Irene a Timo VIHMA. *Wind Gust Measurement Techniques—From Traditional Anemometry to New Possibilities*. Sensors [online]. 2018, 18(4) [cit. 2024-05-02]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s18041300
- [24] *Vlhkoměry - digitální, mechanické či kapalinové*. Specialista na měřící techniku | METEOshop.cz [online]. c2004-2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.meteoshop.cz/katalog/vlhkomery/2/>
- [25] TME. *SHT-SERIES HUMIDITY SENSORS. Electronic components*. Distributor, online shop – Transfer Multisort Elektronik [online]. 2021, 2021 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.tme.com/in/en/news/about-product/page/43548/sht-series-humidity-sensors/>
- [26] LODR, Jakub. *Měření útlumových charakteristik síťových filtrů*. Plzeň, 2021. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [27] *STM32L072CZ - Ultra-low-power Arm Cortex-M0+ MCU with 192-Kbytes of Flash memory, 32 MHz CPU, USB - STMicroelectronics*. ST Microelectronics [online]. 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l072cz.htm>
- [28] *REPLACEMENT BATTERY ER26500 + SPC1520 8500MA 3.6VOLT LISOCL2 FOR DRAGINO SENSORS*. IoT Store [online]. 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.iot-store.com.au/products/replacement-battery-er26500-spc1520-dragino>

- [29] *LoRa Connect Transceiver, SX1278, 137MHz to 525MHz*. Semtech [online]. 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lorac-connect/sx1278#applications>
- [30] CHEN, Edwin. *DRAGINO. Dragino Wiki*. [online]. [cit. 2023 12-20]. Dostupné z: <http://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/How%20to%20calculate%20the%20battery%20life%20of%20Dragino%20sensors%3F/>
- [31] KOVÁČ, Pavel. *Zatím nepřekonaná výdrž – Li-SoCl₂ baterie od EVE*. Elektronické součástky a komponenty | SOS electronic eshop [online]. 2018, 2018 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: https://www.soselectronic.com/cz/articles/eve-energy/zatim-neprekonana-vydrz-li-socl2-baterie-od-eve-2204?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwgJyyBhCGARIsAK8LVLMEGC92gtamm86RvQN8cyNZWMMZky5PkLVxwdwj4UIx4Rv7bGYcuUaAqX1EALw_wcB
- [32] *Outdoor LoRaWAN® Gateway | Milesight*. Milesight [online]. 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.milesight.com/iot/product/lorawan-gateway/ug67>
- [33] *LoRaWAN Architecture*. THE THINGS INDUSTRIES. The Things Network [online]. 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>
- [34] *STM32CubeIDE - Integrated Development Environment for STM32 - STMicroelectronics*. STMicroelectronics [online]. c2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
- [35] *Interpolace*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024, 2001-2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Interpolace>
- [36] *How to Optimize Power Consumption of IoT Devices* Farnell [online]. 2022 [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: https://ie.farnell.com/how-to-optimize-power-consumption-of-iot-devices?ICID=I-CT-TECH-RES-CLL-FEB_22-TC-0000516
- [37] MATHIS, Tyler S., Narendra KURRA, Xuehang WANG, David PINTO, Patrice SIMON a Yury GOGOTSI. *Energy Storage Data Reporting in Perspective—Guidelines for Interpreting the Performance of Electrochemical Energy Storage Systems*. Advanced Energy Materials. John Wiley, 2019/10/01, 9(39), 1902007. ISSN 1614-6832. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1002/aenm.201902007](https://doi.org/10.1002/aenm.201902007)
- [38] BATHRE, Mukesh a Pradipta KUMAR DAS. *Smart dual battery management system for expanding lifespan of wireless sensor node*. In:

- International Journal of Communication Systems - Volume 36. 3. John Wiley, 2023, s. 40-41. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/dac.5389>
- [39] ZHANG, Xin, Wang ZEKUN, Zekun WANG a Yueqiu JIANG. *Study of SOC estimation by the Ampere-hour integral method with capacity correction based on LSTM*. Batteries [online]. 2022, 8(10), 170 [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/batteries8100170>
- [40] BECKL, Robert. *Metodika elektrotechnických měření pro učební obor elektrikář - silnoproud*. Praha, 2018. Disertační práce. Czech Technical University in Prague.
- [41] HADEx , spol. s r.o. [online]. c2011-2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/>
- [42] *Wi-Fi meteorologická stanice GARNI 975*. Garni Technology [online]. c1994-2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.garni-meteo.cz/wi-fi-meteorologicka-stanice-garni-975.html>
- [43] *Meteostanice - Slaný, aktuální teplota, vítr, tlak, srážky / In-počasi*. In-počasi [online]. c2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.in-pocasi.cz/aktualni-pocasi/slany/?detailed_typ=teplota&detailed_usek=210#daily_graph