VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

LOKALIZACE OBJEKTŮ V BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKAČNÍ SÍTI NA BÁZI WIFI

LOCATION ESTIMATION OF OBJECTS IN WIFI COMMUNICATION NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. JAN KOHOUTEK**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. VÁCLAV ŠIMEK**
SUPERVISOR

BRNO 2019

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta informačních technologií

Ústav počítačových systémů (UPSY) Akademický rok 2018/2019

Zadání diplomové práce

Student: **Kohoutek Jan, Bc.**
Program: Informační technologie Obor: Počítačové a vestavěné systémy
Název: **Lokalizace objektů v bezdrátové komunikační síti na bázi WiFi**
Location Estimation of Objects in WiFi Communication Network
Kategorie: Vestavěné systémy

Zadání:

1. Prostudujte a připravte přehledovou studii základních principů lokalizace zařízení v bezdrátové síti WiFi.
2. Zvolte vhodnou techniku a navrhněte detailní koncepci systému pro určování polohy objektů v interiéru v komunikační síti na bázi WiFi.
3. Vyberte vhodné komponenty a v návrhovém systému připravte schéma zapojení lokalizačních modulů.
4. Realizujte desky plošných spojů lokalizačních modulů v potřebném množství s ohledem na zvolenou techniku lokalizace.
5. Implementujte potřebný komunikační firmware modulů a vytvořte jednoduché komunikační rozhraní pro správu a monitorování činnosti lokalizačního systému.
6. Proveďte důkladné otestování vámi navrženého systému v reálných podmínkách.
7. Zhodnoťte dosažené výsledky a diskutujte možnosti dalšího rozšíření.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Splnění bodů 1 až 4 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/

Vedoucí práce: **Šimek Václav, Ing.**
Vedoucí ústavu: Sekanina Lukáš, prof. Ing., Ph.D.
Datum zadání: 1. listopadu 2018
Datum odevzdání: 22. května 2019
Datum schválení: 31. října 2018

Abstrakt

Tato práce si klade za cíl návrh a implementaci systému pro lokalizaci zařízení v bezdrátové síti Wi-Fi, v prostorách interiéru malé, či střední firmy. Zabývá se používanými technologiemi a poskytuje vlastní řešení senzorové sítě a centrálního zpracovatelského uzlu. V závěru uvádí dosažené výsledky a zhodnocuje splnění zadaných požadavků.

Abstract

The purpose of the thesis is to design and physically implement a system for location of devices in a Wi-Fi based networks deployed in the interior of small and medium-sized enterprises. First of all, the attention is given to the survey of commonly available technologies suitable for determination of the object position. Then, based on these findings, architecture of a location system comprising an array of sensor nodes and central processing unit is proposed. In conclusion, the results are presented and the fulfillment of the requirements is evaluated.

Klíčová slova

Wi-Fi, lokalizace, bezdrátová síť, interiér

Keywords

Wi-FI, localization, wireless network, interior

Citace

KOHOUTEK, Jan. *Lokalizace objektů v bezdrátové komunikační síti na bázi WiFi.* Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Václav Šimek

Lokalizace objektů v bezdrátové komunikační síti na bázi WiFi

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Václava Šimka a že jsem uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Jan Kohoutek
22. května 2019

Poděkování

Rád bych využil této části a poděkoval svému lektorovi, panu Ing. Václavu Šimkovi, za jeho přínosné postřehy, rady, spolupráci a trpělivost. Dále bych rád také poděkoval panu Ing. Milanu Doubkovi, který byl ochotný vypsat firemní zadání a dále řídit průběh práce.

Obsah

1 Úvod **3**

2 Teorie lokalizace subjektů **5**
2.1 Obecné principy lokalizace 6
2.1.1 Trilaterace 6
2.1.2 Triangulace 7
2.1.3 Fingerprinting 7
2.2 Techniky lokalizace využívané v bezdrátových sítích 7
2.2.1 RSS - síla signálu 8
2.2.2 TOA - čas doručení 9
2.2.3 AOA - úhel dopadu signálu 9
2.3 Vylepšené techniky se zaměřením na Wi-Fi síť 10
2.3.1 OFDM 10
2.3.2 CSI 11
2.3.3 Existující lokalizační CSI systémy a jejich vlastnosti 12

3 Návrh lokalizačního systému **17**
3.1 Specifikace požadavků 17
3.2 Návrh architektury systému 18

4 Realizace systému **21**
4.1 Systém jako celek a jeho použití 21
4.2 Detaily součástí systému 22
4.2.1 Centrální serverová instance 22
4.2.2 Bezdrátový senzor v roli přístupového bodu 26
4.2.3 Aktivní přispění lokalizovaného zařízení 30

5 Testování **32**
5.1 Faktory ovlivňující přesnost 32
5.2 Naměřené výsledky 33
5.3 Zhodnocení výsledků 35

6 Závěr **37**

Literatura **38**

A Obsah paměťového média **41**

B Příklad API příkazů **43**

C Lokalizační modul **45**
C.1 Foto vytvořeného prototypu 45
C.2 Model desky tištěného spoje 47
C.3 Schéma obvodu přístupového bodu 49
C.3.1 Napájení obvodu 49
C.3.2 Ethernet 49
C.3.3 Mini PCIe konektor 51
C.3.4 USB konektor 52
C.3.5 Reset tlačítko 53
C.3.6 Konektory pro připojení procesorového modulu 54

Kapitola 1

Úvod

Lokalizace zařízení a předmětů uvnitř budov je již dlouhou dobu v hledáčku výzkumných skupin po celém světě. Geografickou navigaci lidstvo úspěšně využívá již řadu let, pomocí satelitních systémů jako je GPS, GLONASS, nebo připravovaný Galileo. Ve venkovním otevřeném prostředí jsou tyto systémy běžnou součástí našich životů. Bohužel v prostředí interiérů budov selhávají a jejich použitelnost je výrazně omezena. Hledá se proto spolehlivý zástupce využitelný v hustých urbanizovaných oblastech, velkých interiérových komplexech a halách i v menších, například kancelářských prostorách.

Žhavým kandidátem pro tuto pozici se stávají lokální bezdrátové sítě, díky jejich hromadnému nasazování a rozšiřování. Prim v této oblasti hraje IEEE institut, se svými standardy pro sítě jako Bluetooth, ZigBee, nebo UWB. Nicméně do popředí se dostává zejména jejich technologie Wi-Fi. Její masivní využití hlavně v hustě obydlených oblastech a zavádění v interiérech všeho typu z ní dělá slibnou možnost doplnění geografických satelitních systémů tam, kde jejich spolehlivost selhává.

Lokalizace uvnitř budov nachází velice široké uplatnění. Například složky záchranného sboru mohou snáze a rychleji zjistit pozici zásahu. Umožní lepší orientaci na letištích, v nádražních halách, nebo obchodních centrech. Může sloužit pro navigaci robotů ve výrobních prostorech, nebo sledování pacientů v nemocničních zařízeních.

Cíl této práce je ovšem ve skromnějším měřítku. Úkolem je navrhnout systém, který umožní lokalizovat Wi-Fi zařízení v interiérech kancelářských prostor v malé, nebo střední firmě. Hlavními požadavky na systém jsou nízká cena, využití pouze Wi-Fi (bez dalších senzorů, nebo sítí) a pokud možno, tak "pasivní" sledování. Tedy tak, aby na cílovém lokalizovaném zařízení nemusel být instalován a spuštěn žádný software navíc. Posledním požadavkem je potom snadná škálovatelnost, aby při změně prostor, šlo snadno lokalizační síť rozšířit. Má tedy vzniknout systém s možností sledování, ve které místnosti, či její části, se nachází, nebo nacházelo hledané zařízení.

Práce nejprve uvádí teoretický souhrn dnes využívaných lokalizačních prostředků v terestriálních sítích. V kapitole 2 jsou shrnuty principy lokalizace obecně, následované popisem využívaných technik v sítích Wi-Fi. Dále kapitola tyto techniky rozvádí v části věnované metodám, jež vylepšují lokalizaci pomocí dostupných prostředků z novějších standardů Wi-Fi.

Kapitola 3 potom popisuje návrh systému. Jeho architekturu vycházející ze senzorových modulů, tvořících bezdrátovou lokalizační síť a centrální logickou část, která zodpovídá za zpracování dat, ukládání a jejich vizualizaci, nebo konfiguraci senzorové sítě.

Následující kapitola 4 uvádí realizaci systému. Jsou rozebrány jednotlivé části architektury a to z pohledu hardware i implementace software. Také je zhodnocen systém jako celek a uvažovaný způsob použití, respektive nasazení do provozu.

V poslední části 5 jsou shrnuty testy a jejich výsledky v reálném prostředí menší vývojářské firmy. Součástí je i úvaha nad naměřenými hodnotami a nastíněny některé možnosti vylepšení, nebo směřování projektu.

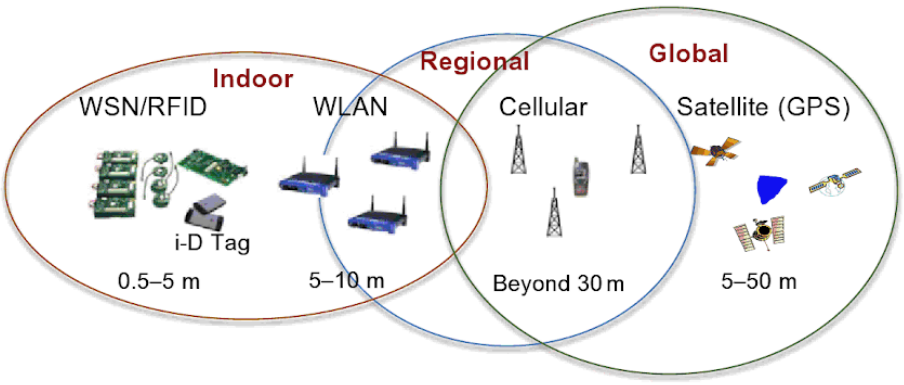
Kapitola 2

Teorie lokalizace subjektů

Nedílnou součástí našich životů dneška, je určení polohy. Ať už pro potřeby navigace dle trasy k danému cíli, pro orientaci v prostoru, nebo pro nalezení vzdáleného zařízení. Lokalizace se obecně dělí na dva druhy a to **vzdálenou lokalizaci**, kdy centrální jednotka určuje polohu hledaného subjektu (vyhledání mobilního telefonu v buňkové síti GSM) a **sebe-lokalizaci**. V tomto případě sám lokalizovaný objekt určuje svoji polohu (GPS).

Lokalizace se provádí v bezdrátových rádiových sítích (v drátových postrádá smyslu) a ty lze dle [4] rozdělit na dvě majoritní skupiny. Podrobnější dělení pak znázorňuje obrázek 2.1.

- **Globální** - spoléhající na satelity obíhající v přesně daných a známých drahách kolem planety. Jsou od počátku vytvářeno právě pro účel lokalizace a fungují na principu vzdálené lokalizace. Zástupci v době psaní tohoto textu jsou především americké GPS, ruský GLONASS, čínský BeiDou a několik dalších. Evropská unie také připravuje svůj systém nazvaný Galileo.
- **Terestriální** - pozemské bezdrátové sítě mají tu nevýhodu, že většinou byly vyvíjeny pro jiný, než navigační účel. I když vznikají výjimky, díky již zavedeným technologiím (Wi-Fi, Bluetooth), které jsou velmi rozšířené, vzniká potřeba doplnit funkcionalitu těchto sítí právě o lokalizační možnosti.



Obrázek 2.1: Rozdělení lokalizačních systémů. Převzato ze [4]

Podle zadání má náš vyvíjený systém pracovat v bezdrátové síti Wi-Fi, což je obchodní označení standardů rodiny *IEEE 802.11*, které spravuje společnost *Wi-Fi Alliance* [18].

V kontextu Wi-Fi se o lokalizaci a navigaci hovoří už řadu let. Funkcionalita samotné Wi-Fi prozatím není lokalizaci příliš nakloněna a ve standardech se s ní nepočítalo. Až nově vyvíjený standard *IEEE 802.11az* má přinést přesnější určování pozice i úspornější provoz pro podporu senzorových lokalizačních sítí. Nicméně dokončení se očekává až za několik let, jak uvádí [15]. Pro naše potřeby tedy musí vystačit využívané techniky lokalizace uvedené v dalších částech práce.

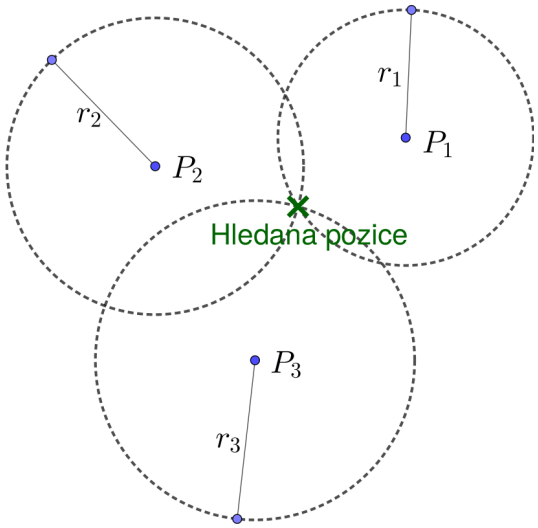
2.1 Obecné principy lokalizace

Pro lokalizaci jednoho subjektu v lokální oblasti lze využít praktiky geometrie, využívané například v geodézii. Nalezení bodu v prostoru vyžaduje několik pevných bodů, od nichž můžeme určit vzdálenost hledaného bodu, nebo relativní úhel (směr) ke hledanému bodu. Lze také průzkumem lokalizační oblasti sestavit množinu možných pozic a z ní poté vybírat nejbližší vhodnou.

Všechny následující postupy jsou ovšem zatíženy chybami. Pokud v převodu z reality do matematického (geometrického) modelu vzniknou nepřesnosti, nebude odpovídat konfigurace pevných bodů a výsledky měření budou nepřesné. Další problém potom vzniká měřícími chybami jednotlivých technik zjišťování vzdálenosti, či úhlu. Vliv tohoto problému lze minimalizovat pomoci vylepšení, z nichž některé jsou uvedeny v další části práce (2.3). [16] [4]

2.1.1 Trilaterace

První z principů k určení pozice využívá zmíněnou vzdálenost od kotev (pevných bodů). Pro přesné určení pozice ve 2D prostoru jsou nutné minimálně tři takové pevné body. Proto název trilaterace. Techniky, jak v bezdrátových sítích získat vzdálenost, jsou uvedeny v sekci 2.2. Principem trilaterace je pomocí vzdálenosti od kotvy určit poloměr kružnice, na které hledané zařízení leží. Pokud takto vzniknou kružnice z každého ze tří pevných bodů, průsečík těchto kružnic je právě hledaná pozice. Znázorněno je to na obrázku 2.2, kde P_x jsou souřadnice pevných bodů a r_x poloměry kružnic, odpovídající vzdálenosti kotvy a hledaného zařízení.

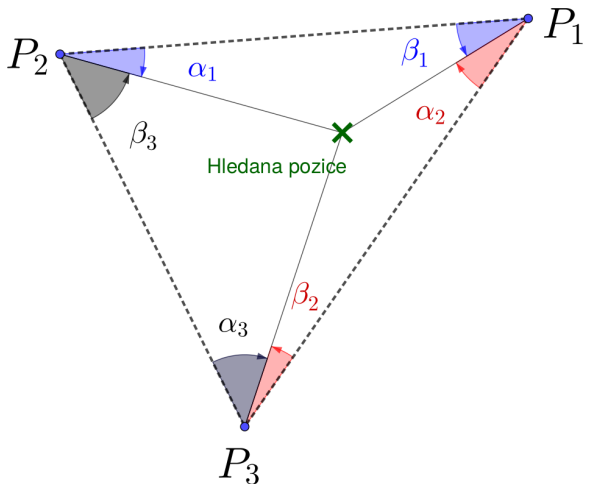


Obrázek 2.2: Princip trilaterace

Existují poměrně jednoduché a rychlé algoritmy, jak spočítat průsečík tří kružnic. Problém ale tkví v přesném určení vzdálenosti a toho, jak bude popsáno v následujících kapitolách, není snadné v bezdrátových sítích založených na Wi-Fi dosáhnout.

2.1.2 Triangulace

Jak název napovídá, druhý princip využívá metody měření úhlů. Díky tomu, že známe pozice kotev, můžeme určit směr ke hledané pozici. Mezi každými dvěma pevnými body se vytvoří základna trojúhelníku a od ní se dají určit úhly ke hledanému zařízení. Pricip tohoto postupu dobře znázorňuje obrázek 2.3.



Obrázek 2.3: Příklad triangulace. P_x jsou pevné body, α_x a β_x potom úhly ke hledané pozici.

2.1.3 Fingerprinting

Název tohoto principu by se dal do českého jazyka přeložit jako „snímání a porovnávání otisků“ a podle toho také pracuje. Je založený na vytvoření co nejširší databáze měření, pokud možno v každém bodě zájmového prostředí. A to ještě před samotným provozem lokalizace, jak uvádí [3]. Tato databáze je potom použita pro vyhledávání nejbližšího kandidáta ve vztahu s naměřenými hodnotami. Tak je rozhodnuto o přibližně pozici hledaného zařízení.

Postupy a algoritmy použité při vytváření databáze i vyhodnocování lokace se mění napříč různými řešeními. Nicméně trpí stejnými nedostatky. Zejména jde o bezpodmínečnou nutnost vytvoření databáze, nebo složité (popřípadě žádné) možnosti přizpůsobení se dynamickým změnám v lokalizačních prostorách. Nicméně výsledky mohou být uspokojivé.

2.2 Techniky lokalizace využívané v bezdrátových sítích

Pro dosažení určení pozice podle výše zmíněných geometrických postupů a praktik, je potřeba určit vzdálenosti pevných bodů, resp. úhly. Následující techniky jsou často využívané nejen v sítích Wi-Fi, ale i v řadě dalších systémů, včetně satelitních. [16]

2.2.1 RSS - síla signálu

RSS, někdy také RSSI (Received Signal Strength Indication) je jednou ze základních praktik měření vzdálenosti využívané v bezdrátových sítích, nejen ve Wi-Fi. Princip využívá faktu, že vysílaný signál logaritmicky slábne s vysílací vzdáleností. Lze tedy poměrně snadno vypočítat vzdálenost, neboť vysílací výkon je znám. Výhodou je, že měření i vyhodnocení může provádět pouze přístupový bod. Zařízení jehož vzdálenost určujeme nepotřebuje nic, než být v dosahu pokrytí sítě. Na druhou stranu je tato praktika poměrně silně ovlivňována negativními vlivy, jako jsou překážky, nebo vícecestné šíření rádiového signálu [11]. V praxi je potom tato technika využívána s různými vylepšeními. Některé z nich jsou uvedeny dále v sekci 2.3.

Určení vzdálenosti pomocí RSSI

Protože je RSSI naměřená hodnota logaritmické jednotky, je nutné ji přepočítat pro získání vzdálenosti. K tomu lze použít ztrátový model signálu, převzatý z [6] a [23]. Jde o standardní, poměrně populární a také velice jednoduchý model. Lze jej vyjádřit vztahem 2.1.

$$\overline{PL}(dB) = \overline{PL}(d_0) - 10 * \eta * log_{10}\left(\frac{d_i}{d_0}\right) \tag{2.1}$$

kde mají jednotlivé symboly následující význam:

- $\overline{PL}(dB)$ - je naměřená hodnota síly signálu uvedená v logaritmických jednotkách (dBm)
- $\overline{PL}(d_0)$ - uvádí referenční sílu signálu v pro referenční vzdálenost d_0. Tato hodnota může být naměřena při provozu, nebo stanovena předem.
- d_i - je hledanou vzdáleností dvou bodů
- η - představuje faktor útlumu signálu, jehož hodnota se mění v závislosti na složitosti prostředí měření. Nabývá hodnot od 2 (nejméně rušné, exteriér) po 6 (velice rušné, členitý interiér s překážkami)

Jak je patrné, uvedený model je skutečně jednoduchý. Tomu ovšem odpovídá také nevalná přesnost výsledků při jeho použití. Proto se v literatuře objevují různé varianty jeho vylepšení. V drtivé většině jde ale o doplnění konstant, které dodávají více znalostí o prostředí, jež ale ne vždy jsou známé.

Příklady RSSI systémů

Pro doplnění je dále uvedeno několik příkladů navržených řešení, využívajících právě RSSI techniku.

Jeden z raných[1] systémů využívající Wi-FI a metodu fingerprintingu se nazývá **RADAR** [1]. Databáze pozic je nejdříve naplněna off-line daty, ke kterým jsou vypočteny odchylky a mediány síly signálu ke každé z pevných přijímajících stanic, těm data zasílá lokalizovaný klient broadcastovými UDP pakety. Poté pomocí půdorysu budovy, v níž je lokalizace prováděna, nastaví systém potřebné parametry pro co nejpřesnější ztrátový model (počet stěn mezi zařízeními, jejich materiál, apod.). Různými přístupy také řeší statické

[1] Zveřejněn v roce 2000

cíle a pohybující se uživatele. Přesnost nebyla nijak přesvědčivá (cirka 2.5m), ale i tak mohl systém splňovat potřeby některých uživatelů.

Další z uvedených příkladů systémů využívajících RSSI techniky je **HORUS** [22]. Oproti RADARu jde o novější přístup k problematice lokalizace, nicméně pracuje na podobném principu. Stejně jako předchozí uvedený, i HORUS spoléhá na vytvoření off-line databáze měření, na které pokročilými pravděpodobnostními modely řeší lokalizaci. To a znatelné vylepšení ztrátového modelu energie rádiového signálu vedlo k rapidnímu zlepšení přesnosti až na cirka půl metru. Systém je ale postaven jako „self-localize“, tedy zařízení musí samo ověřovat a dopočítávat svoji pozici ve sledovaném prostoru.

Za zmínku ještě stojí i systém nazvaný Redpin [2]. Jedná se také o jeden z lokalizačních systémů, který využívá RSSI k výpočtům, nicméně tento projekt míří trošku dál. Využívá k lokalizaci nejen Wi-Fi sítě, ale nabízí možnost podpořit data i o informace ze sítí GSM, nebo Bluetooth. Trénovací množinu pak tvoří sami uživatelé pohybující se ve sledované oblasti s mobilní aplikací. Za jejich přispění může být vytvořena rozsáhlá globální síť pro veřejné (i neveřejné) budovy a napomoci tak k lepší orientaci dalším uživatelům. I k těmto cílům mohou systémy s pomocí RSSI vzhlížet.

2.2.2 TOA - čas doručení

Pro určení vzdálenosti dvou zařízení, je možné k výpočtu použít TOA (Time Of Arrival), někdy také nazývaný TOF (Time Of Flight). Což je změřený čas zpoždění od vyslání signálu oproti jeho doručení. K výpočtu vzdálenosti pak stačí dosadit rychlost šíření signálu. Tato technika je ale poměrně obtížná, neboť vyžaduje zcela přesnou synchronizaci jak vysílače, tak přijímače. Což v našem případě pasivního sledování není možné zajistit. Problémem jsou také malé vzdálenosti, protože rádiový signál Wi-Fi (2.4GHz, 5GHz) putuje velice rychle. Pro správné změření zpoždění by bylo zapotřebí vybavit jak přístupové body, tak cílové zařízení velice přesnými hodinami s vysokým rozlišením.

Pro eliminaci zmíněných problémů se dá využít některých variant dané techniky. **DTOA** (Differential Time Of Arrival) je velice podobné technice TOA, jen s tím, že pro výpočet vzdálenosti se nevyužívá zpoždění signálu, nýbrž rozdíl v čase doručení na různé přístupové body. Tímto způsobem je úspěšně vyřešen problém s nutností synchronizace zařízení s přístupovým bodem, ovšem stále vyžaduje přesnou synchronizaci mezi pevnými stanicemi a hodiny s vysokým rozlišením.

Další variantou potom je **RTT** (Round Trip Time), kdy je měřen časový úsek od vyslání signálu z pevné stanice, až do přijetí odpovědi na něj od lokalizovaného zařízení. Synchronizace mezi stanicemi potom nemusí být zcela přesná, ale měření času na krátkých vzdálenostech jaké jsou v interiéru vyžaduje kvalitní hodiny.[11] Aby tedy byl dodržen požadavek na nízkou cenu systému, není tato metoda příliš využitelná.

Techniky TOA však i přes jeho nedostatky využívá například geografický lokalizační systém GPS [8], kde vzdálenost stanic (zde satelitů) a lokalizovaných zařízení dosahuje desítek tisíc kilometrů.

2.2.3 AOA - úhel dopadu signálu

Pro využití principu triangulace, uvedené v sekci 2.1.2, máme k dispozici techniku AOA (Angle Of Arrival). Její princip spočívá v určení rozdílu úhlu dopadu signálu od lokalizovaného zařízení a úhlu referenčního. Z tohoto rozdílu je potom možné dopočítat a určit směr ke hledanému zařízení. Je nutné využít antény citlivé na směr signálu, což vyžaduje instalaci speciálního hardware. Další nevýhodou je silná závislost na vzdálenosti. I malá chyba

v měření úhlu při větší vzdálenosti hledaného zařízení, může způsobit fatální nepřesnost. I z tohoto důvodu je tato technika také silně závislá na vícecestném šíření signálu, resp. na určení přímé cesty. Odražený signál totiž zpravidla dopadá pod jiným úhlem, než signál původní. [11]

2.3 Vylepšené techniky se zaměřením na Wi-Fi síť

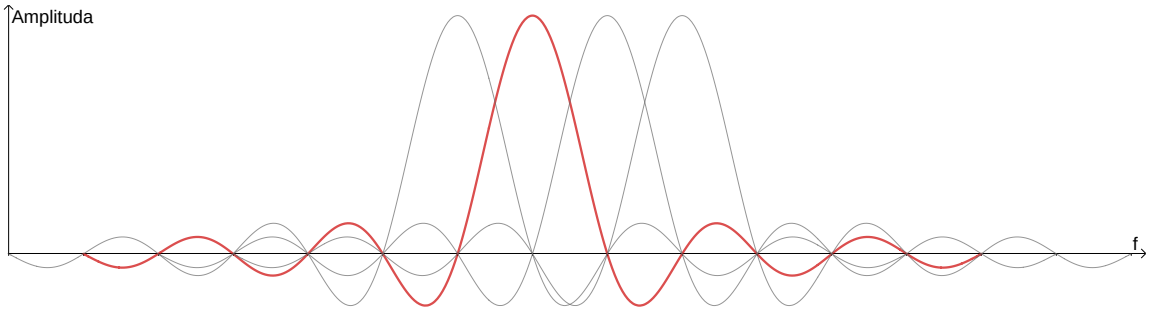
Zmíněné techniky v sekci 2.2 samy o sobě nejsou v interiérové lokalizaci příliš přesné. Jsou citlivé na rušení, dynamický pohyb v prostorách lokalizace, vícecestné šíření rádiového signálu atp. Je tedy přirozené, že pro praktické použití je vhodné využít jejich kombinaci. Pro potřeby našeho projektu navíc nelze využívat speciálního vybavení, jako jsou anténová pole, nebo směrové antény. Zároveň není možné spoléhat se na jakýkoli nástroj na straně hledaného zařízení. Je omezeno pouze na příjem a vysílání Wi-Fi signálu.

V následující části budou představeny vyvinuté nástroje a postupy, které zmíněné problémy částečně odstraňují. Před tím je ale potřeba objasnit některé další pojmy a funkce, které k tomu využívají. Závěr sekce je pak doplněn o zajímavé příklady opírající se právě o doplňující prvky, jako je speciální HW, nebo extra zařízení na lokalizovaném mobilním zařízení.

2.3.1 OFDM

První z pojmů je OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), což je modulační schéma využívající rozkladu provozu na několik subnosných frekvenčních kanálů, vysílaných paralelně. Pokud ještě každý takový kanál je zakódovaný bezpečnostním kódem, hovoříme o COFDM (Coded OFDM) [12] [13].

Díky ortogonalitě, mohou být jednotlivé subnosné kanály poměrně blízko u sebe (v kontextu frekvenčního spektra), protože překrytí postranních pásem nevadí a maximum jedné subnosné frekvence je přesně v místě, kde ostatní mají hodnotu rovnu nule. Je tak s výhodou šetřeno přenosové pásmo. Dobře viditelné je to na následujícím obrázku (2.4).



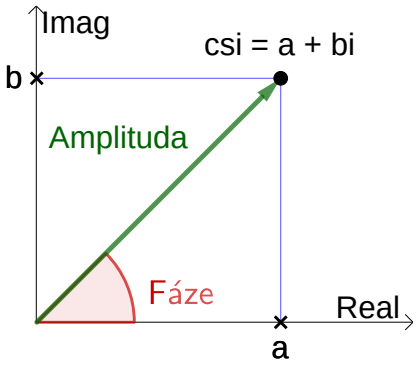
Obrázek 2.4: Rozdělení pásma na subnosné kanály. Funkce subnosné frekvence je $S = \frac{\sin x}{x}$. Převzatý obrázek z [13].

Samotná myšlenka rozložení frekvenčního pásma na subnosné kanály už existuje desítky let a dokonce se využívala v praxi. Často se totiž stává, že je zarušena pouze úzká část spektra, což zde ochromí pouze zlomek provozu. Není tedy znehodnoceno celé pásmo jako u jiných modulací. U Wi-Fi se OFDM poprvé objevuje ve standardu *IEEE 802.11a* (pro Evropu *HiperLAN2*) ve frekvenčním pásmu 5GHz. Díky rozdělení na více subnosných kanálů a paralelnímu přenosu se zvýšila i rychlost. Proto se také od standardu *IEEE 802.11g*

využívá OFDM modulace i v pásmu 2.4GHz. K plnému využívání OFDM přispěl také fakt, že modulaci i demodulaci lze poměrně efektivně implementovat algoritmy založenými na rychlé Fourierově transformaci (FFT) [13].

2.3.2 CSI

Díky tomu, že dnes takřka všechny Wi-Fi zařízení využívají OFDM modulaci (2.3.1), běžně se pro přesnější lokalizaci využívá dodatečné informace o provozu vysílače. Jedná se o CSI (Channel State Information), což je informace o každé subnosné frekvenci a jejím provozu. CSI obsahuje pro každou subnosnou frekvenci údaje, vyjádřené jedním komplexním číslem ve tvaru $csi = a + bi$. Příklad a využitelné hodnoty jsou uvedeny na obrázku 2.5. [21]



Obrázek 2.5: Znázornění uložené informace CSI. Převzato z [21].

Wi-Fi standard, kterému musí zařízení odpovídat, aby bylo možné přistupovat k CSI je *IEEE 802.11n (a novější)* [16]. Ten totiž přináší jako první technologii označovanou **MIMO** (Multiple Input–Multiple Output), což je využití vícero antén pro paralelní přenos. CSI potom nese informaci pro každou subnosnou, násobeno počtem antén přijímacích i vysílacích. Počet komplexních čísel se dá tedy vyjádřit následujícím vztahem (2.2), kde M vyjadřuje počet vysílacích antén, N počet antén přijímacích a sub počet subnosných frekvencí na kanál.

$$Suma_{CSI} = M * N * sub \tag{2.2}$$

Poměrně běžné jsou dnes přístupové body se třemi anténami, zatímco v běžných zařízeních, které potřebujeme lokalizovat bývá anténa jedna, zřídka kdy dvě. Je to způsobeno převážně snahou ušetřit příkon, neboť každé Wi-Fi rádio navíc je poměrně silnou zátěží pro mobilní zdroje. Co se počtu subnosných frekvencí týká, podle [16] je standardní šířka kanálu $20MHz$ a je rozdělen na 56 subnosných. Standard ale umožňuje šířku kanálu zdvojnásobit a tím umožňuje zvýšit tento počet na 114. Výsledkem tedy může být až

$$684 = 3 * 2 * 114 \tag{2.3}$$

komplexních hodnot. Pokud uvažujeme na každou složku čísla např. $10B$ (liší se výrobce od výrobce), pak je provoz pouze pro CSI $6kB$ na jedno jediné zařízení. Je tedy vhodné zvážit, zda se nevyplatí zpracovávat tyto informace a transformovat je na poziční souřadnice přímo na každém z pevných přístupových bodů. Problém také je, že ne každý výrobce obvodů umožňuje k této informaci přístup. [21] [7]

2.3.3 Existující lokalizační CSI systémy a jejich vlastnosti

FILA

První z nich je systém, nebo postup nazvaný FILA (Fine-grained Indoor Localization) [20]. Vychází z faktu, že lokalizace ve Wi-Fi sítích pouze pomocí RSSI techniky není dostatečně přesná. Ve vnitřních prostorách je silně zatížena odrazy signálu, které způsobují vícecestné šíření a překážkami, které znemožňují přesný výpočet vzdálenosti ze ztráty síly signálu (2.2.1). Překážky mohou být i dynamického rázu, jako otevření/zavření dveří, nebo pohybující se lidé. Výzkumná skupina složená ze členů institutu *IEEE* proto hledala náhradu v podobě nějaké spolehlivější informace, než je amplituda signálu, jako je tomu u RSSI. Odpovědí jim byla CSI (2.3.2). Nese totiž nejen amplitudu signálu, ale navíc i fáze subnosných frekvencí.

Systém FILA potom funguje v několika krocích.

1. Prvním krokem je shromažďování kanálové informace (CSI) ze subnosných frekvencí, které jsou rozděleny do třiceti skupin přes šířku pásma.

2. Další je potom zpracování této informace, které probíhá dvojím způsobem. Je potřeba zmírnit dopady chyb na určení vzdálenosti, které mohou být zapříčiněny ztrátou signálu (path loss), vícecestným šířením(multipath propagation), nebo ztrátou síly signálu při průchodu překážkami (shadowing).

   Zmírnění vícecestného šíření v časové doméně využívá faktu, že odražené signály mají jiné zpoždění než signál LOS (Line Of Site). Ten se dá rozeznat tak, že má větší amplitudu, než signály odražené. Takže lze použít časové "okno" pro odfiltrování odražených signálů.

   Kompenzace slábnutí signálu ve frekvenční doméně je další možností, jak zmírnit negativní dopady. Díky vysoké pravděpodobnosti, že slábnoucí signál ovlivní jen některé subnosné, může být provedena kompenzace menšího slábnutí pomocí vážených průměrů a různé subnosné jsou transformovány do jedné, označené jako CSI_{eff} použité v následujících krocích.

3. Následuje kalibrace podle modelu šíření používaného pro RSSI. Jeho základní verze nebyla pro interiérové lokace dostačující a tak je variabilní model a jeho parametry nejprve nastaven pomocí trénovacího algoritmu. A to pro každý přístupový bod zvlášť.

4. Pro určení pozice lokalizovaného zařízení využívá systém FILA metody fingerprintingu[2] (porovnávání kalibračních hodnot). Musí tedy nejdříve být vytvořena podrobná mapa, ve které jsou zaneseny CSI údaje. Tyto informace jsou ukládány také po výše zmíněném zpracování a to pro každý přístupový bod a pozici.

5. Nakonec každý přístupový bod nezávisle pomocí např. Pearsonovi korelace a pravděpodobnosti určí nejbližší možnou pozici z dříve naučené množiny.

Systém byl testován ve třech různých prostředích. V laboratoři, v přednáškové hale a v prostoru chodby. Cílem bylo ukázat přínos oproti metodám, které používají pouze RSSI techniky pro určení pozice (například dříve zmíněný HORUS, popsaný v sekci 2.2.1). FILA založená na CSI informaci se ukázala jako výrazně stabilnější a rychlejší technika, než porovnávané. Medián přesnosti vyšel na $0,65m$. Ve složitějších podmínkách koridoru, byl

[2]Podle [19] používala původní varianta pro určení pozice výpočet vzdálenosti a trilateraci.

naměřen medián přesnosti $1.07m$. V obou uvedených případech jde ale o zhruba 25% zisk, oproti metodě Horus. Na CSI založená metoda FILA dosáhla výrazně lepších výsledků, než metody bez této informace.

Orion

Jako příklad systému, který vylepšuje AoA techniku, uveďme Orion[3].

Princip spočívá ve shromažďování CSI jak na straně přístupového bodu, tak na straně hledaného zařízení a to pouze ze standardních tří antén. Běžně je pro přesné stanovení úhlu signálu potřeba rotační anténa, nebo anténové pole (v interiéru 6 – 8 antén) [9]. Díky CSI ale není potřeba speciální hardware. Orion systém ze získaných informací o subnosných vytvoří matici pro algoritmus MUSIC [14] a pomocí něj vypočte odhad nejen AoA, ale i AoD (Angle of Departure), tedy úhel odletu. Nakonec pomocí filtrů poměrně přesně stanoví úhly odchozího i příchozího provozu.

Systém jako takový není navržen přímo pro lokalizaci. Jde spíše o ukázku, jak lze CSI využít i pro AoA techniku v interiérových prostorách a to poměrně snadno na dnes běžných, relativně levných, tří anténových Wi-Fi kartách.

Chronos

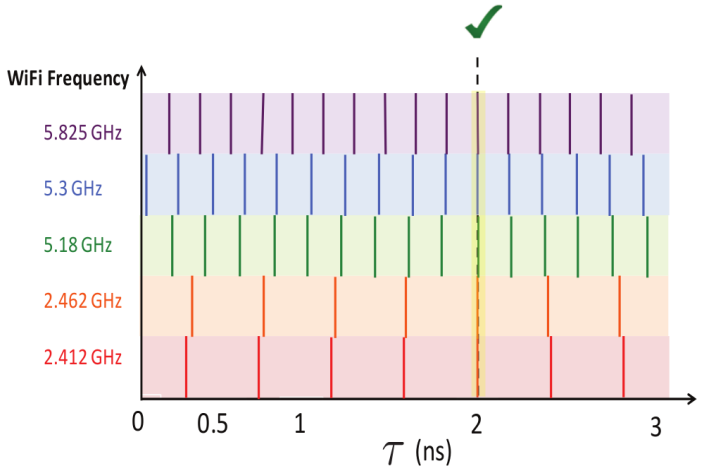
Kde Orion řeší přesnější techniku měření úhlu dopadu bezdrátového signálu, tam systém nazvaný Chronos [17] opět pomocí CSI umožňuje radikálně zpřesnit měření času přenosu signálu. Jak bylo uvedeno v sekci věnující se technice ToA (2.2.2), měření času musí být velice přesné, což na běžně dostupném HW nelze zajistit. Systém Chronos tak pro měření využívá fázového posunu (získaného pomocí CSI), který se cyklicky mění s časem „letu“ signálu. Kvůli cyklickému průběhu změny fáze, jsou po matematickém přepočtu získány násobky určitého času. Nicméně který z těchto násobků je ten hledaný, není možné určit.

Zde přichází na řadu hlavní myšlenka algoritmu a to, že se násobek času mění na základě vysílané frekvence. Byl tedy implementován protokol, který řídí vysílač a zajišťuje, že synchronně i na straně přijímače, bude docházet k pravidelnému přepnutí provozní frekvence. A to jak v pásmu $2.4GHz$, tak i v $5GHz$ oblastech. Po několika frekvenčních „hopech“ tak vzniká soustava rovnic, kde hledaný měřený časový násobek je správným řešením této soustavy. Bez hlubšího matematického popisu je uveden obrázek 2.6, jako ukázka tohoto přístupu.

V praktickém světě samozřejmě vznikají nepříjemné efekty, se kterými je potřeba se vypořádat. Jedním z nich je i zpoždění reakce při příjmu paketu. Wi-Fi zařízení zkrátka nějakou dobu trvá, než zareaguje na příchozí paket. Musí načíst a reagovat na prvních několik vzorků a to se neobejde bez zpoždění. Řešení tohoto problému opět pomáhá CSI, které zaznamenává příjem na každé subnosné frekvenci a pomocí interpolace mezi těmito záznamy je možné zpoždění eliminovat. S vícecestným šířením signálu se systém vypořádává pomocí upravené inverzní neuniformní diskrétní furierovy transformace a matematicky také řeší drobný fázový posun, způsobený přepínáním frekvence vysílání, nebo vyrovnává malé frekvenční rozdíly mezi subnosnými kanály.

Konečně vzdálenosti a pozice lokalizovaných subjektů řeší Chronos tak, že čas letu podělí rychlostí šíření rádiového signálu ve vzduchu, tedy rychlostí světla. Tím dostane výsledné vzdálenosti zařízení od přístupového bodu. Kotva, která musí být vybavena více anténami má známou pozici, ale také jsou známé vzdálenosti a umístění jednotlivých jejích antén.

[3]Systém Orion dostupný na adrese: https://github.com/naoufal51/Orion.



Obrázek 2.6: Ukázka frekvenčních pásem a řešení času přenosu. Převzato z [17].

Vzniká tak další soustava rovnic, v nichž vystupují vzdálenosti od antén a pomocí toho je možně vypočítat pozici. Geometrie poskytuje prostředky pro vyřazení nereálných umístění a optimalizací je určena co nejpřesnější lokace zařízení.

Při experimentech dosahoval Chronos poměrně dobrých výsledků. Naměřený medián chyby byl 65cm při LOS (Line Of Site) a 98cm při NLOS. I když se výsledky mohou zdát nepřesvědčivé, tak je potřeba přihlédnout k faktu, že hledání pozice je za pomocí pouze jediného přístupového bodu. Což je také jedna z největších výhod uvedeného systému. Nevýhody ovšem plynou zejména z nutnosti vysílání CSI paketů a také kvůli častému střídání vysílacích frekvencí, což je pro běžný provoz internetu v zařízení v podstatě nepoužitelné. Problém může být také omezení provozu ostatních klientů, připojených k přístupovému bodu. Tedy systém Chronos dobře slouží k lokalizačním úlohám, ale k ničemu jinému. S ohledem na stanovené požadavky je tedy pro nás tento systém opět nevyužitelný.

SpotFi

Kombinaci výše uvedeného dobře využívá další systém nazvaný SpotFi. Jeho premisou je levné a snadné nasazení systému do provozu, tedy využití existující bezdrátové infrastruktury (je-li to možné) a přitom se přesností vyrovnat systémům využívajícím speciální hardware a nástroje. I zde jsou využity dnes již standardní přístupové body pouze se třemi anténami a možnost zasílat a přijímat CSI obohacené pakety.

Lokalizace pomocí SpotFi je dosaženo ve třech krocích.

1. První na řadě je zjištění AoA a ToF údajů z různých cest šíření signálu. Při tom je využit algoritmus MUSIC [14]. Aby se dosáhlo co nejlepších výsledků, transformuje SpotFi fázové posunutí mezi subnosnými na ToF. Umožní tak rozšířit senzorové pole přijímače z N antén, na $n * subcarriers$. To ve spolupráci s MUSIC umožní dobře a přesně rozlišit jednotlivé cesty signálu.

2. Dalším krokem je pak určit, která z daných cest je přímá (Direct Path). Obecně se dá říct, že DP by měla být ta, která dorazí za nejkratší čas, tedy s nejnižším ToF. Nicméně může nastat případ, že přímá cesta neexistuje. SpotFi se s tímto problémem vypořádá tak, že nasbírá deset po sobě jdoucích paketů v každém přístupovém bodě. Z pozorování totiž vyplývá, že hodnoty (AoA a ToF) přímé cesty se oproti odraženým

příliš nemění. Pokud se tedy vynesou hodnoty ze všech cest a paketů do grafu, vytvoří shluky. Ten ze shluků, který má nejnižší rozptyl a zároveň nejnižší ToF, je označen jako kandidát na DP. Kandidátní cestě se přiřadí váha, která vyjadřuje pravděpodobnost, že tato cesta je hledaná přímá. To aby se předešlo zásadnímu ovlivnění výsledku v případě, že je cesta zvolena chybně, pokud DP neexistuje.

3. Nakonec zbývá jen zařízení lokalizovat. Až zde začínají jednotlivé přístupové body spolupracovat. Resp. serverová instance zpracovávající údaje z kotev. Protože nelze zcela přesně synchronizovat čas na různých přístupových bodech, jsou k lokalizaci využity pouze údaje AoA a přidá se RSSI. Po složení výsledků ze všech kotev, s přihlédnutím na jejich pravděpodobnosti z minulého bodu, je určena oblast možné pozice. Využitím různých optimalizačních technik je potom tato oblast minimalizována na jednu přesnou pozici.

Co se naměřených výsledků týká, vede si SpotFi skutečně dobře i proti systémům, jež vyžadují extra úpravy a hardware. Medián chyby v prostředí běžné kanceláře byl naměřen $40cm$, což se minimálně vyrovná systémům s rotačními anténami. Jiné systémy takové přesnosti zdaleka nedosahují. Testy proběhly i v prostorách, kde nebyl dostatek přístupových bodů, nebo přímých cest signálu. I v těchto stížených podmínkách je SpotFi s mediánem chyby (přesnosti) $1.6m$ přijatelné řešení lokalizace s ohledem na to, že nijak zásadně nebrání běžnému síťovému provozu.

SpotFi tedy ukazuje, že s možnostmi CSI a vhodnými matematickými postupy, lze dosáhnout se standardním vybavením dneška přesností, kterými se mohly chlubit jen specializované, drahé a nepohodlně nasazované systémy. Z pohledu našeho zadání ale zůstává největší nevýhodou nutnost klienta vysílat CSI pakety, což není standardní provoz. Výrobci dnešních karet neumožňují přístup k CSI běžně a je tedy nutné upravovat firmware, což může vést jednak k negativnímu dopadu na provoz zařízení, ale také to na, zejména mobilních zařízeních, nemusí být vůbec možné. Pro popis zmíněného systému bylo využito zdroje [9].

Podobných postupů a metod, využívajících CSI pro lokalizaci přirozeně vznikla a vzniká celá řada. Vyšší přesnosti ale dosahují zejména díky použití dodatečných senzorů, jako jsou kamery, akcelerometry, ultrazvuk, kompas apod. Vzhledem k uvedeným požadavkům na námi navržený systém tedy není možné takových systémů využít. Pro úplnost ale uvádím několik zástupců s hrubým popisem jejich funkčnosti.

Systémy využívající dodatečné prvky

Ubicars je první ze zmíněných systémů využívajících více prvků, než samotné Wi-Fi pro lokalizaci [10]. Ten pracuje na principu radaru se syntetickou aperturou (angl.: Synthetic aperture radar - SAR). Sledované zařízení musí být vybaveno dvěma anténami a na vyžádání jej uživatel otočí kolem svislé osy. Ve spolupráci s vysíláním informací o kanálech subnosných frekvencí, je v podstatě nahrazeno kruhové pole antén. Je tak možné získat polohu relativní k přístupovým bodům v okolí. Samozřejmě hraje roli spousta negativních vlivů, jako některé co již byly zmíněné dříve, ale také například nedokonalé otočení z důvodu lidské chyby. Je tedy potřeba dostatečná porce matematického zpracování dat pro získání pozice.

Pro zpřesnění určené lokace, nebo pro využití takzvaného „geotaggingu“ - což je obecný název pro proces přidávání geografických dat k různým objektům - může být na dané lokaci provedeno několik snímků kamerou. Toto může být využito například pro lepší určení pozice

zajímavých objektů v muzeu, oddílu v knihovně, nebo produktu ve skladu. A to včetně svislé osy, tedy ve 3D prostoru.

S výsledným naměřeným mediánem chyby $39cm$ se jistě jedná o zajímavé řešení. Nicméně nevýhody jsou zde také. Zdaleka ne všechna mobilní zařízení jsou vybavena dvěma anténami, spíše naopak. Dále je potřeba dostatečný výkon pro zpracování obrazových dat apod.

Systém nazvaný **Phaser** [5] na druhou stranu spoléhá na speciální, i když dle slov vývojářů levný, hardware. Ten umožňuje propojení více Wi-Fi modulů do většího anténového pole, mezi nimiž je zajištěna synchronizace. Je tak dosaženo kvalitního získávání úhlů dopadu signálu za pomoci měření rozdílů fázových posunů na jednotlivých anténách. Systém se také snaží potlačit vliv vícecestného šíření. Při čerpání informací o fázi se opět spoléhá na CSI a jeho výstupem jsou pouze úhly. Pro stanovení pozice je tedy zapotřebí výpočetní nástavba. I když tedy využívá pouze Wi-Fi, je nutné pro zavedení v praxi použít extra HW, což může být nepraktické.

Podobných systémů přirozeně vznikla a vzniká celá řada. Málo z nich se však hodí pro širší využití v praxi a to je způsobeno zejména problémovým čerpáním CSI na dnešních standardních Wi-Fi modulech. Zůstávají tedy spíše výzkumnými nástroji.

Kapitola 3

Návrh lokalizačního systému

Následující kapitola se věnuje návrhu lokalizačního systému. V první části je rozbor zadání a specifikace požadavků, následovaná vlastním návrhem systému, architektury a jednotlivých částí.

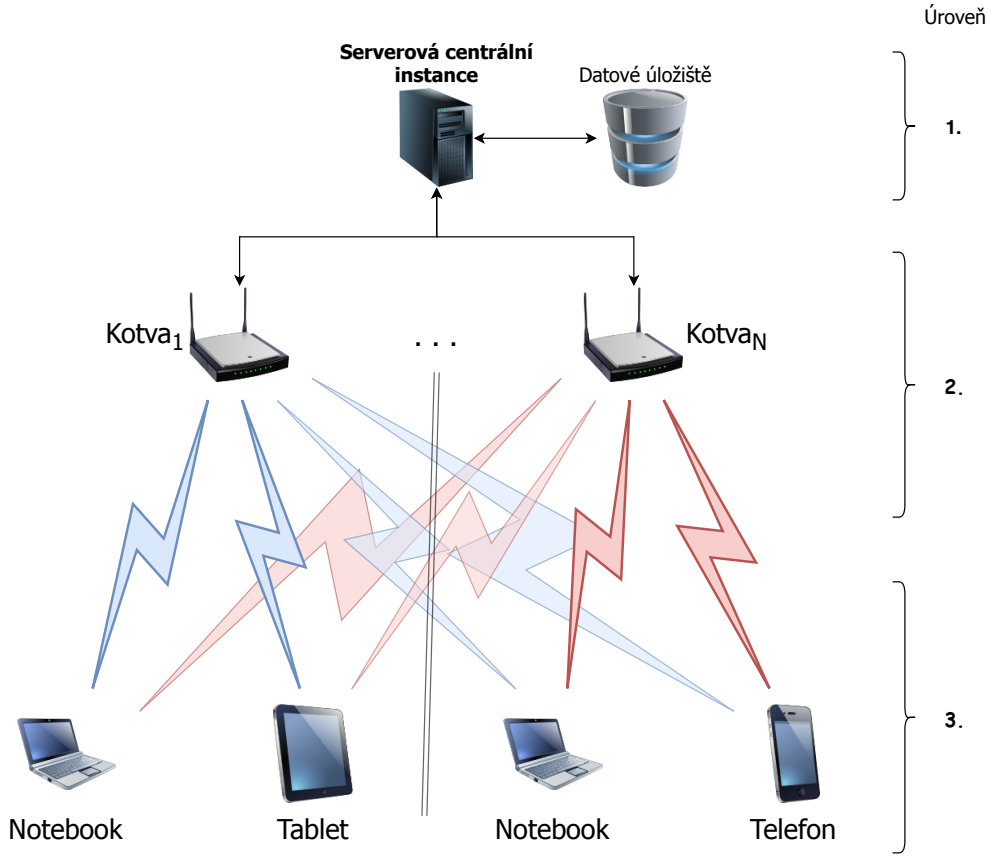
3.1 Specifikace požadavků

Firma s nevelkými kancelářskými prostorami požaduje vytvoření systému, který by jí umožnil sledovat pozice mobilních zařízení, popřípadě pracovníků jež tato zařízení obsluhují. V několika bodech jsou shrnuty hlavní požadavky na vyvíjený systém.

- Systém pracuje pouze na bázi Wi-Fi. Žádné doplňující sítě ani senzory nejsou relevantní. Systém má za úkol sledovat různorodá zařízení, která jsou s jistotou vybavena jen Wi-Fi. (Např. notebooky nebývají vybaveny gyroskopy, nebo akcelerometry.)
- Co nejnižší cena systému. Poměrně standardní požadavek, který dovoluje využití levných a dostupných nástrojů a hardware. Instalace nákladných specializovaných prvků pro lokalizaci by tedy byla proti tomuto požadavku.
- Snadná škálovatelnost systému. Pokud se změní prostory kanceláří (přesune se nábytek, nebo stěna), měl by systém na tuto změnu reagovat bez nutných větších zásahů. Zároveň pokud dojde k radikálnější změně v půdorysu (rozšíření prostor), mělo by jít snadno upravit i systém, například přidáním kotev. Tento požadavek znemožňuje využití metod fingerprintingu, popsaném v sekci 2.3.3. Obnovovat naučenou databázi pozic v provozu není žádoucí.
- Rozlišení pozic na úrovní místností. Přesnost dosažitelná pouze pomocí Wi-Fi by tomuto požadavku měla vyhovět. Zároveň není nijak fatální, když nebude pozice určena správně. Je tedy nutné stanovit správný kompromis mezi výhodami a nevýhodami použitelných postupů.
- Pasivní lokalizace. Sledované zařízení by nemělo být jakkoli upravováno a přizpůsobováno pro potřeby lokalizace. Pozice zařízení by měla být zaznamenávána pouze po připojení do sítě, bez dalších nutných akcí.

3.2 Návrh architektury systému

S ohledem na zadání a zmíněné požadavky jsem navrhl systém, který se skládá z několika částí. Uvedený obrázek 3.1 naznačuje jednotlivé vrstvy architektury, které jsou dále v textu jednotlivě popsány.



Obrázek 3.1: Tří úrovňová architektura navrženého systému. (1. centrální aplikace, 2. přístupové body v roli senzorů, 3. lokalizovaná zařízení)

- **Úroveň 1:** Na nejvyšší úrovni je serverová instance, která zodpovídá za sběr, ukládání a prezentaci dat. Až na této úrovni dochází ke spojení dat z přístupových bodů, aby byla dodržena škálovatelnost. Instance pro snadnější nasazení může mít podobu aplikace, kterou lze nahrát v podstatě na jakýkoli počítač v síti. Zde také dochází k potřebným výpočtům pozic a umožněna musí být i konfigurace jednotlivých kotev.

  Výpočetní aplikace musí byt schopna zpracovávat větší množství dat. Ze zadání a požadavků ovšem vyplývá, že není nutné provádět mnoho složitých výpočtů a ani není kritická rychlost jejich řešení. Je tedy možné zvolit programovací jazyk, který není určený přímo pro matematické úlohy. Nutné je ovšem zajistit snadnou práci s velkým množstvím dat a tak je na místě sáhnout po některém z databázových systémů. Pro prezentaci dat je vhodné navrhnout robustní rozhraní, které umožní napojení na různorodé další (například docházkové) systémy firmy. S výhodou by šlo použít i pro zobrazování dat na mobilních zařízeních.

Protože běžné metody měření, které dovolují pasivní sledování polohy zařízení, nemusí být dostatečně přesné, nabízí systém dvojí způsob určování polohy. V první řadě měření RSSI pouze od přístupových bodů, kde zařízení nemusí projevovat žádnou aktivitu, pouze musí být připojeno v síti, tak v řadě druhé i způsob aktivní. S nevelkým úsilím je možné z lokalizovaného stroje měřit vzdálenost kotev a zasílat tyto informace ke zpracování na centrální uzel. Na mobilních telefonech a tabletech to může být jednoduchá aplikace s přehledným rozhraním, notebooky mohou být vybaveny nesložitým skriptem.

- **Úroveň 2:** Další úrovní jsou potom na míru vytvořené senzory, v podobě Wi-Fi přístupových bodů. Musí být schopné komunikovat s centrální stanicí a to nejlépe bez rušení lokalizační bezdrátové sítě. Přístupové body musí být schopny shromažďovat data o zařízeních v síti a tato data dopravovat na centrálu. Výpočty spojené s lokalizací jsou prováděny až na serverové instanci, což umožní vypustit kooperaci mezi senzory.
- **Úroveň 3:** Poslední a nejnižší úroveň v navrženém systému zastávají samotná lokalizovaná zařízení. Měla by se obejít bez modifikací, ale je vhodné umožnit jim využívat a do sítě zasílat informace, které by mohly zpřesnit určení pozice. V zásadě tedy pro zahájení lokalizace není potřeba se zařízením manipulovat jinak, než pouze aktivovat Wi-Fi a připojit jej k lokalizační síti. Lokalizační síť přirozeně musí poskytovat funkcionalitu běžné sítě. Lokalizovaným subjektům tedy nesmí být upřena možnost bezdrátového internetu a nesmí být ani jinak omezované.

Je tedy nutné navrhnout a vyrobit moduly umožňující plnit roli Wi-Fi přístupových bodů. Na jejich operačním systému pak sestavit firmware, který bude zajišťovat sběr dat, nutných pro lokalizaci připojených zařízení. Další částí pak bude implementace síťové aplikace, která umožní vhodným rozhraním přeposílat jednak data na centrální stanici, ale také zpětně nastavovat parametry senzorů. Uložená data bude potřeba zpracovat v další části implementované aplikace a konečně, umožnit jejich prezentaci. Poslední částí pak bude prozkoumání možností tvorby nástroje, který by zapojil do lokalizace i samotná zařízení.

Testování výsledného systému bude provedeno v interiéru kanceláří zadavatele. Protože systém nemá za úkol lokalizovat cíl v prostoru, ale „pouze“ určit místnost výskytu, výsledkem může být procentuální vyjádření úspěšných pokusů. Také bude vhodné sledovat vliv dynamické změny prostředí, jako je pohyb osob, nebo otevírání/zavírání dveří a jak moc negativní dopad budou na výsledky tyto změny mít. Také je vhodné zhodnotit změnu úspěšnosti, při testech v klidném prostředí a za plného provozu s vysokým počtem zařízení.

Změny původního návrhu

Je také na místě, uvést největší změnu v návrhu, ke které došlo po experimentech. Problém se vyskytl při čerpání CSI a jejího využití pro lokalizaci. Ne každý výrobce Wi-Fi obvodů umožňuje přístup k CSI a jen některé čipy a síťové karty (NIC) jsou schopny tuto informaci dodat. Nové výrobní řady toto neumožňují vůbec, alespoň ne bez netriviální úpravy přímo firmware výrobku a proto bylo z návrhu CSI vypuštěno. Není zřejmě žádoucí, aby byl uživatel nucen do nepohodlné a potencionálně nebezpečné (pro dané upravované zařízení) operace.

Původní návrh vycházel z teorie, že je možné využít nástroj **Atheros CSI Tool**[1]. Byla tedy použita karta *Compex WLE900VX* a proběhla řada pokusů komlilace upraveného

[1] CSI Tool: https://wands.sg/research/wifi/AtherosCSI/

linuxového jádra, které by mělo obsahovat modifikovyný ovladač. Jak se ale ukázalo, firma **Atheros** spojila v roce 2011[2] síly se společností **Qualcomm** a od té doby není možné čerpat SCI informace z jimi vyráběných NIC čipů. Nástroj již tedy není s těmito kartami kompatibilní a starší modely již nejsou dostupné na trhu. Vytvořený systém se tak musí bez tohoto cenného doplňku, jakým CSI bez pochyby je, bohužel obejít.

[2] https://wikidevi.com/wiki/Qualcomm_Atheros

Kapitola 4

Realizace systému

Kapitola popisuje detaily tvorby systému. V úvodní části popisuje výtvor jako celek a zamýšlený způsob použití v praxi. V následujícím textu je pak rozebrán systém po jednotlivých úrovních uvedených v sekci 3.2 a to jak z pohledu hardwaru, tak i implementace softwarové části.

4.1 Systém jako celek a jeho použití

Navržený a vytvořený systém slouží pro určení místnosti (nebo podobné lokace), ve které se nachází zařízení připojené ve Wi-Fi síti. Je cenově dostupný, škálovatelný a snadno zprovoznitelný v již zavedené infrastruktuře. Je navržen pro práci v interiéru malé, či střední firmy a poskytuje pasivní, méně přesnou, variantu lokalizace, ale i aktivní určování pozice za přispění vyhledávaných zařízení. Tak by se dal shrnout popis vytvářeného produktu.

Pokud se firma rozhodne nasadit tento systém ve svých prostorách, je potřeba učinit několik nezbytných kroků k úspěšnému zprovoznění.

1. **Pokrytí sledovaných prostor.** Kolik bude potřeba přístupových bodů pro pokrytí požadavků lze určit následujícím způsobem.

   Každá místnost (popřípadě lokace, jež se skládá z více menších místností) by měla být nejlépe vybavena vlastním senzorem. Pokud je místnost větší než $10m^2$, je lepší rozmístit kotev více. Lokace, které mají být rozlišovány, se nesmějí překrývat a prostor pokrytý jedním senzorem musí být spojitý. Přičemž pojem „místnost“ neoznačuje nutně prostor ohraničený zdmi. V jedné větší místnosti může být více nezávislých lokalizačních bodů.

   Jinými slovy, každou část interiéru, kterou je žádoucí z lokalizačního hlediska odlišit, je nutné vybavit zvláštním senzorem. Problém může nastat při snaze rozdělit prostor na velmi malé jednotlivé části. Například menší než $2m^2$. V tak hustém provozu by mohlo být příliš vysoké rušení bezdrátového média.

2. **Příprava síťové architektury.** První verze senzoru se pro přenos naměřených dat na centrální uzel spoléhá výhradně na ethernetové kabelové spojení. Je tedy potřeba počítat s rozvodem internetového spojení do všech lokalizovaných prostor. Nastaveni DHCP, FireWall pravidel a dalších síťových prvků musí být vedeno na rozvodných uzlech. Senzory neumožňují tyto vlastnosti ovlivňovat.

3. **Instalace centrálního uzlu.** Ke zprovoznění serveru systému je zapotřebí pouze stroj připojený v síti, který je pokud možno stále spuštěn a dostupná databázová instance. Stroj může být firemním serverem, jedním z používaných počítačů k pracovní činnosti, nebo extra vyhrazený pro účely lokalizace. Aplikace není náročná na výpočetní zdroje, jediným požadavkem je tak dostatečně prostorné úložiště pro databázi.

4. **Rozestavení senzorů.** Přístupové body v lokalizačních prostorách je vhodné umisťovat s ohledem na obecné doporučení pro dobré pokrytí Wi-Fi sítí. Upřednostněny jsou tedy volnější prostranství a správná orientace antén vzhledem k požadovanému pokrytí.

5. **Postupné spuštění systému.** Pokud je spuštěn centrální uzel, je možné provést potřebná nastavení, jako je název bezdrátové sítě, nebo použitá frekvence (kanál). Poté lze postupně zprovozňovat jednotlivé kotvy. Každá se po uvedení do provozu nejprve ohlásí serveru, který ji uloží a umožní její identifikaci. Postupné uvádění do provozu pomáhá s identifikací senzorů.

6. **Užívání, ovládání a rozšiřování.** Pokud jsou senzory v provozu, probíhá odesílání, ukládání a zpracovávání dat, je možné využívat lokalizačních informací. Dostupné jsou v databázi, kde zařízení, identifikovaná MAC adresou, jsou přiřazena k lokaci výskytu každých několik sekund (implicitně 5).

   Pokud je potřeba lokalizační síť rozšířit, stačí jen připojit do sítě další senzor. Ten se opět po spuštění ohlásí na centrální instanci a je možné jej identifikovat, nebo provést nastavení.

   Samozřejmě je tu i možnost nasazení aplikace na lokalizovaná zařízení, která může zajistit lepší výsledky (aktivní lokalizace). Každé zařízení ale může pracovat jinak a proto je vývoj takové aplikace ponechán na uživateli. Navrženo je pouze komunikační rozhraní pro zasílání dat na server (4.2.3).

Uvedený postup není nikterak složitý, ale některé body mohou být problematické. Zejména nutnost kabelového rozvodu sítě. Více detailů a nastínění možných řešení obsahuje další část textu, jež se věnuje detailnímu popisu funkcionality jednotlivých částí systému.

4.2 Detaily součástí systému

V následujících odstavcích jsou podrobněji popsané jednotlivé úrovně systému, podle rozdělení ze sekce 3.2. Jednotlivé dílčí části jsou rozebrány z pohledu hardware i software výbavy. Zároveň jsou odhaleny největší problémy a pokud je to možné i navržena jejich řešení.

4.2.1 Centrální serverová instance

Hardwarové nároky pro instalaci serverové strany systému nejsou nijak vysoké. Je sice možné očekávat zpracovávání velkého množství dat, nicméně jednotlivé výpočty nejsou složité. Důležité je skutečně pouze poskytnout dostatečné úložiště pro databázovou instanci. Databáze ale může být umístěna kdekoli v síťovém dosahu. nemusí být ani na stejném centrálním stroji. Musí být ovšem dodrženo, že centrální uzel jako takový je připojen v lokální síti spolu se senzory. Samotné moduly odesílají broadcast požadavek pro zapsání se na server, ten jim tedy musí být schopen naslouchat a odpovědět.

Jako programovací jazyk pro centrální uzel byl zvolen python. To jednak z důvodu jeho poměrně dobře a snadno řešitelné multiplatformnosti, ale i z mého osobního zájmu si tento skriptovací jazyk vyzkoušet. Díky použití pythonu je tedy instalace velice jednoduchá a to v podstatě na kterémkoli operačním systému, jež tento jazyk podporuje. Vyvíjen a testován byl na GNU/Linuxové distribuci Ubuntu s Debian jádrem. Nicméně program nevyužívá žádných speciálních systémových nástrojů, nebo nastavení. Je tedy s minimálním úsilím možné přizpůsobit jej a zprovoznit na jiných operačních systémech.

Serverová aplikace jako celek je rozdělena do tří, téměř nezávislých částí, které v podstatě přistupují zvlášť ke zmíněné databázi. V následujících řádcích bude objasněno chování těchto složek.

Síťový vysílač a přijímač

Po spuštění serverové instance je jako první aktivován síťový modul. Ten se připojuje k MySQL/MariaDB databázi a poté spouští paralelně běžící procesy. Za využití python modulu `multiprocessing` je nejdříve vytvořen a spuštěn subproces `broadcast_catch`.

Jak název napovídá, jde o proces, jež poslouchá na jedinečném portu (číslo podle nastavení) UDP broadcastové datagramy. Pokud zachytí takový provoz, ověří jeho formátování a pokud je správné, jde o hlásící se senzor v síti, nebo připojené zařízení využívající aktivní lokalizaci. Senzor musí nahlásit jedinečnou MAC adresu, podle níž bude dále identifikován a také jemu přidělenou IP(v4) adresu. IP adresy musí nutně rozdělovat DHCP server nakonfigurovaný a jedoucí na některém ze síťových prvků, jiných než jsou senzory. S největší pravděpodobností to tak bude směrovač, který v kancelářích zodpovídá za rozvod sítě. A to ať dříve existující, nebo dodaný při nasazování našeho systému. Takto ohlášený přístupový bod je uložen do DB (databáze) a pomocí IP adresy s ním lze komunikovat přímo. Proces běží v režimu „daemon“, čímž je mimo jiné i zajištěno, že po ukončení nadřazeného procesu (v tomto případě samotné centrální aplikace), bude také ukončen. Aktivní zařízení naopak ukládáno není a jde v podstatě jen o zjištění dostupnosti serveru a jeho IP adresy.

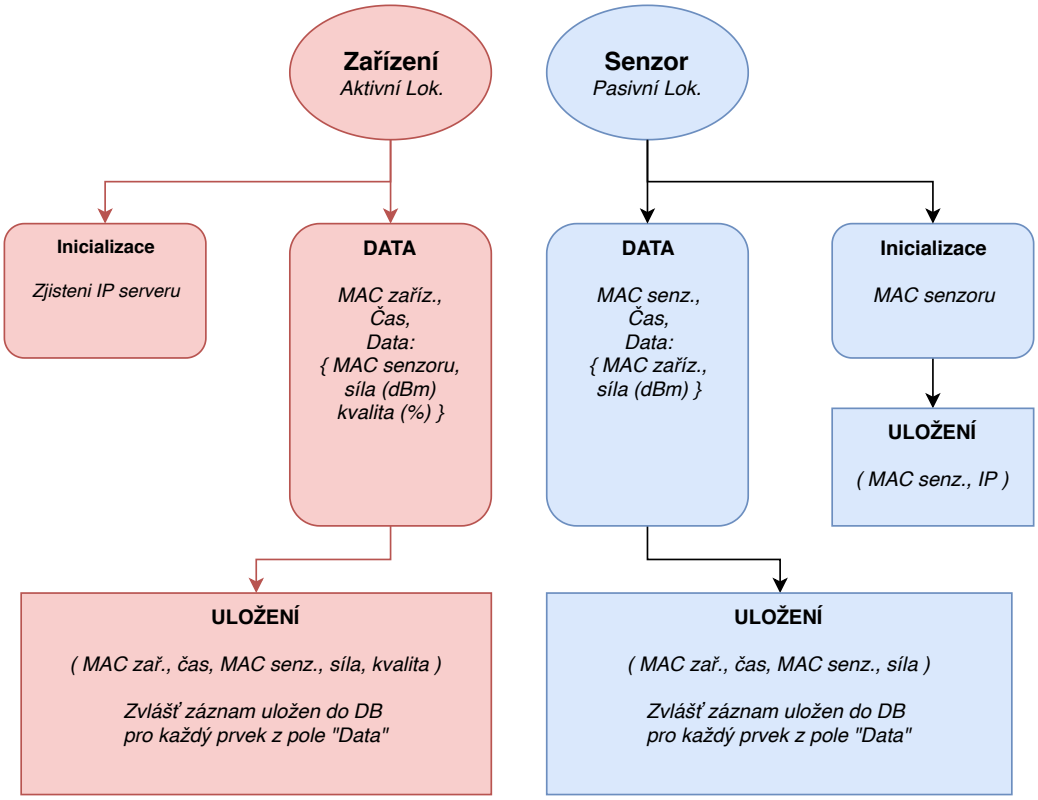
Další spuštěný a paralelně běžící subproces má název `listening`. A jde o hlavní proces pro sbírání odeslaných dat z jednotlivých senzorů. Na jiném jedinečném portu (`serverPort`) naslouchá a očekává příjem dat. Pracuje neblokujícím způsobem a za pomoci python modulu `select` vytváří fronty, které slouží jak pro ukládání přijatých zpráv, tak pro shromažďování a odesílání odpovědí.

Samotné zpracování dat ze senzorů může pocházet ze dvou zdrojů a v zásadě může být dvojího typu. Více to přibližuje následující diagram (4.1), znázorňující typy zpráv a zpracování.

Na diagramu je patrné, že zdroj dat může být zařízení, nebo senzor. Obdélníky se zaoblenými rohy naznačují obsah dat, bloky bez zaoblení pak strukturu ukládanou do databáze. Jak je na digramu vidět, ukládaná data aktivní metodou lokalizace a tou pasivní, jsou velice podobná. Liší se zejména uvedením kvality signálu, což může být rozhodující pro správné určení lokace. Více detailů o rozdílech je uvedeno v následujícím textu.

Všechny zprávy přijímané i vysílané serverovou instancí jsou ve formátu JSON[1].

[1] JSON: https://www.json.org/



Obrázek 4.1: Diagram zpracování a uložení dat centrální stanicí. Vlevo postup dat od zařízení a aktivní lokalizace, vpravo potom pasivní lokalizace a data od senzorů.

Určení správné lokace

Jakmile je funkční správné ukládání dat, přichází na řadu další subproces, který zajistí výpočet a určení pozice z nich. Nese název `count_positions` a opět musí pracovat dvojím způsobem.

Načítání dat z DB probíhá podobně u obou způsobů lokalizace. Načítány jsou záznamy, které obsahují stejné časové razítko. Předem není jasné, kolik senzorů, nebo zařízení bylo v jeden přesný čas dostupných a počet načtených záznamů tedy není předem znám. U pasivního způsobu je také problém, že mezi jednotlivými senzory není zřízena časová synchronizace. Mohou tedy měřit signály různých zařízení, v různé časy. Načítá se tedy od posledního času záznamu + (nastavením daný) počet sekund „dozadu“. Data jsou tak rozdělena na časové bloky, které jsou spojeny pod jeden údaj. Toto samozřejmě zavádí určitou nepřesnost při lokalizaci, jde ale o přijatelnou daň. Určení pozice totiž není nijak citlivě kritické a pokud je lokalizované zařízení ve stabilní pozici, není výsledek ovlivněn. Po načtení záznamů jsou pak rozděleny po jednotlivých lokalizovaných subjektech, jež jsou opět jedinečně identifikovány pomocí MAC adresy.

Po načtení dat přichází na řadu jejich vyhodnocení. **Pasivní** data obsahují pouze sílu signálu, naměřenu ve vztahu k lokalizovaným zařízením. Rozhodnutí, která lokace je správná je tak učiněno pouze na základě toho, který senzor zjistil největší sílu signálu k danému cíli. Z toho je pak možné určit a do databáze uložit, že v daném čase (nebo zde v časovém bloku) bylo zařízení umístěno v té lokaci, ke které je senzor přiřazen. Je asi cítit, že metoda

to není nikterak přesná a je silně zatížena chybami. Může ji ovlivnit nejen nepřesné měření, ale také umístění senzorů ve sledovaných prostorách.

Mírné vylepšení tohoto postupu přináší **aktivní** způsob lokalizace, jehož data obsahují krom síly signálu i jeho kvalitu. Kvalita je vyjádřena v procentech a jde o údaj poměru šumu oproti síle signálu. Může tedy nastat situace, že se zařízení nachází blízko přístupového bodu, naměří tedy vysokou sílu signálu, ale kvalita je kvůli překážkám nízká. V takovém případě může být za „nejbližší“ kotvu vybrána ta, která nemusí naměřit nejvyšší sílu, ale signál od ní je kvalitnější. Po řadě experimentů na naměřených datech, vyhodnocuje algoritmus přiřazení zařízení k přístupovému bodu a tedy i lokaci, způsobem popsaným následující rovnicí.

$$Value = signal_strength + (100 - quality) \tag{4.1}$$

Výsledná hodnota je tedy síla signálu a přičtený „doplněk kvality“. Pokud tuto hodnotu určíme pro každý záznam (určující měření údajů k jednomu z přístupových bodů), pak výsledný senzor, v jehož dosahu se zařízení nachází je ten, který tuto hodnotu má minimální. Je to i proto, že je síla signálu udávána v záporných číslech. Čím nižší, tím „blíže“ se přístupový bod nachází.

Samozřejmě je i tento způsob zatížen nepřesnostmi. Mimo již zmíněné nedostatky, je také problém, že tato metoda se spoléhá na oddělení jednotlivých rozlišovaných lokací překážkou. Ať už jde o stěnu, nábytek, nebo cokoli dalšího. Pokud by ve větší volné místnosti bylo potřeba oddělit dvě lokace, může dojít k chybám v závislosti na umístění jednotlivých přístupových bodů. Nicméně experimenty odhalily, že převažují případy, kdy jsou jednotlivé lokace logicky rozděleny fyzickými překážkami a tak i kvalita signálu hraje významnou roli. Dalším nedostatkem uvedené metody je také vyšší spotřeba energie. Mobilní zařízení jsou uzpůsobena k šetření a protože je Wi-Fi poměrně neúsporné, snaží se jej systémy uspávat, tedy neprodukovat žádný porvoz, pokud to není nutné. Neustálé vyzívání za účelem loklizace tedy musí přinést i vyšší spotřebu.

Poslední možností jak by bylo možné provádět lokalizaci z uložených dat, byla v době návrhu uvažována **trilaterace** (popsána v sekci 2.1.1). A to z dat naměřených jak ze senzorů, tak od zařízení. Systém by tak dostal do vínku možnost určit podoblast v dané lokalitě. Zároveň by bylo možné rozdělit oblast pokrytou jedním senzorem, na několik menších, bez nutnosti přidávání dalších přístupových bodů. Pro tento účel mělo v původním návrhu sloužit čerpání informace CSI, popsané v teoretické části 2.3.2. Mohlo by tak být dosaženo velice slušné přesnosti s mediánem chyby menším než jeden metr. Bohužel se ukázalo, že CSI není na drtivé většině Wi-Fi modulů vůbec (nebo jen velice těžko) dostupné, což je uvedeno v návrhu systému (kapitola 3). Bylo by také možné použít pouze standardně naměřenou RSSI, ale při testech vyšlo najevo, že určení vzdálenosti, dosahuje chyb i přes 5 metrů. Což je skutečně naprosto mimo přijatelné hodnoty.

Daná technika by také vyžadovala další vrstvu nastavení a dat. Nejen že by bylo nutné mít změřené přesně pozice jednotlivých senzorů, ale také by musely být nějakým způsobem uvedeny rozměry a tvary okrajů jednotlivých lokalit. Šlo by například s výhodou využít některou z prostorových postrelačních databází apod. Nicméně z důvodu nepoužitelné přesnosti, byla tato možnost ze systému vypuštěna.

Prezentační část

Posledním modulem užívaným pro obsluhu systému je prezentační program. S nadsázkou lze říci, že jde o jakousi API (Application programming interface). Tedy pouze programové

rozhraní, které umožňuje jednoduchý přístup k datům, uloženým v centrální databázi. Příkazy jsou opět ve formátu JSON a poskytují nejen čerpání dat, ale také možnost změny nastavení a doplnění údajů. Příklad rozhraní je uveden v příloze B. Zde je zřejmě veliký prostor pro různá rozšíření a přizpůsobení potencionálnímu zákazníkovi na míru.

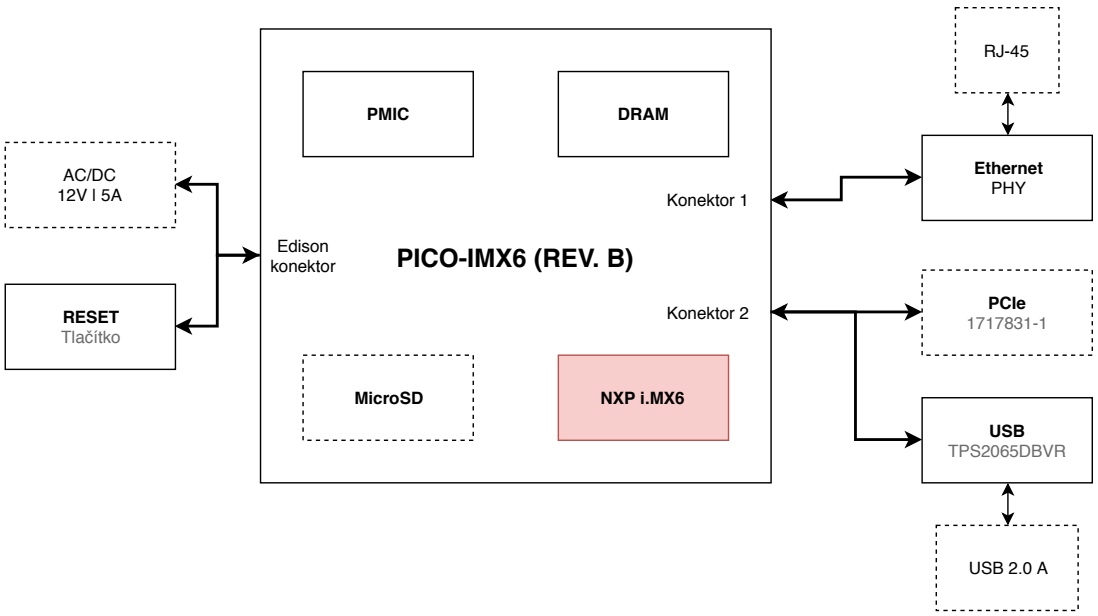
Dokonce díky tomu, že je centrální serverová instance koncipována kompletně kolem dat v DB, je možné vystavět kompletní vlastní aplikaci (např.: webovou), která by požadovaný přístup k datům zajistila. To je vhodné zejména pro naplnění zvláštních nároků uživatele na zobrazování dat.

Možné nastavení chování systému je celá řada. Předně jde o hodnoty jako *název SSID lokalizační sítě*, *síťové porty pro lokalizaci*, *doba mezi jednotlivými cykly měření* atp. Jedna z nejužitečnějších hodnot je ale *seznam MAC adres zařízení pro pasivní sledování*. Při pasivním měření dat na modulu dochází k zaznamenávání celé řady nechtěných informací, ze společného bezdrátového média. Tyto je potřeba filtrovat už na úrovni senzoru, neboť jejich odesílání a ukládání by velice nepříznivě ovlivnilo chod systému. Více podrobností o tomto je uvedeno v sekci věnované senzorům (4.2.2), která následuje. Aby bylo nastavení propsáno na senzory, je odesíláno jako odpověď na běžné zprávy obsahující naměřená data. Zavádí se tak prodleva při změnách, ale opět není nikterak kritická.

4.2.2 Bezdrátový senzor v roli přístupového bodu

Vytvořený Wi-Fi modul byl sestavován s ohledem na cenu, složitost obvodu a samozřejmě na splnění požadavků ohledně funkcionality. Uvedený blokový diagram (obr. 4.2) názorně zobrazuje jednotlivé části obvodu, které jsou dále podrobněji popsány. Popis je doplněn i snímkem reálného prototypu, s vyznačením těchto částí (příloha C.1). Jsou zhodnoceny i nejcitlivější nedostatky hardware a pokud to lze, navrženo i řešení do příštích verzí. Následuje popis software pro senzor, kde jsou popsány detaily funkčnosti.

Hardware senzoru



Obrázek 4.2: Diagram vytvořené první verze senzoru. (Čárkované jsou externí konektory.)

- **CPU Modul** – jak je z diagramu patrné, hlavní a největší částí je modul nazvaný PICO-IMX6[2], který obsahuje procesor, RAM paměť i konektor paměťové karty. Modul vyrábí firma TechNexion ve spolupráci s NXP, kteří dodávají procesory. Je postaven kolem CPU i.MX6[3], vybaveným jádrem Arm® Cortex-A9. Protože odpadla nutnost CSI zpracování, není ani takto silné jádro potřeba a mohla by se slabším HW být snížena cena. RAM paměť s kapacitou 512MB poskytuje více než dostatečné prostředky pro běh operačního systému. Modul byl zvolen především z důvodu zjednodušení obvodu. Při sériové výrobě i ale velice nepříznivě ovlivnil cenu celého senzoru a je tak na místě uvažovat o pevném umístění procesoru na tištěný spoj. Operační systém potom běží z připojené MicroSD karty, která také slouží jako nevolatilní úložiště. Modul je ke zbytku senzoru připojen třemi 70-pin Hirose konektory, z nichž jeden hlavní odpovídá standardu pro Edison konektor[4] od firmy Intel®. Další dva jsou doplňující pro různé externí signály.

- **Mini PCIe** – připojený konektor přímo k procesoru. Nejsou využity všechny nabízené prvky standardu, jako jsou SIM karta, nebo USB. Procesor dokáže pracovat i s novějšími kartami Wi-FI, je tedy možné využít dnes dostupné moduly na trhu. Důvod proč bezdrátový čip není přímo součástí obvodu je jednak zjednodušení a pak také cena, i když pokud bude potřeba dokoupit i tento modul, nemusí být poslední tvrzení pravdou. Díky připojenému pouze konektoru, je ale poskytnuta modulárnost senzoru a je tak možné vyměnit kartu za novější typ, bez nutnosti pořízení nového lokalizačního modulu. Což ale z komerčního hlediska pro potencionálního výrobce systému není příliš výhodné. Protože je ale rozhraní dostupné pouze jedno, je senzorová síť omezena na jednu frekvenční hladinu. Což už je znatelný nedostatek.

- **Napájení** – není kritickou oblastí návrhu. Senzory budou umístěny ve vnitřních prostorách s dostupnými zdroji energie. Wi-Fi není příliš úsporné a tak jedinou reálnou volbou se zdá být napájení přímo z veřejného elektrického obvodu. Baterie, nebo jiné mobilní zdroje napájení by byly nepraktické. Napájecí konektor je standardního typu 5.5/2.1, tedy běžný adaptérový s voltáží 5V. Zde je veliký prostor pro rozšíření, neboť napájecích technik ze sítě lze zvolit několik.

- **RESET tlačítko** – jako standardní a v podstatě jediný ovládací prvek bude připraveno tlačítko s funkcí *RESET*.

- **Ethernet** – pro komunikaci s centrálou a přenos internetového provozu, je modul osazen Ethernet řadičem a konektorem. Je tak možné (a ve stávající verzi nutné) jej připojit do lokální sítě kabelem. Řadič nese označení KSZ8081RNBCA-TR a nabízí pouze 100Mbps rychlost, což by mělo stačit plnit bezdrátové požadavky a zároveň příznivě ovlivnit cenu, oproti Gigabitovým rychlostem.

- **USB** – spíše jako doplněk je na obvod přidán ještě USB konektor. Může sloužit jako dodatečná paměť, ale nelze jím modul napájet. V dalších verzích by tedy mohl plnit více rolí.

[2] https://www.technexion.com/products/pico-compute-modules/detail/PICO-IMX6

[3] https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-based-processors-and-mcus/i.mx-applications-processors/i.mx-6-processors/i.mx-6solo-processors-single-core-multimedia-3d-graphics-arm-cortex-a9-core:i.MX6S

[4] https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/edison/sb/edison_pb_331179002.pdf

Snímek reálného vytvořeného prototypu s vyznačenými uvedenými částmi, lze nalézt v příloze C.1. Ve zmíněné sekci jsou také k vidění schémata zapojení.

Představená první verze senzoru zřejmě neoslní. Kvůli plánovanému využití CSI a zjednodušení výroby byl použit silně a zbytečně naddimenzovaný procesorový modul, který zásadně ovlivňuje cenu. Obvod je také okleštěn na nutné minimum (krom USB), ale některé dodatečné prvky by mohli najít uplatnění, jako například více druhů napájení, nebo grafický výstup. Chybí také jakékoli ladící a testovací výstupy. Řada nedostatků senzoru byla již uvedena dříve v textu, jako je nutnost kabelového připojení k síti, nebo omezení na pouze jednu frekvenční hladinu Wi-FI standardu.

S ohledem na nedostatky si dovolím uvést přibližný návrh další případné verze modulu, došlo-li by na jeho realizaci.

- Rozhodně přidat CPU přímo jako součást modulu. Nemusí být nikterak výkonný. Je potřeba pouze provozovat a přemosťovat internetový provoz, plus poskytovat možnost spuštění vlastního nenáročného programu. Cena návrhu by zřejmě byla vyšší, ale samotný výrobek by se stal mnohem dostupnějším.

- I na paměti RAM lze ušetřit. Věřím že dostačující by byly desítky MB.

- Napájení by jistě mohlo nabídnout lepší variabilitu. Umožnit například přivádět proud přes USB, tedy zapojené v režimu OTG (On-The-Go) by přineslo i další výhody. Také napájení po ethernetu (PoE, Power over Ethernet) by mohlo pomoci v sítí nepokrytých oblastech. Nicméně stále platí nevýhody neúsporného Wi-Fi, tedy mobilní napájení v daném standardu není relevantní.

- MiniPCIe konektor na stávající verzi sice nestojí mnoho a dovoluje jistou modularitu a svobodu. Nicméně nevýhodou mohou být odlišné vysílací výkony karet různých výrobců (horší přesnost lokalizace) a nutnost dokupovat takové prvky. Věřím že by se vyplatilo zakomponovat Wi-Fi modul přímo na desku spoje a to tak, aby mohly být pokryty obě frekvenční hladiny ($2.4GHz$ i $5GHz$). Nicméně konektor by mohl zůstat, jako možné bezdrátové připojení do lokální sítě, tedy jako náhrada za kabel. Toto ale může nepříznivě ovlivňovat provoz sítě, proto ponechat tuto možnost pouze jako variantu.

- Rozhodně by také měly být součástí obvodu testovací a ladící kontakty. Pokud bude přímou součástí procesor, neměly by tyto výstupy chybět.

- Vhodné také může být přidání grafického výstupu. Může pomoci při inicializaci a zavádění senzorů, ale kritické toto není. Takže jde o zvážení poměru cena ku využitelnosti.

Softwarová výbava senzoru

Díky osazenému procesoru uvedenému v minulé části textu, je možné využít nasazení operačního systému. Z důvodu plánovaného CSI čerpání padla volba na GNU/Linux Ubuntu s jádrem Debian. Nicméně by mohl být využit i jiný, více síťově zaměřený OS, například OpenWRT apod. Šlo by tak snížit potřebnou hardwarovou výbavu a tím i cenu.

Aplikace řídicí lokalizaci je potom, stejně jako centrální instance, napsaná v jazyce python. Zde je s výhodou využita nejen multiplatformnost a rozšířenost interpretu jazyka, ale také poměrně pohodlná práce s řetězci a voláním systémových nástrojů.

Před samotným popisem funkcí programu je vhodné uvést proces inicializace senzoru. Ve finálním produktu by samozřejmě pro tuto fázi nebylo místo a moduly by díky předchystanému médiu s operačním systémem byly připraveny hned k akci. Hodí se ale uvést nastavení hardware a systémových částí, což pomůže lepšímu pochopení fungování senzoru.

První fáze je instalace potřebných nástrojů, jako je interpret jazyka python3 a potřebných modulů, *hostapd* pro zřízení přístupového bodu a dalších. Zjišťují se také potřebná rozhraní a další systémové proměnné.

Následující fází je pak konfigurace nainstalovaných částí. První je úprava síťových rozhraní. Je přidáno přemostění s názvem `br0`, které zajišťuje že internetový provoz přístupný po kabelovém spojení, bude dostupný i ve vysílané bezdrátové síti. A to včetně DHCP. K zajištění provozu přístupového bodu je jako další nastaven již zmíněný **hostapd**. Jde zejména o nastavení využívaného frekvenčního kanálu, názvu SSID sítě apod. Také je zajištěno, že bude program spuštěn po restartu zařízení automaticky. Nastavuje tak kartu do režimu `access-point` Druhá podobná proprieta, jíž je nutné spouštět po startu systému, je přidání bezdrátového rozhraní `mon0`. To slouží k pasivní komunikaci na síti a přidáno je pomocí programu `iw`. Pro většinu dnešních Wi-Fi NIC modulů není problém provozovat dvě rozhraní a tak je karta zároveň v režimu `monitor`.

Monitorování bezdrátového provozu spoléhá na hlavičky paketů označované jako **RadioTap**[5]. Jde o metadata přidávaná k bezdrátovému provozu, z nichž k účelu lokalizace využívají senzory zejména sílu signálu. Nejde ale o data přenášená jakožto součást provozu. Jde spíše o doplnění až na zařízení příjemce, tedy přístupového bodu. Problémem tohoto přístupu však je, že není součástí *IEEE 802.11* standardu. A není tedy zaručena 100% správnost, nebo dostupnost těchto údajů. Jde ale o jedinou možnost, jak pasivní (tedy bez přičinění vysílače) lokalizaci provádět. Je proto umožněna i aktivní lokalizace, která zajišťuje plnou spolehlivost (i když ne přesnost).

Posledním krokem příprav je pak nastavení programu **arpalert**, jež sleduje provoz na síti a ukládá do souboru mapování MAC adres a jim přiřazených IP. Taková informace je pak využita k vytvoření provozu (který je tak možné sledovat a měřit), standardní aplikací **fping**.

Po úspěšné inicializaci je senzor připraven na běžný chod a po zprovoznění je spuštěna samotná python aplikace s následující funkcionalitou. Jako první je spuštěna smyčka, která se snaží odeslat UDP broadcast zprávu, kterou se senzor pokouší kontaktovat server a zapsat se do databáze. Pokud nedostane odpověď, vyčká 10 sekund a pokus opakuje. To umožní spustit senzory dříve než serverovou aplikaci.

Jakmile obdrží odpověď, která obsahuje nutná nastavení, jako je SSID název vysílané sítě, nebo seznam filtrovaných MAC adres zařízení, uloží toto nastavení a přechází do hlavní programové smyčky. Ta je spuštěna jako podproces nazvaný jednoduše `scanning`. Ten sbírá údaje tak, že paralelně spustí dva procesy.

- Jeden z běžících načte seznam k sobě (jakožto přístupovému bodu) připojených zařízení a jejich MAC adres. Dle mapování z programu `arpalert` se potom každé zařízení pokusí několikrát oslovit zprávou ICMP protokolu, tedy *pingem*. Pokud zařízení není aktivní v síti, nebylo by možné naměřit žádná data, paralelně běžícím procesem.

- Druhý subproces tedy zajišťuje monitorování provozu na síti. Na to je použit python modul `ScaPy`[6], který po 3 sekundy zaznamenává pakety ze sítě. Je jich samozřejmě

[5] https://www.radiotap.org/
[6] https://scapy.net/

obrovské množství (zejména pokud jsou zařízení aktivní na internetu), takže je po ukončení skenování filtruje. Vybírá jen ty, které mají MAC adresu odesílatele uvedenu v seznamu lokalizovaných zařízení a obsahují hlavičku RadioTap. Výsledek pak rozdělí na jednotlivé MAC adresy a z jejich zjištěných sil signálu spočítá průměr. Z experimentů totiž vyšel průměr jako nejvhodnější funkce pro složení naměřených hodnot.

Po dokončení operace skenování a měření je sestavena zpráva JSON formátu obsahující zjištěná data a odeslána na server. Senzor je pak uspán na doplněk doby zadaný nastavením a provede další iteraci po opětovném probuzení. Tak dochází k měření v určité časové bloky a to od všech senzorů. Sbírají se tak na serverové straně data pro určení správné lokace.

Z popisu vyvstávají jistě některé nedostatky. Jeden z největších je chybějící časová synchronizace, tedy pokud bude senzor, který má připojeno zařízení, zrovna ve fázi spánku, nemusí ostatní naměřit na daném zařízení žádný provoz. Tomu se dá částečně zabránit tak, že se nastaví fáze spánku kratší než je polovina fáze měření a skenování. I v tomto případě ale může nastat situace, kdy některý senzor provoz zachytí, ale jiný ne. Úplně vypustit fázi spánku je také možné, ale vždy bude potřeba nějaký čas na filtrování a odesílání dat. A i v tomto případě hrozí nezachycení provozu. Vzájemná synchronizace by tento problém odstranila zcela.

Další problém může být i nedostupnost, nebo nesprávnost RadioTap hlavičkových údajů. Nenalezl jsem ale jiný možný postup pasivního skenování, je nutné se tedy na tuto techniku zkrátka spolehnout. Hodí se zde také uvést fakt, že aby bylo možné sledovat síťový provoz, musí být všechny přístupové body nastaveny na stejný frekvenční kanál. To může vést ke vzájemnému rušení. Testy ale neodhalily, že by docházelo k výraznějšímu omezování provozu. Pokud tedy bude rozmístěno „rozumné“ množství senzorů, nemusel by tento problém nastat.

4.2.3 Aktivní přispění lokalizovaného zařízení

Pro zlepšení výsledků lokalizace, je poskytována možnost pokusit se o aktivní způsob získávání dat. Jde o metodu, kdy samo lokalizované zařízení aktivně vyhledává přístupové body v okolí a zjištěné údaje zasílá na server. Přidaná hodnota oproti pasivnímu způsobu je zejména možnost měřit kvalitu signálu. Ta vyjadřuje poměr síly signálu k lokálnímu šumu. Tato informace může výrazně pomoci zpřesnit výsledné určení lokace.

Ke zprovoznění stačí jednoduchých pár kroků, které jsou snadno implementovatelné. Vytvořena byla i zkušební aplikace, pro systém GNU/Linux, a její funkcionalitu zde uvádím jako příklad.

1. Jako první je potřeba zjistit, jakou má přiřazenu IP adresu server, kam hodláme výsledky posílat. Samozřejmě ji lze zadat ručně, ale je také možné využít odeslání broadcast datagramu, podobně jako je tomu u počátečního zapsání senzorů.

2. Jakmile máme k dispozici adresu, může být spuštěna hlavní smyčka.

   (a) Provedeme sken přístupových bodů v dosahu. Na systémech Linux je to možné příkazem `iwlist`, ale operace je to standardní a takřka jakákoli zařízení obsahující Wi-Fi musí být tohoto skenování schopná.

   (b) Zjištěné informace je potřeba filtrovat. Chceme jen přístupové body, které jsou součástí lokalizační sítě (mají správné SSID) a u těchto jde o informace nesoucí MAC adresu kotvy, sílu signálu a jeho kvalitu.

(c) Data je nutné formátovat a přidat informace o čase záznamu a MAC adresu zařízení.

(d) Přichystanou zprávu odešleme na server. Požadovaný formát zprávy je uveden dále.

Iterace je možné (a vhodné) provádět s časovým odstupem, například 5 sekund. Takto zajistíme, že naše zařízení samo napomáhá k dosažení vyšší přesnosti. Je zjevné, že častý sken okolí a odesílání dat, nebudou příliš šetřit baterii. I při pasivním způsobu lokalizace ale musí zařízení velice často vykazovat provoz na bezdrátové síti, tedy ve výsledku by k ušetření nemuselo dojít, pokud by aktivní způsob nebyl zvolen.

Také je možné zjišťovat a měřit data o okolních stanicích, aniž by bylo zařízení připojené do lokalizační sítě. Nicméně je potřeba v síti odesílat data určené pro centrálu, tedy připojení je doporučeno.

Uvedeno je zde ještě pro úplnost také rozhraní, resp. formát zpráv, který je nutný dodržet při komunikaci s centrální instancí. Opět se jedná o JSON formát.

```
{
    "command": "data-device",
    "mac": "XX:XX:XX:XX:XX:XX", # Mac adresa zarizeni
    "time": "2019-05-06 03:25:03", # Cas zaznamu
    "data": [
        {
            "mac": "XX:XX:XX:XX:XX:XX" # MAC adresa pristupoveho bodu
            "signal": "56" # sila signalu (dBm)
            "quality": "85" # kvalita signalu (%)
        },
        ...
        {}
    ]
}
```

Navržená aplikace nevyužívá v podstatě žádné speciální funkce. Jde o standardní Wi-Fi sken okolí, formátování zpráv a odeslání. Na nejpopulárnější systémy je samozřejmě možné takovou aplikaci předem vyvinout. Ať už se jedná o mobilní Android, či iOS, nebo i počítačové systémy jako Windows, Mac OS apod. Funkcionalita je však natolik jednoduchá, že zkušený uživatel zvládne aplikaci vytvořit i na nestandardním systému, jež používá zrovna on.

Kapitola 5

Testování

Systém byl testován v prostředí menší firmy v centru města Brna. Proběhlo vícero testovacích kol, během nichž se podařilo získat několik sad experimentálních výsledků za účelem ověření vlastností navrženého systému. Z těch bylo možné vyčíslit procentuální úspěšnost systému při určování správné místnosti. Protože cena jednoho navrženého senzoru je přeci jen poměrně vysoká, byl systém testován v nastavení, při kterém roli bezdrátových přístupových bodů zastaly jiné výpočetní stroje, jako notebooky, kancelářské počítače vybavené Wi-Fi, nebo jednodeskové počítače Raspberry Pi. Je pravdou že dané stroje jsou poměrné hodně odlišné, ale z pohledu sestaveného systému jde pouze o rozdíly v síle vysílačů bezdrátového signálu. A vzhledem k tomu, že jsou senzory připraveny na vložení externího Wi-Fi modulu, tak v podstatě tento stav odpovídá potencionálnímu reálnému nasazení.

5.1 Faktory ovlivňující přesnost

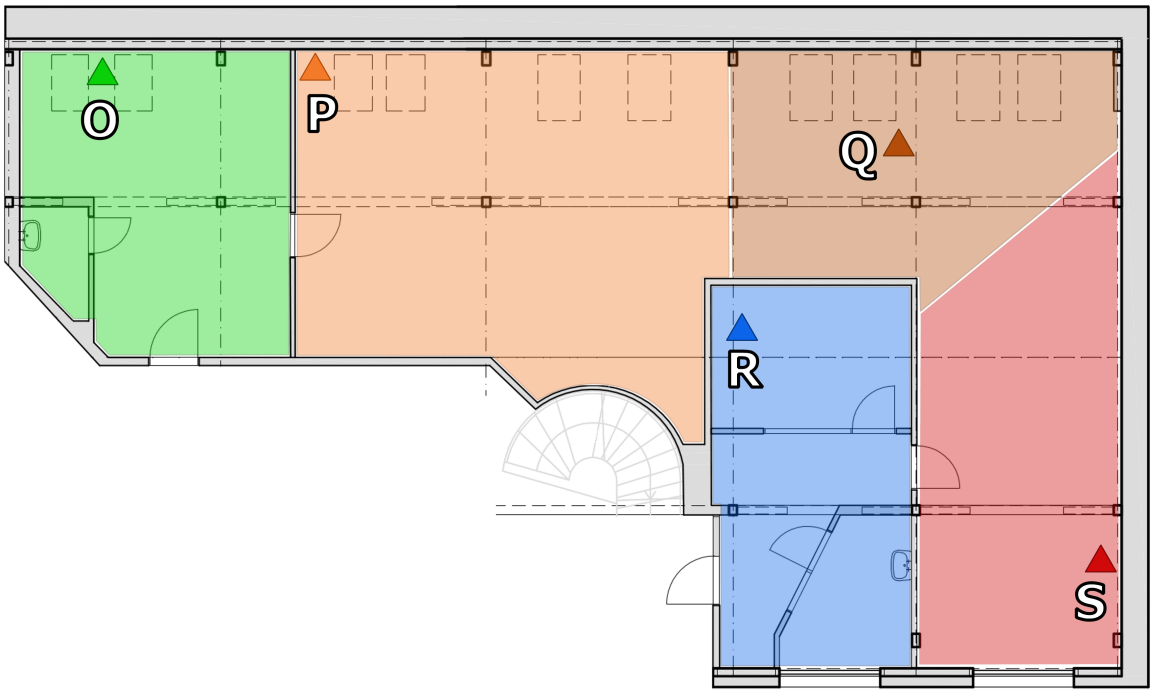
Při testování byla nejen ověřována úspěšnost systému, ale i působení faktorů, které na výsledek mohou mít vliv. Byly to zejména následující dva.

- **Počet a hustota pokrytí senzory.** Pokud je senzorů v oblasti příliš málo, měl by mít systém problém určit ten jeden správný. A to zejména v situacích a umístěních, kde ani jeden z přístupových bodů není v přímé viditelnosti ve vztahu k lokalizovanému zařízení.
- **Dynamické změny prostředí.** Pokud se v lokalizované oblasti pohybují lidé, nebo jiné překážky, může to mít negativní vliv na naměřené hodnoty RSSI. Jak znatelný to bude dopad bylo také předmětem testů.

Nasazený systém byl tedy testován v klidném prostředí a s rozumným pokrytím, jakožto referenční sada výsledků a v poměru k nim pak proběhly testy vlivu obou zmíněných faktorů. Naměřené a zhodnocené výsledky jsou uvedeny v následující části textu.

5.2 Naměřené výsledky

Na obrázku 5.1 je znázorněno rozložení senzorů v prostorách kanceláře. Barevně jsou také odděleny zamýšlené lokace, ke kterým má být zařízení přiřazováno. Pro referenční měření bylo rozmístěno celkem 5 přístupových bodů. Senzory označené jako P, Q a S pokrývají jeden společný velký prostor, další dva přístupové body jsou odděleny zdmi v samostatných místnostech.



Obrázek 5.1: Referenční rozložení pěti přístupových bodů (trojúhelníky)

Zařízení využitá pro sestavení systému, jsou uvedena v tabulce 5.1. Roli serverové instance převzal notebook Lenovo Y700 se systémem GNU/Linux Ubuntu. Databázi pak poskytl nástroj **XAMPP**[1].

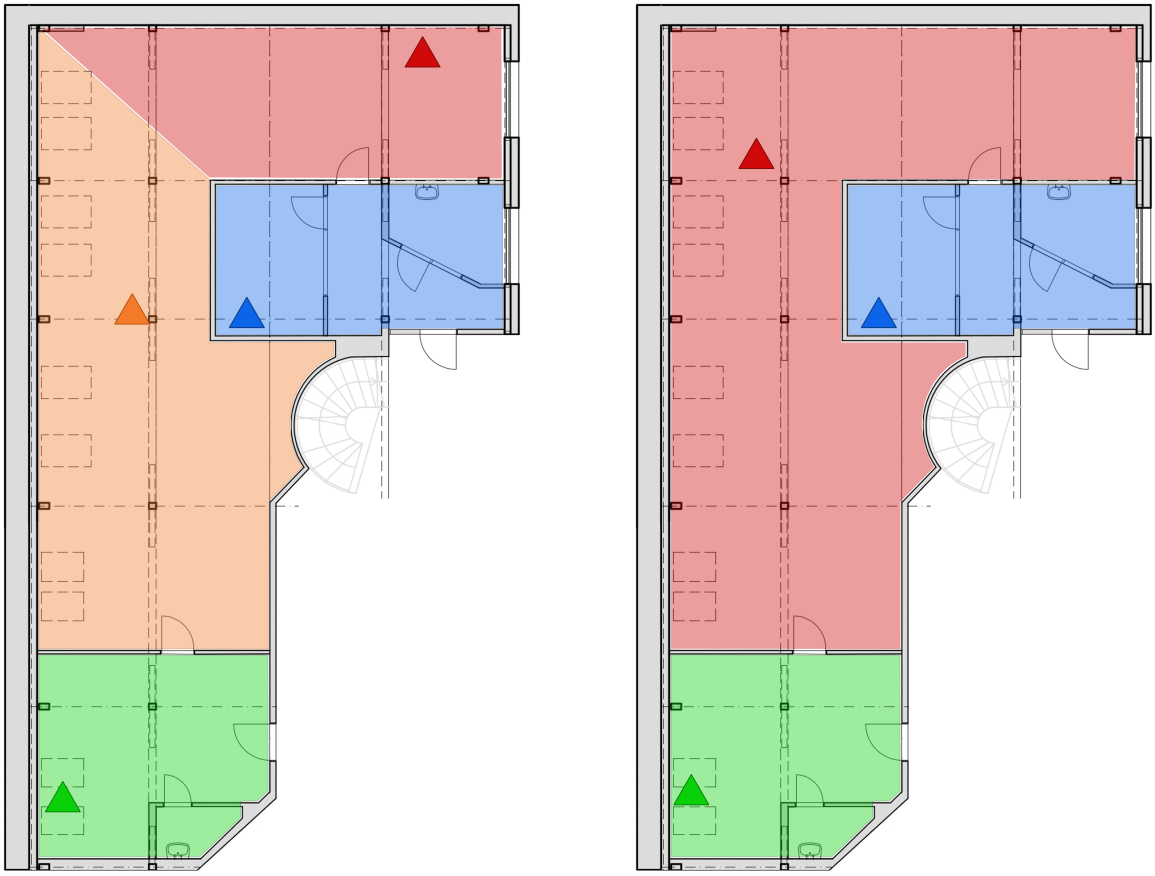
Tabulka 5.1: Zařízení využitá pro testování systému.

V roli senzorů (systém Ubuntu)	Lokalizovaná zařízení
ASUS K50IP	Sony VAIO (systém Fedora 29 + aktivní lok.)
ASUS M50V	Raspberry Pi 3 (Raspbian + aktivní lok.)
HP Pro Desk	Xaomi Redmi 3 (Android)
Intel NUC	Iphone 5s (iOS)
ASUS ZenBook UX360	Lenovo A1000 (Android)
	Samsung Galaxy S4 (Android)
	Nexus 6P (Android)
	Lenovo K10A40 (Android)

[1]XAMPP: https://www.apachefriends.org/index.html

Přesnost, tedy procentuálně vyjádřená úspěšnost určení správné lokace, v tomto nastavení dosahovala 70, 5% při pasivním lokalizování. Při tom aktivním to pak bylo 78 procent. Z hodnot je zřejmé, že je potvrzen předpoklad lepších výsledků, při aktivní variantě měření. Z testování také vyplynulo, že největší problémy způsobují pohybující se lokalizované cíle. A protože při testech bylo s lokalizovanými zařízeními pohybováno častěji, než by tomu bylo v reálném provozu, lze očekávat i lepší výsledky.

Další sada testů spočívala ve snižování počtu rozmístěných senzorů. Jak je vidět na obrázku 5.2, pokusil jsem se snížit počet nejdříve na 4, potom dokonce na 3 bezdrátové přístupové body.



Obrázek 5.2: Snížený počet přístupových bodů. Varianta vlevo – 4 senzory, varianta vpravo – pouze 3.

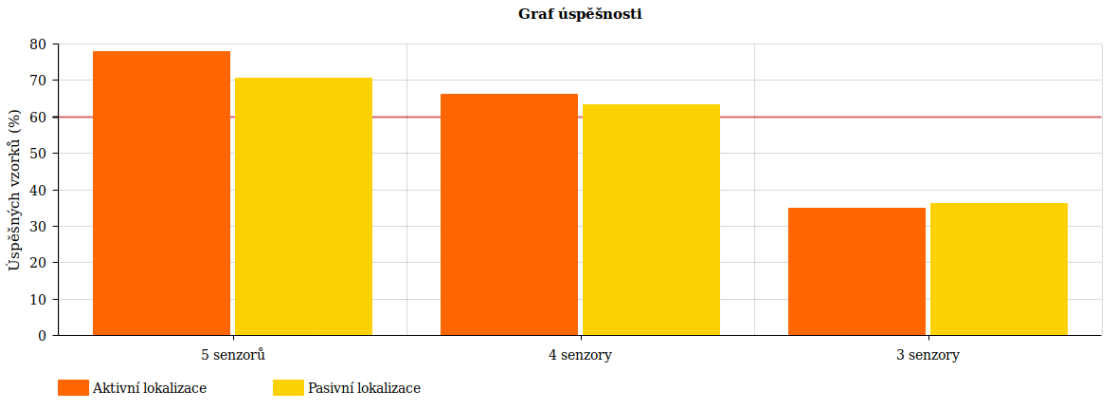
Dle očekávání, se při sníženém pokrytí prostoru snížila i úspěšnost měření. Pro variantu se čtyřmi senzory bylo naměřeno 63,2% správných výsledků pro pasivní způsob, pro ten aktivní pak 66,1%. Sledujeme tedy výrazný pokles přesnosti a to takřka pod hranici únosnosti. V případě, kdy byl počet přístupových bodů ještě více zúžen, úspěšné lokalizování se zdařilo u méně než 50 procent vzorků. Tato hranice už je jednoznačně nepřijatelná.

Dalším testovaným faktorem, byly dynamické změny v lokalizačním prostoru. Testování probíhalo umístěním několika zařízení na pevné pozice a kolem nich se pak pohybovali jak lidé, tak i nábytek. Došlo na zavírání a otevírání dveří, přesunování židlí, pojízdných polic, kartonových krabic apod. Zhoršení oproti klidnému provozu bylo maximálně 3 procenta, tedy vliv dynamického prostředí se nezdá být zásadní překážkou.

Předmětem testů byla i metoda vyhodnocování naměřených výsledků. Implicitní způsob pracuje načtením vzorků z jednoho měřicího cyklu. Pokouší se tak z jednoho měření určit pozici. Změna spočívala ve využití pěti a následně i deseti po sobě jdoucích hodnot, ale zásadní zlepšení nepřinesla. Eliminují se totiž některé chyby, ale ty které zůstávají, mají výrazně větší vliv.

5.3 Zhodnocení výsledků

Uvedený diagram znázorňuje vliv počtu senzorů na výslednou přesnost lokalizace. Jak je vidět, přesnost systému není nijak oslňující. Rozhodující faktor není pouze počet senzorů, ale také jejich vhodné umístění. Optimální stav by nastal, pokud by v každém místě zájmového prostoru, byl vždy alespoň jeden z přístupových bodů v přímé viditelnosti. Při takovém správném pokrytí a dlouhodobějším provozu, kdy by se projevilo zlepšení, způsobené méně dynamickými změnami poloh zařízení, by úspěšnost mohla citelně vzrůst. V takovém případě by se systém mohl stát skutečným pomocníkem pro lokalizaci v interiéru. Nicméně nelze jej využít tam, kde je přesnost kritická.



Obrázek 5.3: Graf srovnání referenčního měření a vlivů faktorů.

Firma, která spolupracovala na vytvoření zadání, by s jistými úpravami uvažovala o nasazení do provozu. Využít by systém šel nejen pro lokalizaci zařízení a pracovníků, ale také například jako doplněk k docházkovému systému. Zároveň při pohledu na požadavky uvedené v sekci 3.1 je možné určit zda a nakolik byly splněny.

Lokalizační část systému opravdu využívá pouze Wi-Fi technologie, bez použití dodatečných technik a nástrojů. Při použití navržených senzorů je ale s otazníkem minimální cena. V první verzi je síťový modul nelevnou záležitostí a to zejména z důvodu využití předimenzovaného procesorového jádra a operační paměti. Nejsou ale využita žádná speciální zařízení ani nestandardní prvky. Navržená druhá verze by tedy tyto nedostatky mohla eliminovat a cenu tak skutečně srazit na pomyslné minimum. Dodržena je ale snadná škálovatelnost. Pouhé připojení dodatečného senzoru stačí pro rozšíření působnosti lokalizačního systému. Bohužel nebylo možné využít přesných metod využívajících například trilaterace, nicméně rozlišení na úroveň místnosti je splněno za předpokladu co místnost, to senzor. A konečně umožnění pasivního sledování je taktéž splněno. Dokonce je doplněno o přesnější metodu s přispěním samotného lokalizovaného zařízení.

Během teoretického výzkumu a testování vyvstalo několik možných vylepšení. Nejvíce pozornosti by zasloužil samotný senzor a jeho hardwarová výbava. Také by ale mohlo být

vhodné využít možností fingerprintingu. Samozřejmě ne na takové úrovni, která by zabránila splnění požadavků snadné škálovatelnosti a zaveditelnosti. Ale například mobilní aplikace s možností zaznamenání dat v „hraničních“ pozicích jednotlivých oblastí, by mohla pomoci zvýšit přesnost na velice slušnou mez. Systém by musel být rozšířen o možnost pracovat s těmito daty a zároveň by byl uživatel nucen k dalšímu kroku při zavádění systému. Výsledné zlepšení by ale mohlo vyvážit tuto daň.

Kapitola 6

Závěr

Práce si kladla za hlavní cíl navrhnout a vytvořit systém pro určování polohy objektů v interiéru, na bázi bezdrátové sítě Wi-Fi. Byla tedy sestavena přehledová studie základních principů lokalizace a uvedeno několik příkladů vyvíjených a používaných systémů. Dále byla navržena detailní architektura a funkcionalita jejích jednotlivých částí. Uvedeny jsou detaily implementace vytvořené centrální instance, zodpovědné za zpracování dat a obslužného firmware lokalizačních modulů, dodávajících tato data. Součástí je i schéma zapojení a model desky plošných spojů pomocí nichž byl vytvořen prototyp takového modulu.

Práce se řídila sadou požadavků na výsledný systém. Ten tak pracuje pouze v síti Wi-Fi, umožňuje pasivní lokalizaci zařízení i její přesnější ekvivalent, který ovšem vyžaduje aktivitu hledaného subjektu. Využívá dostupné součásti i nástroje, čímž snižuje cenu nákladů a je také snadno škálovatelný i nasaditelný do provozu. Výsledkem je určování místnosti, nebo jiné lokace, ve které se nachází hledané zařízení.

Vytvořený systém byl otestován v prostorách interiéru malé vývojářské firmy. Výsledky s úspšností kolem 70 procent nejsou nikterak působivé, ale je zde veliký prostor ke zlepšení. Lze například zvýšit přesnost pouhým přeuspořádáním senzorů v prostoru. Také se ale otevírá řada hlubších vylepšení, jako je například částečný fingerpinting, které by mohly poskytnout značný přínos, za přijatelnou cenu.

Systém bych také rád do budoucna rozšířil o praktické doplňky, jako je možnost zavedení ve vícepatrových prostorách, přehledné a uživatelsky přívětivé rozhraní pro snadné ovládání a čtení dat, nebo aplikace na různé platformy umožňující aktivní lokalizaci.

Literatura

[1] Bahl, P.; Padmanabhan, V. N.: RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, ročník 2, March 2000, ISSN 0743-166X, s. 775–784 vol.2, doi:10.1109/INFCOM.2000.832252.

[2] Bolliger, P.: Redpin - Adaptive, Zero-configuration Indoor Localization Through User Collaboration. In *Proceedings of the First ACM International Workshop on Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments*, New York, NY, USA: ACM, 2008, ISBN 978-1-60558-189-7, s. 55–60, doi:10.1145/1410012.1410025.
URL http://doi.acm.org/10.1145/1410012.1410025

[3] Chan, S.; Sohn, G.: INDOOR LOCALIZATION USING WI-FI BASED FINGERPRINTING AND TRILATERATION TECHIQUES FOR LBS APPLICATIONS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ročník XXXVIII-4/C26, 06 2012: s. 1–5, doi:10.5194/isprsarchives-XXXVIII-4-C26-1-2012.

[4] Dardari, D.; Luise, M.; Falletti, E.: *Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques: A Signal Processing Perspective*. Elsevier Science, 2012, ISBN 978-0-123-82085-3.

[5] Gjengset, J.; Xiong, J.; McPhillips, G.; aj.: Phaser: Enabling Phased Array Signal Processing on Commodity WiFi Access Points. In *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '14, New York, NY, USA: ACM, 2014, ISBN 978-1-4503-2783-1, s. 153–164, doi:10.1145/2639108.2639139.
URL http://doi.acm.org/10.1145/2639108.2639139

[6] Gupta, D.; Joshi, S.: IN-BUILDING RADIO PROPAGATION AT 900 MHZ IN MULTI STORIED BUILDING. *International Journal of Distributed and Parallel systems*, ročník 2, 11 2011, doi:10.5121/ijdps.2011.2617.

[7] Halperin, D.; Hu, W.; Sheth, A.; aj.: 802.11 with multiple antennas for dummies. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, ročník 1, č. 40, Leden 2010: s. 19–25, ISSN 0146-4833, [Online; navštíveno 2019-01-11].
URL http://www.sigcomm.org/node/2821

[8] Kaplan, E. D.; Hegarty, C. J.: *Understanding GPS Principles and Applications*. Artech House, Inc., 2006, ISBN 1-58053-894-0.

[9] Kotaru, M.; Joshi, K.; Bharadia, D.; aj.: SpotFi: Decimeter Level Localization Using WiFi. In *Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication*, SIGCOMM '15, New York, NY, USA: ACM, 2015, ISBN 978-1-4503-3542-3, s. 269–282, doi:10.1145/2785956.2787487.
URL http://doi.acm.org/10.1145/2785956.2787487

[10] Kumar, S.; Gil, S.; Katabi, D.; aj.: Accurate Indoor Localization with Zero Start-up Cost. In *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '14, New York, NY, USA: ACM, 2014, ISBN 978-1-4503-2783-1, s. 483–494, doi:10.1145/2639108.2639142.
URL http://doi.acm.org/10.1145/2639108.2639142

[11] Malik, A.: *RTLS For Dummies*. Wiley Publishing, Inc., 2009, ISBN 978-0-470-39868-5.

[12] Pahlavan, K.; Levesque., A. H.: *Wireless Information Networks*. John Wiley and Sons, Inc., 2005, ISBN 978-0-471-72542-8.

[13] Schiller, J. H.: *Mobile Communications*. Addison-Wesley, 2003, ISBN 0-321-12381-6.

[14] Schmidt, R.: Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, ročník 34, č. 3, March 1986: s. 276–280, ISSN 0018-926X.

[15] Segev, J.: *IEEE P802.11 – Task Group AZ - MEETINGS UPDATE*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, [Online; navštíveno 10.01.2019].
URL http://www.ieee802.org/11/Reports/tgaz_update.htm

[16] Szabó, P.: Lokalizace počítačových zařízení ve WiFi sítích. 2015.

[17] Vasisht, D.; Kumar, S.; Katabi, D.: Decimeter-level Localization with a Single WiFi Access Point. In *Proceedings of the 13th Usenix Conference on Networked Systems Design and Implementation*, NSDI '16, Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2016, ISBN 978-1-931971-29-4, s. 165–178.
URL http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2930611.2930623

[18] Wi-Fi_Alliance: *Wi-Fi Generations*. Wi-Fi Alliance, Červenec 2013, [Online; navštíveno 10.01.2019].
URL https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi

[19] Wu, K.; Xiao, J.; Yi, Y.; aj.: FILA: Fine-grained indoor localization. In *Proceedings IEEE INFOCOM*, Orlando, FL, USA: IEEE, 2012, ISBN 978-1-4673-0773-4, s. 2210–2218, [Online; navštíveno 2019-01-11].
URL http://ieeexplore.ieee.org/document/6195606/

[20] Wu, K.; Xiao, J.; Yi, Y.; aj.: CSI-Based Indoor Localization. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, ročník 7, č. 24, Leden 2013: s. 1300–1309, ISSN 1045-9219, [Online; navštíveno 2019-01-11].
URL http://ieeexplore.ieee.org/document/6244790/

[21] Xie, Y.; Li, Z.; Li, M.: Precise Power Delay Profiling with Commodity WiFi. In *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and*

Networking - MobiCom '15, New York, NY, USA: ACM Press, 2015, ISBN 978-1-4503-3619-2, str. 53–64, [Online; navštíveno 2019-01-11].
URL http://doi.acm.org/10.1145/2789168.2790124

[22] Youssef, M.; Agrawala, A.: The Horus WLAN Location Determination System. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '05, New York, NY, USA: ACM, 2005, ISBN 1-931971-31-5, s. 205–218, doi:10.1145/1067170.1067193.
URL http://doi.acm.org/10.1145/1067170.1067193

[23] Zhu, X.; Feng, Y.: RSSI-based Algorithm for Indoor Localization. *Communications and Network*, ročník 05, 01 2013: s. 37–42, doi:10.4236/cn.2013.52B007.

Příloha A

Obsah paměťového média

Obsah přiloženého CD/DVD je rozdělen na tři hlavní části.

- `Technicka_zprava` nepřekvapivě obsahuje zdrojové kódy pro vygenerování této zprávy. Ta je vytvořena pomocí LaTeX šablony poskytnuté na stránkách `http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/.cs`.
- `Navrh_senzoru` obsahuje jednak zdrojové soubory pro program Eagle (v. 9.2.2), ale také BOM soubor se seznamem jednotlivých součástek a vygenerované GERBER soubory, které byly použity pro výrobu prototypu.
- A konečně adresář `Zdrojove_kody` je také rozdělen na tři podčásti. Obsahuje zdrojové kódy v jazyce python a další soubory, které zajišťují funkčnost serverové instance, lokalizačního senzoru a samotného lokalizovaného zařízení.

```
xkohou03
├── Zdrojove_kody
│   ├── Server_app
│   │   ├── server_position_resolver.py
│   │   ├── server_net.py
│   │   ├── server_data_process.py
│   │   ├── server-config.json
│   │   ├── server_api.py
│   │   ├── README.md
│   │   └── locator-server.py .4 config_local.py
│   ├── Sensor_app
│   │   ├── sensor_passive_scan.py
│   │   ├── sensor_net.py
│   │   ├── sensor-config.json
│   │   ├── README.md
│   │   ├── locator-sensor.py
│   │   ├── install/
│   │   ├── get_ping_once.sh
│   │   ├── get_mac_ip_map.sh
│   │   ├── get_connected.sh
│   │   └── config_local.py
│   └── Device_app
│       └── locator-device.py
├── Technicka_zprava
│   ├── zadani.pdf
│   ├── xkohou03-Lokalizace-ve-WiFi-30-prilohy-appendices.tex
│   ├── xkohou03-Lokalizace-ve-WiFi-20-literatura-bibliography.bib
│   ├── xkohou03-Lokalizace-ve-WiFi-01-kapitoly-chapters.tex
│   ├── xkohou03-Lokalizace-ve-WiFi.tex
│   ├── template-fig/
│   ├── obrazky/
│   ├── Makefile
│   ├── fitthesis.cls
│   └── bib-styles/
└── Navrh_senzoru
    ├── GERBER.zip
    ├── Eagle
    └── DIP-WiFi_Loc_BOM.ods
```

Příloha B

Příklad API příkazů

Součástí systému není grafické rozhraní. Je pouze implementováno programové rozhraní pro přizpůsobení na míru uživateli. Uvádím zde příklady takového způsobu ovládání.

```
1
2  # Pro pridani pasivne lokalizovaneho zarizeni
3  {
4     "command": "add-device",
5     "name": "Honza pracovni telefon",
6     "mac": "54:27:58:05:bb:0b"
7  }
8  # -> Odpoved:
9  {
10    "command": "response",
11    "state": "ok",
12    "data": "Zarizeni pridano!"
13 }
```

```
1
2  # Pro prisouzeni senzoru lokaci:
3  {
4     "command": "add-sensor-to-location",
5     "sensor-name": "V relax mistnosti",
6     "location-name": "Relax mistnost"
7  }
8  # -> Odpoved:
9  {
10    "command": "response",
11    "state": "ok",
12    "data": "Nove propojeni ulozeno"
13 }
```

```
1
2  # Pro ziskani lokace pasivni metodou merene
3  {
4     "command": "get_passive_location",
5     "name": "Honza pracovni telefon",
6     "time_from": "2019-05-19 12:00:00",
7     "time_to": "2019-05-19 15:00:00"
8  }
9  # -> Odpoved:
10 {
11    "command": "response",
12    "state": "ok",
13    "data": [
14        {
15            "location": "Relax mistnost",
16            "recorded_at": "12:02:00"
17        },
18        {
19            "location": "Relax mistnost",
20            "recorded_at": "12:06:00"
21        },
22        {
23            "location": "Zasedacka A",
24            "recorded_at": "12:08:00"
25        }
26     ]
27 }
```

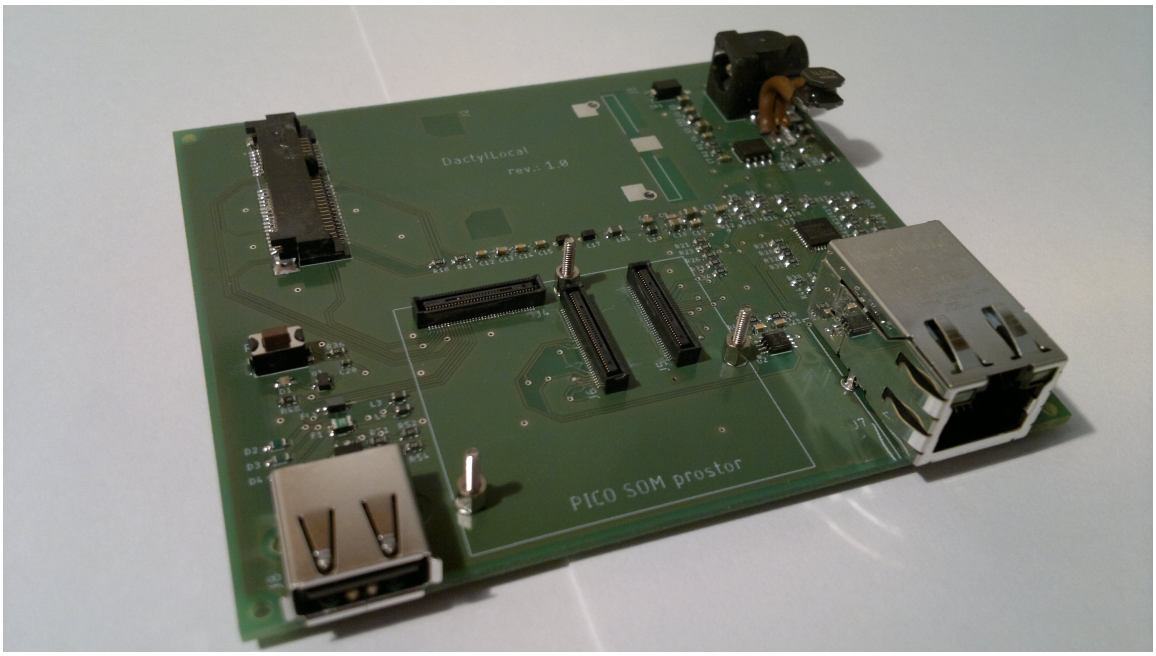
Příloha C

Lokalizační modul

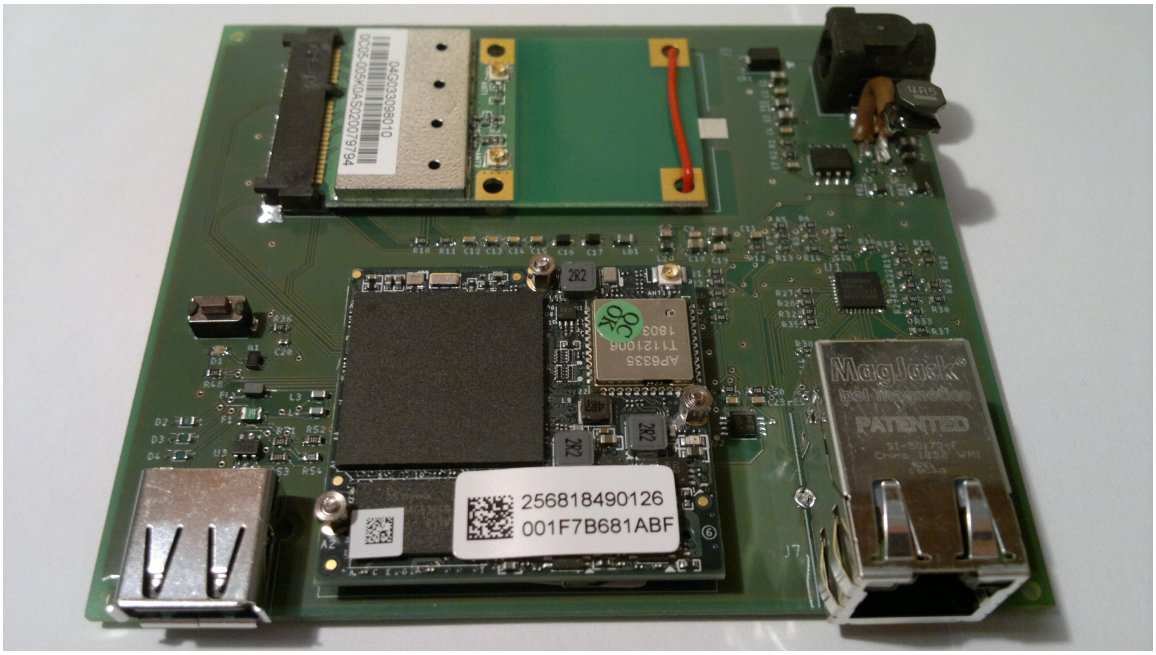
Senzor je složen z několika dílčích částí. V této kapitole je uvedeno schéma zapojení, navržený model desky tištěného spoje a nechybí ani snímek vytvořeného prototypu.

C.1 Foto vytvořeného prototypu

S ohledem na cenu, byl vytvořen jediný prototyp senzoru.



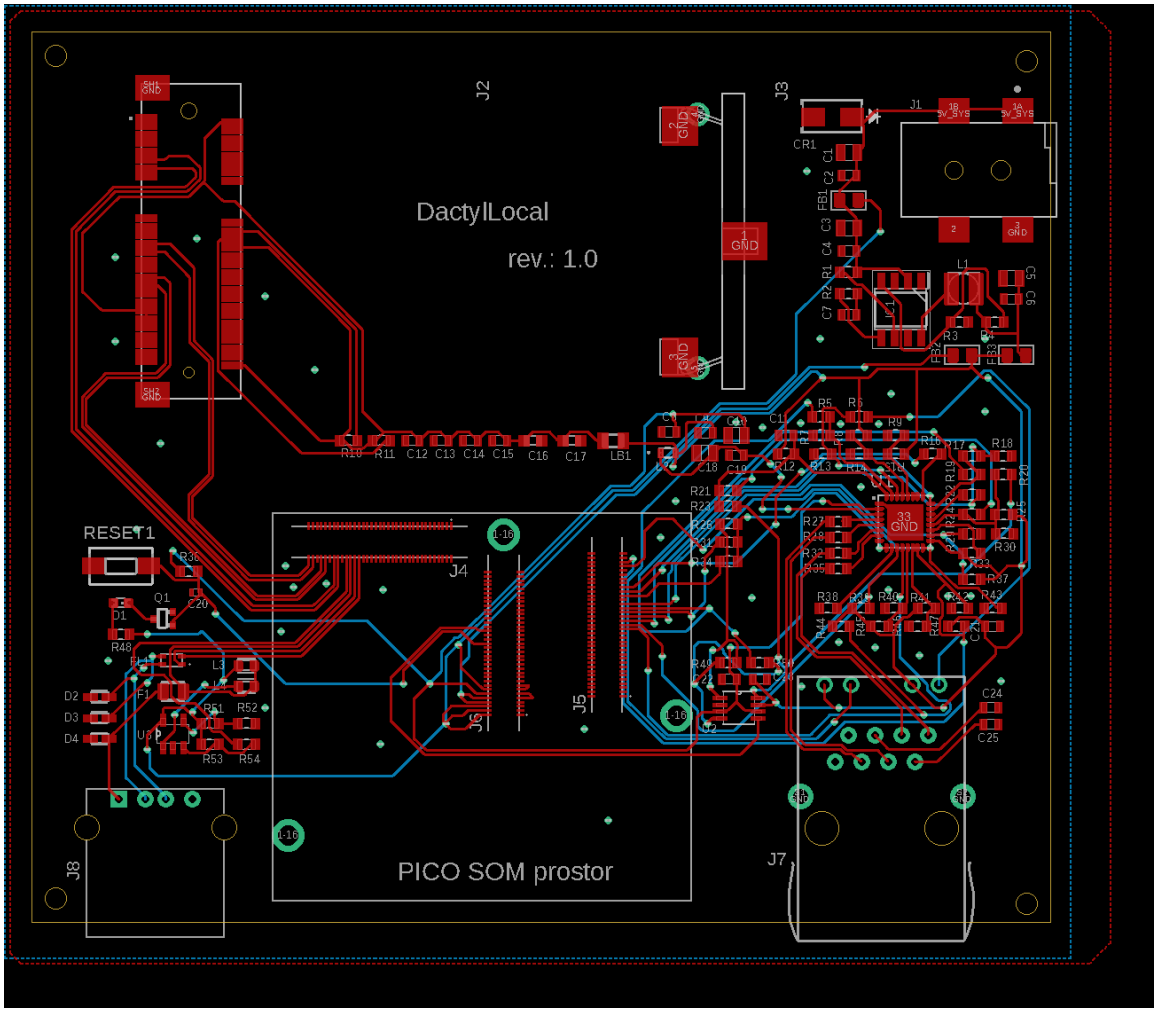
Obrázek C.1: Samotná deska tištěného spoje.



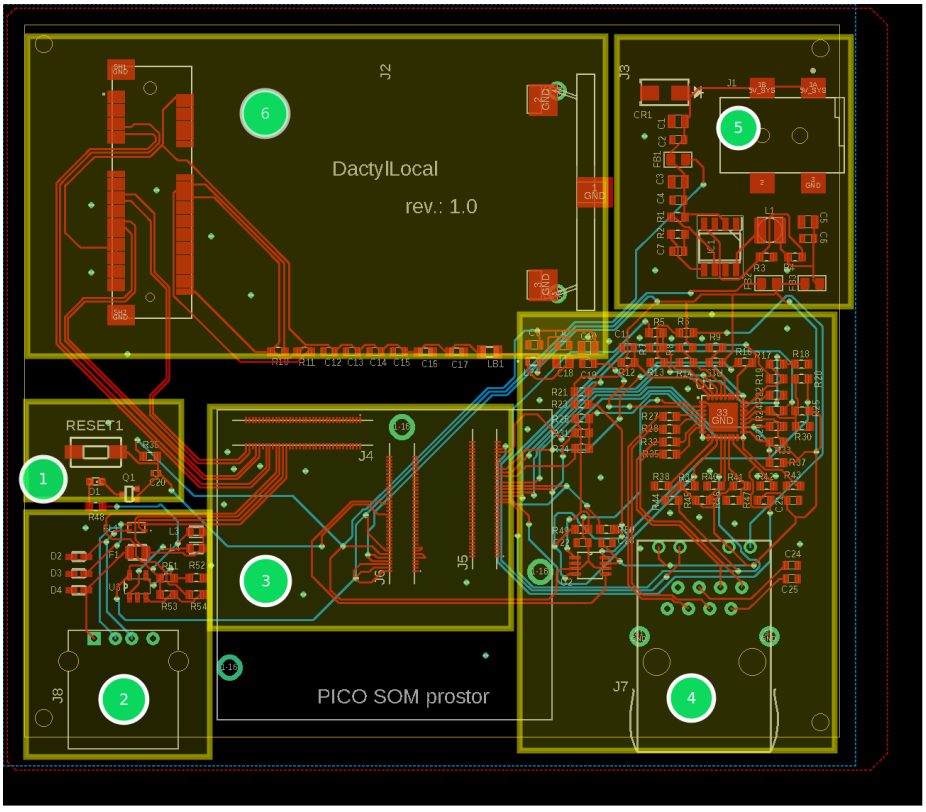
Obrázek C.2: Prototyp senzoru osazený CPU modulem i Wi-Fi.

C.2 Model desky tištěného spoje

Všechny části byly orientovány na horní vrstvu a stejným směrem, pro snadné strojové osazení.



Obrázek C.3: Tištěný spoj.



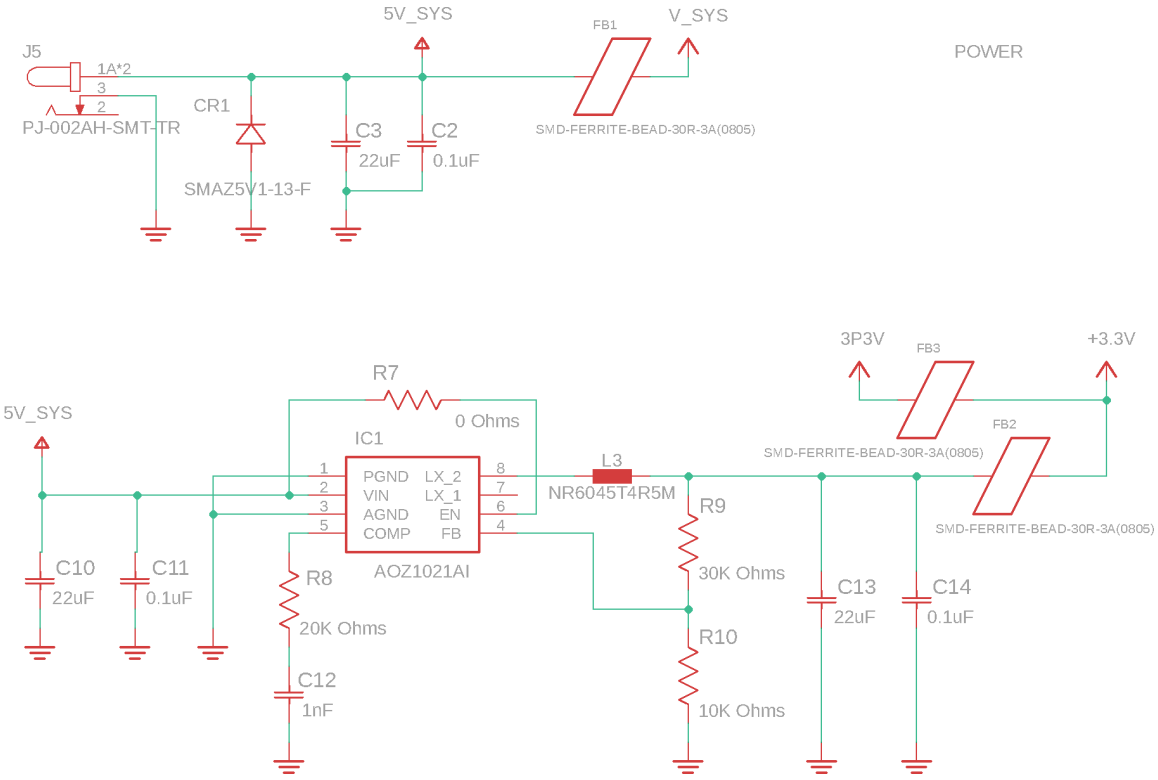
Obrázek C.4: 1. RESET, 2. USB, 3. CPU, 4. Ethernet, 5. Napájení, 6. PCIe

C.3 Schéma obvodu přístupového bodu

Následující stránky obsahují ukázky schémat zapojení jednotlivých částí obvodu senzoru.

C.3.1 Napájení obvodu

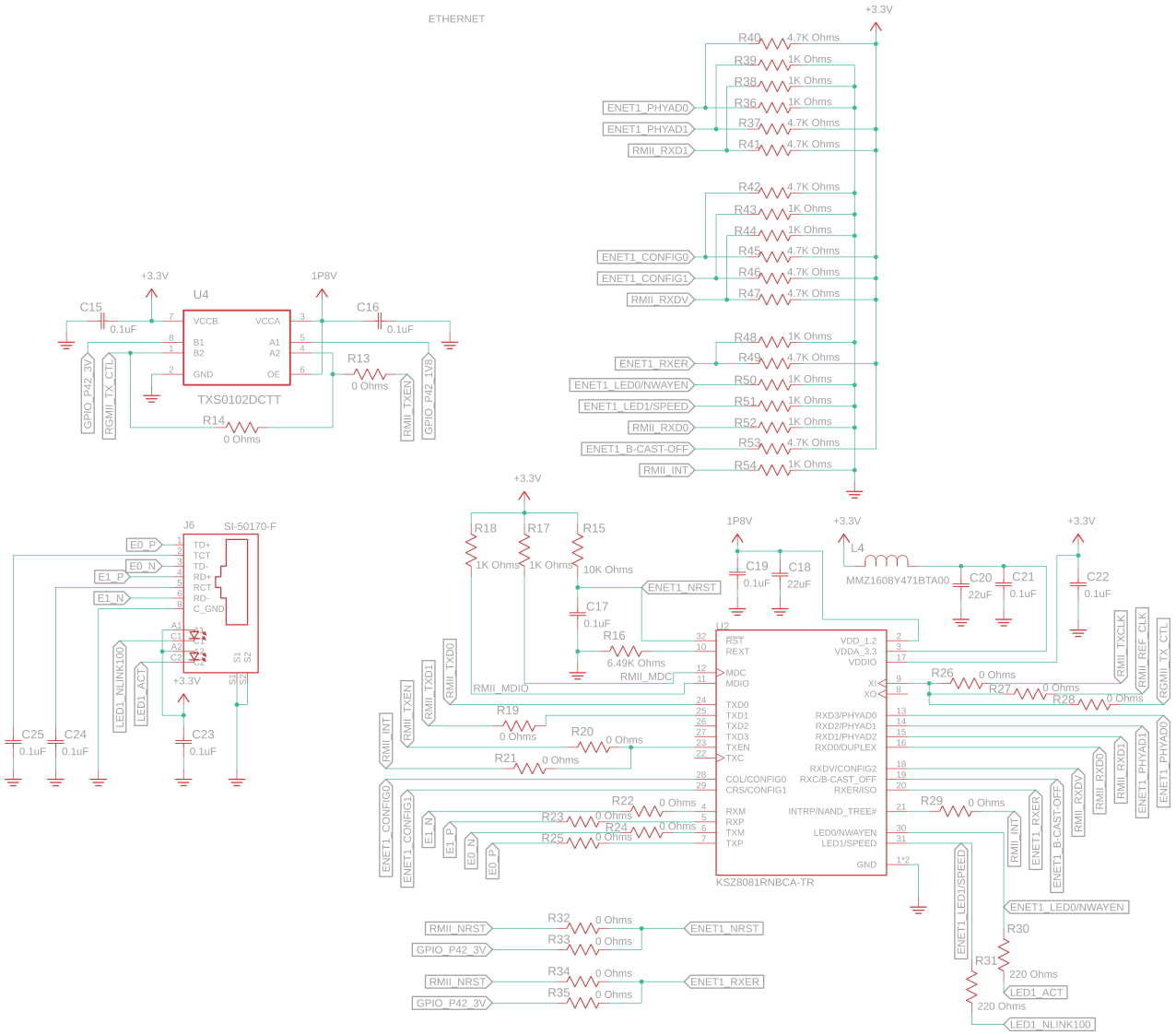
Napájení 5V je zajištěno ze sítě, standardním konektorem $2x5mm$



Obrázek C.5: Schéma napájení obvodu.

C.3.2 Ethernet

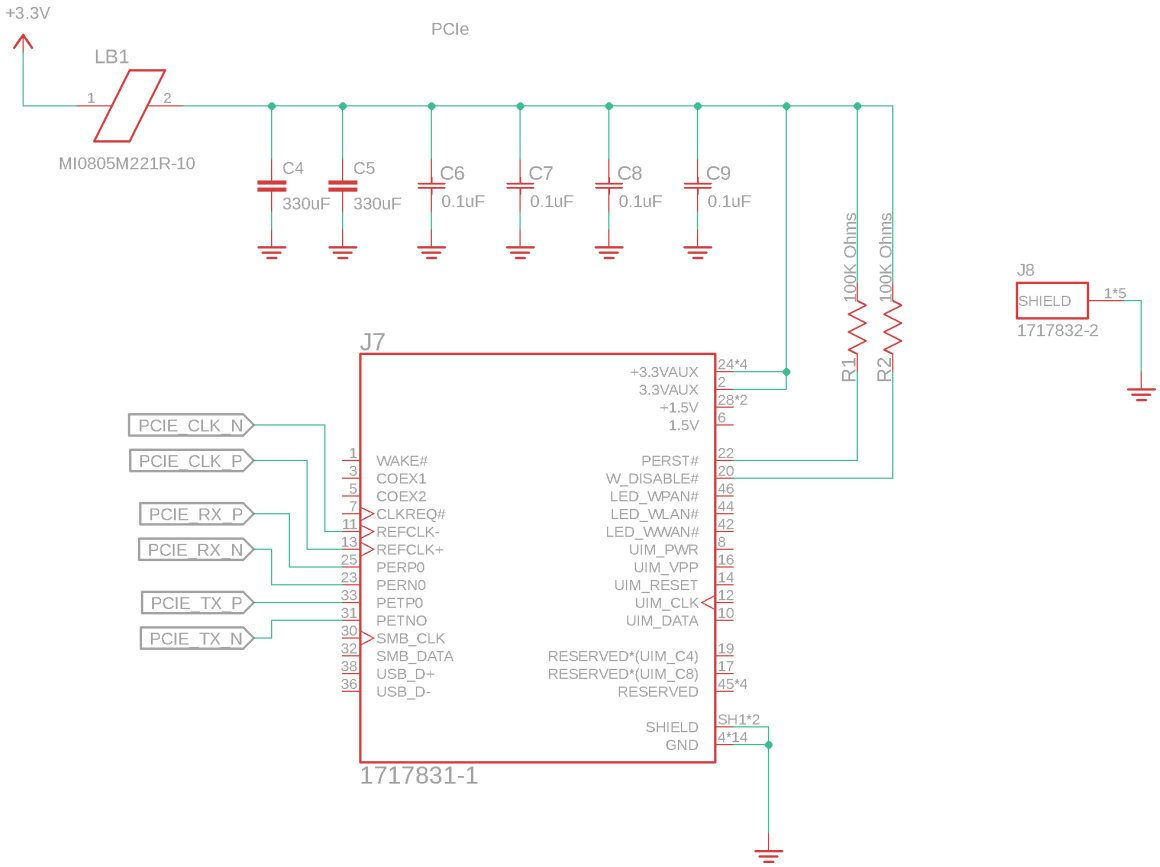
Schéma kabelového síťového přopojení, včetné konektoru a řadiče.



Obrázek C.6: RJ45 konektor a řadič *KSZ8081RNBCA-TR*

C.3.3 Mini PCIe konektor

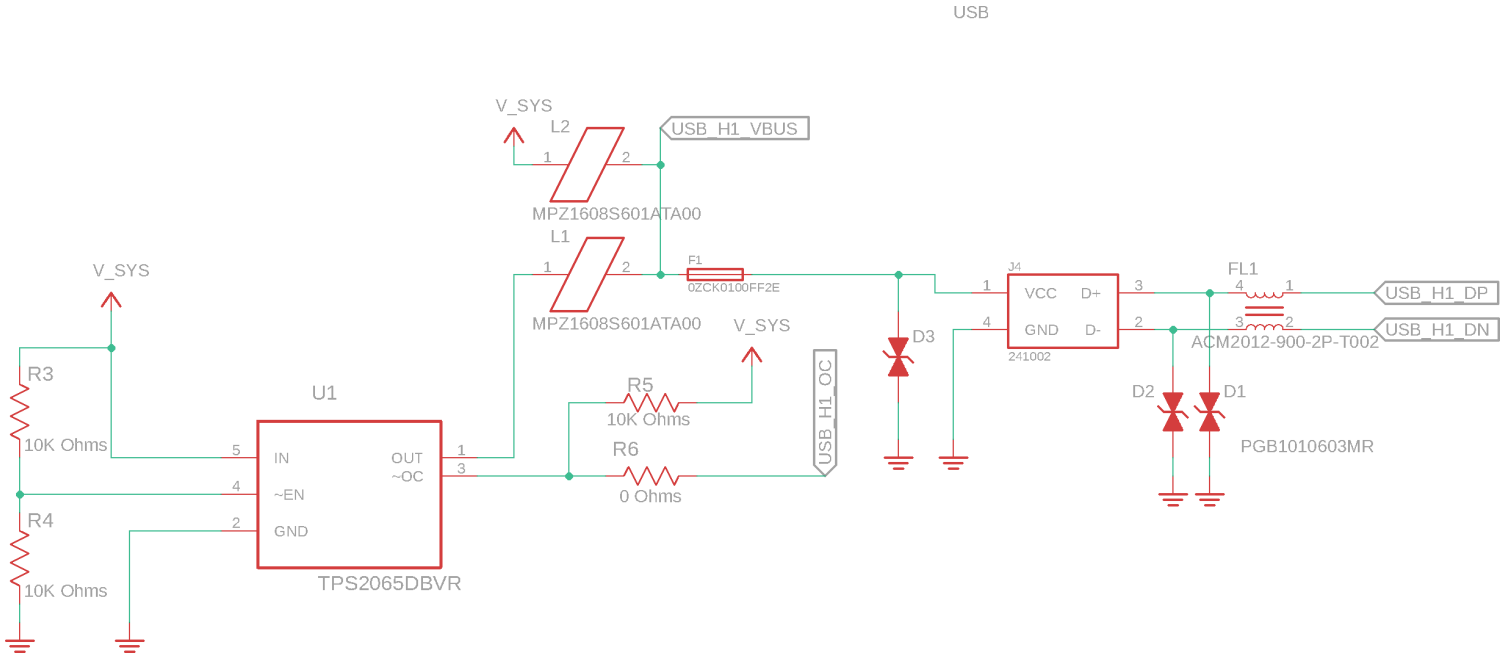
Konektor pro připojení bezdrátového Wi-Fi modulu.



Obrázek C.7: Schéma zapojení PCIe konektoru.

C.3.4 USB konektor

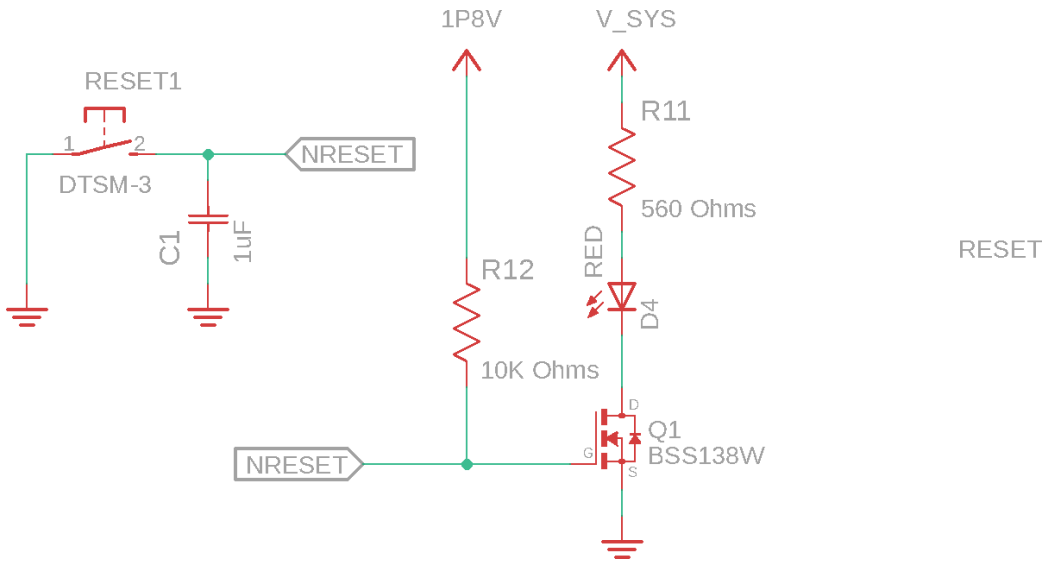
Konektor pro připojení USB úložiště.



Obrázek C.8: Schéma zapojení USB konektoru.

C.3.5 Reset tlačítko

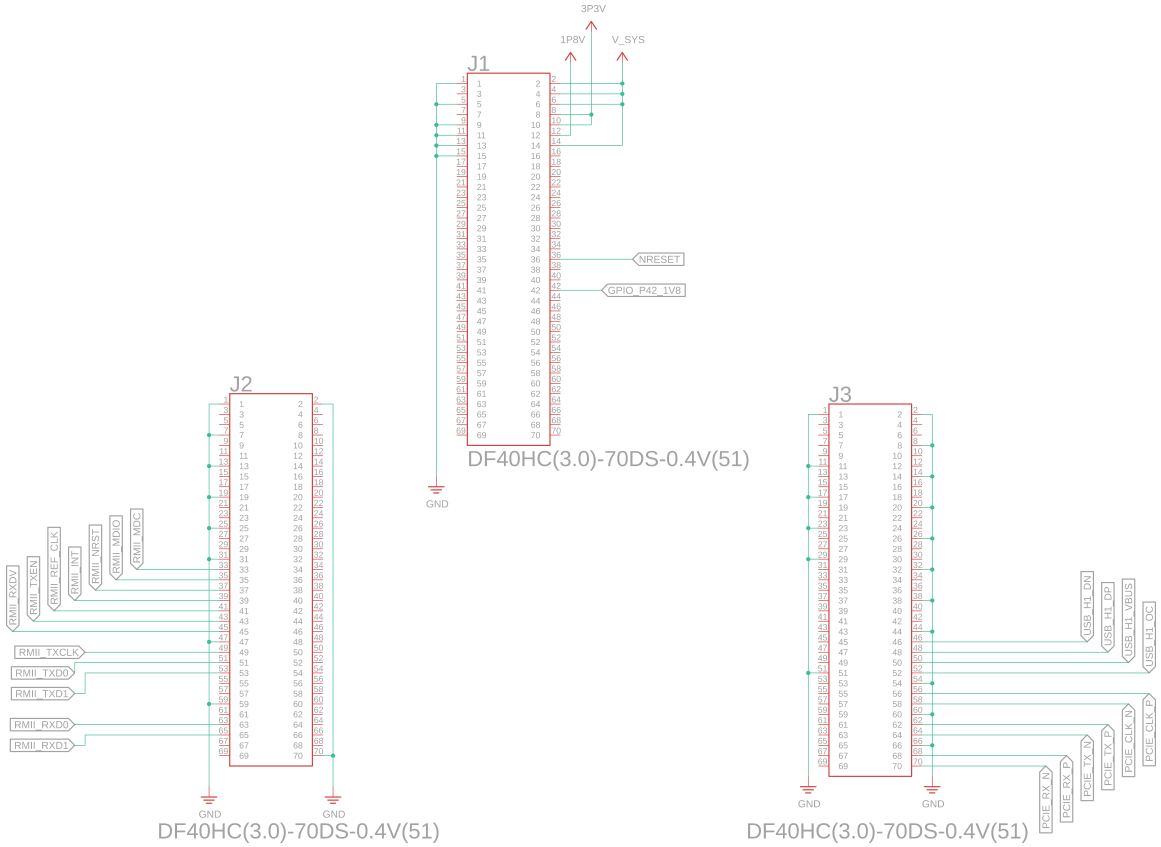
Jediný ovládací prvek na modulu.



Obrázek C.9: Schéma zapojení RESET tlačítka.

C.3.6 Konektory pro připojení procesorového modulu

Procesor, včetně pamětí, je připojen trojicí Hirose konektorů.



Obrázek C.10: Hirose konektory.