

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

Lokalizační technologie pro mobilní zařízení

Bakalářská práce

Autor: Tomáš Pařízek
Studijní obor: Aplikovaná informatika (AI3)

Vedoucí práce: prof. RNDr. PhDr. Antonín Slabý, CSc.

Hradec Králové

Srpen 2021

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.

V Hradci Králové dne 11.8.2021

Tomáš Pařízek

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. RNDr. PhDr. Antonínu Slabému, CSc. za metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval společnosti DAMI Development s.r.o. a Univerzitě Hradec Králové za zapůjčení testovacích zařízení.

Anotace

Předmětem práce „Lokalizační technologie pro mobilní zařízení“ je srovnání 4 populárních technologií umožňujících určení polohy mobilního zařízení – GNSS, Bluetooth RSSI, Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT. Začátek práce obsahuje popis jednotlivých technologií s jejich charakteristikami a limitacemi. Následující kapitoly se zabývají sérií experimentů zkoumajících reálné vlastnosti technologií a vliv modelu zařízení na výsledek měření. Práce může sloužit jako podklad pro volbu technologie a modelu zařízení při návrhu systému pracujícího s lokalizací zařízení. Výsledky měření testovaných technologií se shodují ve faktu, že lokalizace zařízení vždy obsahuje určitou míru chybovosti, která je závislá na zvolené technologii, modelu zařízení a vlastnostech prostředí. Obecně řečeno, při lokalizaci pomocí technologií dnešní doby, můžeme očekávat chybovost měření v řádech jednotek metrů.

Annotation

Positioning technologies for mobile devices

The Bachelor thesis „Positioning technologies for mobile devices“ focuses on a comparison of 4 popular technologies used for determining the location of mobile devices – GNSS, Bluetooth RSSI, Wi-Fi RSSI, and Wi-Fi RTT. The beginning of the thesis describes individual technologies with their characteristics and limitations. Later chapters contain a series of experiments that examine positioning measurement results in various real world conditions and the variability of measurement accuracy between mobile device models. This thesis and its experiments may be used as a resource material when designing a system, which requires a positioning technology. The results of all tested technologies have one thing in common – the measurements always contain a certain amount of error. The exact error rate depends on chosen technology, mobile device and the environment, but generally speaking, we can expect errors in the range of single meters.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce a metodika zpracování.....	2
3	Lokalizační technologie.....	3
3.1	GNSS.....	3
3.2	Lokalizace v indoor prostředí.....	6
3.2.1	Bluetooth RSSI.....	7
3.2.2	Wi-Fi RSSI.....	9
3.2.3	Wi-Fi RTT.....	10
4	Metodika.....	11
4.1	Mobilní aplikace.....	11
4.1.1	GNSS.....	11
4.1.2	Bluetooth RSSI.....	16
4.1.3	Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT.....	20
4.2	Prostředí.....	27
4.2.1	Outdoor prostředí – GNSS technologie.....	27
4.2.2	Indoor prostředí – Bluetooth Beacons, Wi-Fi a Wi-Fi RTT technologie	31
5	Analýza naměřených dat.....	36
5.1	GNSS.....	36
5.1.1	Stacionární test.....	36
5.1.2	Test jízdy automobilem.....	41
5.2	Wi-Fi RSSI.....	46
5.3	Bluetooth RSSI.....	49
5.4	Wi-Fi RTT.....	51
5.4.1	Vzdálenost.....	53

5.4.2	Směrovost.....	55
6	Závěr, shrnutí výsledků a doporučení.....	57
7	Seznam použité literatury	59
8	Přílohy.....	61

Seznam obrázků

Obr. 1 Ukázka trilaterace	4
Obr. 2 Snímek obrazovky aplikace GPS Info zobrazující přijatý signál od GNSS satelitů	5
Obr. 3 Porovnání formátu zpráv iBeacon, AltBeacon a Eddystone	9
Obr. 4 Usecase diagram funkcí GNSS aplikace	11
Obr. 5 Ukázka vyžádání povolení pro přístup k GNSS senzoru iOS zařízení.....	12
Obr. 6 Ukázka vyžádání povolení pro přístup k GNSS senzoru Android zařízení....	13
Obr. 7 Ukázka přístupu k GNSS senzoru iOS zařízení	13
Obr. 8 Ukázka přístupu k GNSS senzoru Android zařízení	14
Obr. 9 Uživatelské rozhraní GNSS aplikace pro iOS zařízení	15
Obr. 10 Ukázka přístupu k Bluetooth senzoru iOS zařízení	17
Obr. 11 Ukázka přístupu k Bluetooth senzoru Android zařízení	18
Obr. 12 Uživatelské rozhraní aplikace pro měření Bluetooth RSSI na Android zařízení	20
Obr. 13 Ukázka vyhledání Wi-Fi sítí v okolí Android zařízení	22
Obr. 14 Ukázka ověření dostupnosti Wi-Fi RTT	23
Obr. 15 Ukázka přístupu k Wi-Fi RTT senzoru zařízení	24
Obr. 16 Uživatelské rozhraní Wi-Fi aplikace na Android zařízení	26
Obr. 17 Měření záznamů z GNSS senzorů zařízení.....	28
Obr. 18 Trasa testu jízdy ve městské zástavbě	30
Obr. 19 Trasa testu jízdy po městském okruhu.....	30
Obr. 20 Trasa testu jízdy po rychlostní silnici	30
Obr. 21 Google Nest Wi-Fi.....	32
Obr. 22 Estimote Bluetooth Beacons.....	32
Obr. 23 Půdorys budovy	33

Obr. 24 Diagram měření směrovosti Wi-Fi RTT.....	35
Obr. 25 Korelace mezi počtem záznamů a vzdáleností od průměrné polohy	39
Obr. 26 Histogram vzdálenosti od celkové průměrné polohy.....	40
Obr. 27 Wi-Fi RSSI průměr	46
Obr. 28 Wi-Fi RSSI směrodatná odchylka	46
Obr. 29 Bluetooth RSSI průměr	49
Obr. 30 Bluetooth RSSI směrodatná odchylka	49
Obr. 31 Histogramy Wi-Fi RTT měření.....	51
Obr. 32 Histogram měření vzdálenosti Wi-Fi RTT	53
Obr. 33 Histogram měření směrovosti Wi-Fi RTT.....	55
Obr. 34 Diagram měření směrovosti Wi-Fi RTT	55

Pokud u obrázku není uveden zdroj, tak zdrojem obrázku je autor práce.

Seznam tabulek

Tabulka 1 Databázová tabulka pro záznam GNSS polohy.....	15
Tabulka 2 Databázová tabulka pro záznam Bluetooth RSSI měření	19
Tabulka 3 Databázová tabulka pro záznam Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT měření.....	25
Tabulka 4 Přehled počtu záznamů polohy během stacionárního testu	36
Tabulka 5 Rozdíly mezi průměrnými polohami zařízení ve stacionárním testu	37
Tabulka 6 Statistická analýza vzdálenosti od celkové průměrné polohy.....	40
Tabulka 7 Přehled počtu záznamů polohy během jízdy automobilem	42
Tabulka 8 Statistická analýza počtu záznamů polohy během jízdy automobilem ..	42
Tabulka 9 Přehled záznamu délky jízdy během jízdy automobilem	44
Tabulka 10 Statistická analýza záznamu délky jízdy během jízdy automobilem	45

Tabulka 11 Statistická analýza Wi-Fi RSSI.....	47
Tabulka 12 Statistická analýza Bluetooth Beacons RSSI	50
Tabulka 13 Statistická analýza Wi-Fi RTT měření	52
Tabulka 14 Statistická analýza Wi-Fi RTT měření vzdálenosti	53
Tabulka 15 Statistická analýza směrovosti Wi-Fi RTT	56

1 Úvod

Mobilní elektronická zařízení se v posledních letech stala součástí každodenního života lidí po celém světě. Počet uživatelů mobilních telefonů se každoročně zvyšuje. V roce 2020 byl na světě počet lidí s mobilním telefonem 3,5 bilionu [1]. Kategorie mobilních elektronických zařízení může obsahovat veškerá přenosná elektronická zařízení jako například mobilní telefony, tablety a chytré hodinky.

S příchodem 4. průmyslové revoluce (anglicky Industry 4.0) se více společností snaží automatizovat své interní procesy. Existuje velké množství způsobů automatizace, ale mezi ty nejčastější se řadí právě využití mobilních elektronických zařízení. Příkladem automatizace může být například sklad expediční společnosti, kde zaměstnanci pracují s aplikací běžící na mobilním telefonu. Aplikace má neustálý přístup k aktuálnímu stavu skladu, proto je schopná zaměstnance informovat o úkolech, plánovat optimální pořadí plnění úkolů atd.

Mobilní elektronická zařízení poskytují aplikacím přístup k sensorům, díky kterým aplikace mohou získávat informace o stavu zařízení. Jednou ze schopností sensorů je například určení fyzické polohy zařízení v reálném světě. Typickým využitím polohy zařízení jsou navigační aplikace, ale tato informace může být využita i pro jiné účely – například monitoring polohy zaměstnanců v předešlé ukázce skladové Industry 4.0 aplikace.

V rámci této bakalářské práce se primárně zaměříme na určování polohy pomocí technologií GNSS, Bluetooth RSSI, Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT. Při lokalizaci zařízení hraje důležitou roli prostředí, ve kterém se zařízení nachází. Obecně můžeme prostředí rozdělit do dvou hlavních kategorií: určování polohy uvnitř budovy – indoor (například sklad) nebo v otevřeném světě – outdoor (například silniční navigace). Tato práce se zabývá s oběma kategoriemi – indoor i outdoor.

2 Cíl práce a metodika zpracování

Hlavním cílem práce „Lokalizační technologie pro mobilní zařízení“ je seznámit čtenáře s metodami umožňujícími určení polohy mobilního zařízení v reálném světě – GNSS, Bluetooth RSSI, Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT. Mimo samotného popisu vlastností a limitací jednotlivých technologií, bude součástí práce i série experimentů, které budou postupně zkoumat chování testovaných technologií za různých podmínek. Cílem experimentů bude zejména zjištění chybovosti a ostatních vlastností výsledků měření. Kapitola Analýza naměřených dat detailně rozebere výsledky měření, včetně porovnání dat z různých modelů měřících zařízení za stejných podmínek (vliv modelu zařízení na výsledek měření). Závěr práce shrne všechny předchozí kapitoly a vyvodí z nich doporučení. Výslednou práci bude možné použít jako podklad pro volbu zařízení a technologie při návrhu systému pracujícího s lokalizací zařízení.

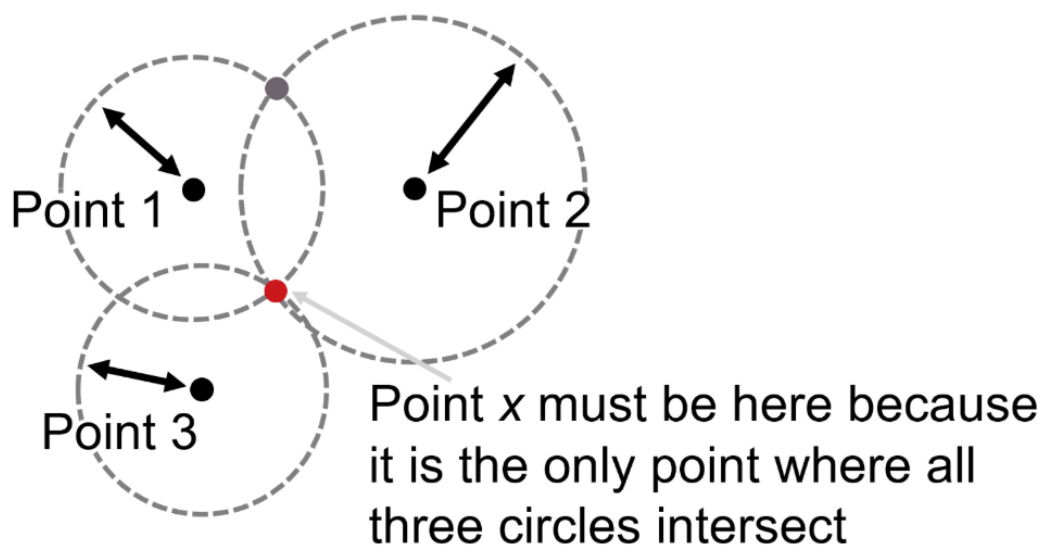
3 Lokalizační technologie

Lokalizační technologie umožňují určení pozice mobilního zařízení v reálném světě. V dnešní době existuje mnoho lokalizačních technologií, a ačkoliv všechny mají stejný cíl, tak samotný proces určení polohy se mezi nimi liší. Jednotlivé technologie mají rozdílné vlastnosti v různých prostředích, proto není možné jednoznačně určit nejlepší a nejhorší technologii.

Během procesu určení polohy zařízení hraje zásadní roli prostředí, ve kterém se zařízení nachází. Lokalizační technologie můžeme rozdělit do 2 hlavních kategorií na základě optimálního prostředí pro jejich využití – indoor a outdoor. Indoor lokalizace je lokalizace v předem definovaném prostředí obvykle o menší rozloze; standardně se jedná o lokalizaci zařízení v rámci budovy. Outdoor technologie umožňují určit polohu zařízení kdekoliv na světě, ale jejich přesnost se obvykle výrazně snižuje, pokud se zařízení nachází uvnitř budovy. Typickým využitím outdoor lokalizace jsou například navigační aplikace pro zařízení umístěná v automobilech [2].

3.1 GNSS

GNSS je zkrácená verze anglického názvu technologie Global Navigation Satellite System [3], jenž je možné přeložit do českého jazyka jako Globální satelitní polohový systém. Základem GNSS technologií je síť satelitů vysílajících signál, který obsahuje aktuální polohu satelitu a čas v momentě odeslání signálu. Mobilní zařízení stanoví svoji polohu příjmem tohoto signálu, ze kterého je možné určit vzdálenost mezi daným satelitem a mobilním zařízením porovnáním rozdílu mezi časem odeslání a přijetí signálu [4]. Pokud je mobilní zařízení schopno určit vzdálenost své pozice alespoň od 3 satelitů, může stanovit svoji polohu pomocí trilaterace měření. Čím vyšší je počet satelitů, tím vyšší je přesnost výsledného určení polohy [3].



Obr. 1 Ukázka trilaterace

Zdroj obrázku: [5]

Obr. 1 obsahuje ukázkou výpočtu pozice zařízení trilaterací měření. Body *Point 1*, *Point 2*, *Point 3* reprezentují GNSS satelity. Každý bod je středem kružnice o průměru stanoveném vzdáleností mezi mobilním zařízením a pozicí daného satelitu. Pozice mobilního zařízení se nachází v průsečíku všech kružnic (červený bod na obrázku). Ukázka na obrázku je pro zjednodušení situace ve dvojrozměrném prostředí, ale stejný postup je možné aplikovat i v trojrozměrném prostředí, ve kterém pracuje mobilní zařízení při určení polohy GNSS technologií [5].

Jednou z prvních a v dnešní době nejznámějších GNSS technologií je GPS (Global Positioning System). GPS vyvinuly Spojené státy americké původně pro armádní účely, ale v dnešní době je tato technologie veřejně dostupná bez poplatků. Mezi další populární GNSS systémy dnešní doby patří například ruský systém Glonass, systém Evropské unie Galileo, nebo čínský systém BeiDou-2 [3].

Operační systémy mobilních zařízení standardně poskytují vývojářům nadstavby pro získání polohy zařízení, čímž vývojáře odstíní od samotného výpočtu polohy na

základě přijatého signálu z GNSS satelitů. Operační systém může pro výpočet polohy kombinovat satelity odlišných GNSS systémů, protože hrubý princip určování polohy je vždy stejný [2][6].



Obr. 2 Snímek obrazovky aplikace GPS Info zobrazující přijatý signál od GNSS satelitů

Obr. 2 je snímek obrazovky z volně dostupné aplikace GPS Info (<https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.slybeaver.gpsinfo>), která zobrazuje přehled přijatých signálů od GNSS satelitů. Na snímku obrazovky je vidět, že mobilní zařízení přijalo signál z různých GNSS systémů – GPS, BeiDou-2, Glonass a QZSS. Snímek obrazovky byl vytvořen 14.1. 2021 v 08:03 v lokalitě město Hradec Králové na zařízení Nokia 8 s operačním systémem Android 9. Pro měření byla použita nejnovější verze aplikace GPS Info v době tvorby této práce – verze 3.2.11.

3.2 Lokalizace v indoor prostředí

Lokalizace v indoor prostředí má totožný cíl s lokalizací v outdoor prostředí (určení polohy zařízení v reálném světě), ale využívá rozdílné metody lokalizace vzhledem k rozdílnému v prostředí. Technologii GNSS, jež byla popsána v předešlé kapitole, je samozřejmě možné použít i uvnitř budov, ale nejedná se o standardní postup vzhledem ke výrazně snížené přesnosti lokalizace pomocí GNSS v indoor prostředí.

Většina indoor lokalizačních technologií se zakládá na principu rozmístění vysílacích zařízení (dále také „vysílače“) ve sledovaném prostředí. Mobilní zařízení mají k dispozici informace o poloze vysílačů v prostředí a mohou měřit signál, jež vysílače vysílají. Kombinace těchto 2 informací umožňuje mobilnímu zařízení stanovit svoji polohu v prostředí.

Lokalizace pomocí technologií Bluetooth RSSI a Wi-Fi RSSI je založena na síle přijatého signálu – RSSI¹ [7]. Technologie Wi-Fi RTT určuje vzdálenost mezi mobilním zařízením a vysílačem sofistikovanějším způsobem, který je schopen zajistit vyšší přesnost, viz kapitola 3.2.3 Wi-Fi RTT.

Existuje mnoho metod výpočtu polohy v prostředí na základě naměřených dat od vysílacích zařízení. Jednou z nejjednodušších metod je trilaterace, která polohu určí poměrovým porovnáním měření a pozic vysílacích zařízení. Detailnější popis trilaterace se nachází v kapitole 3.1 GNSS, jelikož totožný způsob výpočtu polohy používají i GNSS technologie.

¹ RSSI je zkratka pro Received signal strength indication, česky Indikace síly přijímaného signálu.

Lokalizační technologie založené na principu měření signálu vysílaného vysílacím zařízením často negativně ovlivňuje reálné chování signálu v prostředí. Typickou příčinou chyby v měření může být odraz vysílaného signálu (například o stěnu budovy), díky kterému přijatý signál vzdálenějšího vysílače může být silnější než signál vysílače nacházejícího se blíže.

WLFA neboli Wi-Fi location fingerprint algorithm je jedním ze způsobů zvýšení přesnosti indoor lokalizace. Princip algoritmu se zakládá na vytvoření radiové mapy prostředí. WLFA rozděluje prostředí do sektorů. Čím vyšší je počet sektorů (sektory jsou menší), tím vyšší je výsledná přesnost určení polohy. Při implementaci WLFA je nutné provést referenční měření v každém sektoru prostředí. Radiová mapa je přehled referenčních měření pro každý sektor prostředí. Mobilní zařízení pro určení své polohy změří signál vysílaný vysílači a následně vyhledá sektor v radiové mapě s nejpodobnějšími hodnotami referenčního měření [8]. Přesnost WLFA je možné dále zvýšit tím, že při výběru sektoru s nejpodobnějším měřením aplikace bude zvyšovat prioritu sektorů nacházejících se blíže poslední známé poloze zařízení. Dalším možností optimalizace WLFA je například využití neuronové sítě pro vyhledání sektoru zařízení [9]. Radiová mapa obsahuje reálné hodnoty měření v sektorech prostředí, z čehož vyplývá, že dopad vlastností chování signálu v prostředí (například odrazy signálu) má menší negativní vliv na přesnost lokalizace zařízení.

3.2.1 Bluetooth RSSI

Bluetooth je bezdrátová komunikační technologie primárně určená pro mobilní zařízení. Technologie pro komunikaci využívá, stejně jako Wi-Fi, radiové vlny o frekvenci 2,4 GHz; konkrétně 2,402 GHz až 2,480 GHz [10].

V dnešní době existují 2 verze Bluetooth – Bluetooth Classic a Bluetooth Low Energy, jež je často označováno jako Bluetooth LE nebo BLE. Varianta Classic je starší než BLE, ale paradoxně umožňuje rychlejší komunikaci (vyšší maximální Mb/s rychlost). Hlavní nevýhodou Bluetooth Classic je větší energická náročnost

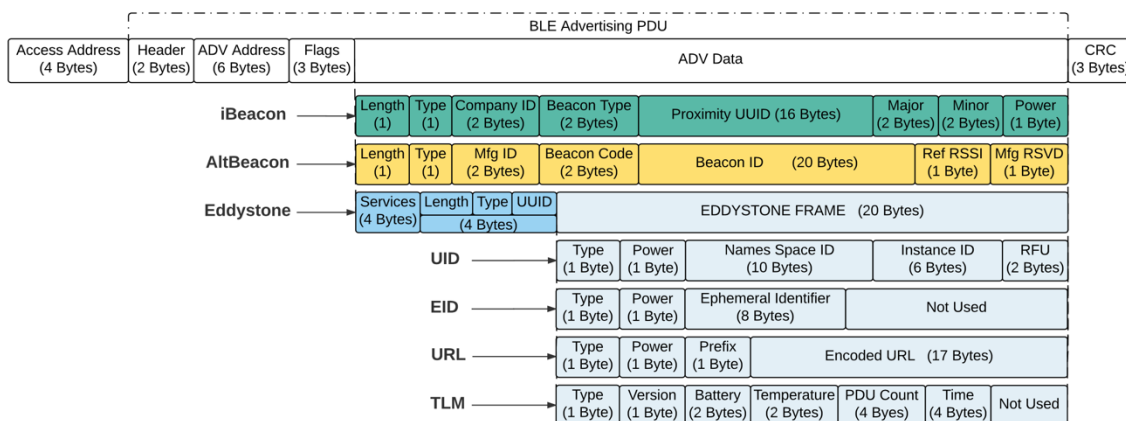
v porovnání s novější variantou BLE [11]. Mobilní zařízení v dnešní době využívají primárně variantu BLE. Společnost Apple například vývojářům mobilních aplikací pro zařízení s operačním systémem iOS ani neumožňuje využívat energicky náročnější variantu Classic [12]. Vzhledem k těmto faktům tato bakalářská práce pracuje pouze s Low Energy variantou.

Bluetooth své frekvenční pásmo rozděluje do 40 kanálů, z čehož 3 kanály jsou určeny pro advertising režim a zbylých 37 kanálů se využívá při komunikaci v data režimu. Advertising režim umožňuje pouze jednosměrnou komunikaci od vysílacího zařízení k ostatním zařízením v okolí. Režim data umožňuje oboustrannou komunikaci mezi 2 zařízením. Všechna zařízení vždy začínají v advertising režimu. Zařízení, jako například chytré hodinky, využívají advertising režim pouze pro navázání komunikace s mobilním telefonem a samotná komunikace následně již probíhá v datovém režimu [13].

Bluetooth Beacons jsou zařízení, která neustále vysílají do svého okolí zprávy v advertising režimu. Vysílané zprávy mohou obsahovat dodatečná data jako například teplotu z teplotního senzoru [13]. Jedním z typických využití Bluetooth Beacons je právě lokalizace mobilního zařízení. Operační systémy iOS a Android umožňují aplikacím získávat upozornění v momentě, kdy se zařízení přiblíží k definovanému Bluetooth Beaconu [12].

Specifikace Bluetooth protokolu nedefinuje Beacon zařízením žádný standard pro formát vysílaných dat (ADV část zpráv). Mezi nejrozšířenější formáty Beacon zpráv dnes patří iBeacon, AltBeacon a Eddystone. Jako první z uvedených formátů vzniknul iBeacon, který společnost Apple původně představila výhradně pro svá mobilní zařízení iPhone, iPad a iPod, ale formát se začal využívat i mimo ekosystém Apple zařízení. Společnost Radius Network definovala formát AltBeacon jako open-source alternativu k formátu iBeacon, a i přestože jsou formáty odlišné, tak iBeacon a AltBeacon zařízení jsou vzájemně kompatibilní a poskytují velmi podobné funkcionality. Poslední alternativou je formát Eddystone, jež byl představen

společností Google a oproti předchozím formátům definuje možnosti pro odesílání více informací jako například hodnota teploty. Struktura zpráv jednotlivých formátů je odlišná, ale obecně je možné říct, že zpráva vždy obsahuje identifikátor Beacon zařízení [14].



Obr. 3 Porovnání formátu zpráv iBeacon, AltBeacon a Eddystone

Zdroj obrázku: [14]

3.2.2 Wi-Fi RSSI

Wi-Fi je zkrácená verze názvu technologie Wireless Fidelity. Technologie Wi-Fi byla vyvinuta s primárním cílem nalezení bezdrátové alternativy k ethernetovému kabelu v počítačových sítích. V dnešní době se Wi-Fi technologie stala mezinárodně uznávaným standardem a téměř všechna nová mobilní zařízení Wi-Fi podporují. Typickým využitím Wi-Fi technologie je počítačová síť, ve které se nachází mobilní zařízení (klienti) a vysílací zařízení, jenž v rámci Wi-Fi sítí označujeme jako Access Point. K jednomu Access Pointu se může připojit více mobilních zařízení v jeden okamžik. Komunikace mezi mobilním zařízením a Access Pointem probíhá pomocí radiových vln. Obvyklá frekvence radiové komunikace je přibližně 2,4 GHz nebo 5GHz. Konkrétní frekvence závisí na regionu, ve kterém se zařízení nachází [2]. Technologie Wi-Fi umožňuje komunikaci i v jiných frekvenčních pásmech, čehož využívají například poskytovatelé internetu v rámci svých páteřních sítí.

Wi-Fi umožňuje i určení polohy mobilního zařízení, jelikož technologie pro komunikaci využívá radiové vlny. Měřící zařízení je schopno stanovit sílu přijatého signálu – RSSI hodnota. Postup určení polohy je velmi podobný lokalizaci pomocí Bluetooth RSSI.

3.2.3 Wi-Fi RTT

Wi-Fi RTT (IEEE 802.11mc) neboli Wi-Fi Round-Trip-Time je technologie umožňující měření vzdálenosti mezi Wi-Fi Access Pointem a mobilním zařízením [15]. RTT technologie vyžaduje hardwarovou podporu na straně měřícího zařízení i Wi-Fi Access Pointu, což je hlavní limitací technologie. V lednu 2021 technologii podporují pouze 4 modely Wi-Fi Access Pointů a 42 modelů mobilních zařízení [16].

Měření vzdálenosti pomocí Wi-Fi RTT se zakládá na porovnávání rozdílu v čase odeslání signálu Access Pointem a v aktuálním čase příjmu signálu na straně mobilního zařízení. Rychlost signálu je totožná s rychlostí světla, proto z rozdílu časů je možné určit vzdálenost. Přesnost měření vzdálenosti touto technologií je přibližně 1 až 2 metry [15]. Hrubý princip výpočtu vzdálenosti je totožný s výpočtem, jež se používá u technologie GNSS pro určení vzdálenosti mezi satelitem a mobilním zařízením.

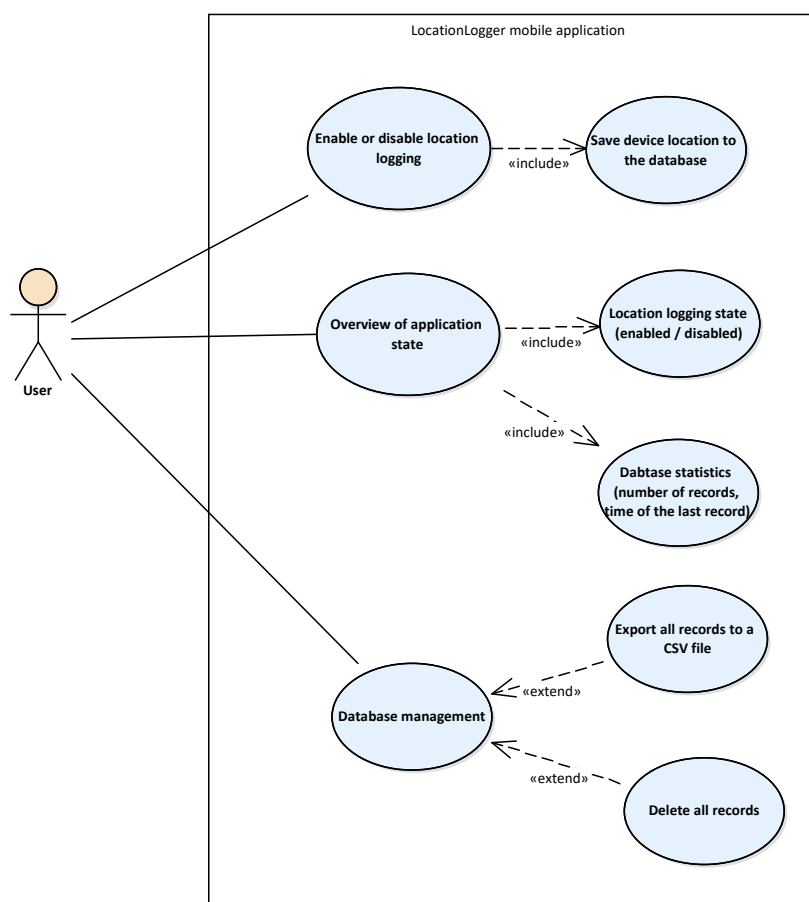
4 Metodika

Metodika popisuje měření, ze kterých vychází analýza dat v následující kapitole. První část se věnuje mobilním aplikacím pro sběr a export měření. Všechny aplikace byly vytvořeny jako součást této bakalářské práce. Druhá část kapitoly popisuje vlastnosti prostředí, ve kterých byly testovací měření prováděny.

4.1 Mobilní aplikace

4.1.1 GNSS

Cílem GNSS mobilní aplikace je kontinuální záznam polohy mobilního zařízení a následný export měření do CSV souboru.



Obr. 4 Usecase diagram funkcí GNSS aplikace

Přístup k GNSS senzoru zařízení

GNSS aplikace pro svoji funkcionalitu vyžaduje přístup k GNSS senzoru zařízení. Operační systémy Android a iOS přístup umožňují na základě oprávnění přiděleného uživatelem.

Získání přístupu k GNSS senzoru iOS zařízení zahrnuje dva kroky:

1. V soboru info.plist vývojář aplikace musí definovat textovou hodnotu pro klíč „NSLocationWhenInUseUsageDescription“. Hodnota by měla obsahovat stručný popis využití dat z GNSS senzoru v aplikaci.
2. Vývojář aplikace musí zavolat metodu `requestWhenInUseAuthorization` na objektu třídy `CLLocationManager`, viz Obr. 5.

```
private let manager = CLLocationManager()

private func setupCLLocationManager() {
    manager.delegate = self
    manager.desiredAccuracy = kCLLocationAccuracyBest
    manager.requestWhenInUseAuthorization()
}
```

Obr. 5 Ukázka vyžádání povolení pro přístup k GNSS senzoru iOS zařízení

Získání přístupu k GNSS senzoru Android zařízení také zahrnuje 2 kroky:

1. Vývojář musí definovat `user-permission` s názvem „`android.permission.ACCESS_FINE_LOCATION`“ v soboru `AndroidManifest.xml`.
2. Vývojář aplikace zavolá statickou metodu `requestPermission` třídy `ActivityCompat`, viz Obr. 6.

```
ActivityCompat.requestPermissions(this, arrayOf(Manifest.permission.ACCESS_FINE_LOCATION),  
LOCATION_PERMISSION_REQUEST_CODE)
```

Obr. 6 Ukázka vyžádání povolení pro přístup k GNSS senzoru Android zařízení

Pokud uživatel aplikaci udělí oprávnění pro přístup k GNSS senzoru zařízení, aplikace může vyžádat kontinuální příjem dat z GNSS senzoru od operačního systému zařízení. Oba operační systémy vyžadují implementaci rozhraní pro získávání informací z GNSS senzoru – iOS vyžaduje implementaci rozhraní „CLLocationManagerDelegate“ a Android „LocationListener“.

```
private let manager = CLLocationManager()  
  
private func startLogging() {  
    manager.startUpdatingLocation()  
}  
  
private func stopLogging() {  
    manager.stopUpdatingLocation()  
}  
  
private func locationManager(_ manager: CLLocationManager, didUpdateLocations locations:  
[CLLocation]) {  
    // Location data is available in the location parameter  
}
```

Obr. 7 Ukázka přístupu k GNSS senzoru iOS zařízení

```

private val locationManager by lazy { getSystemService(LOCATION_SERVICE) as
LocationManager }

private fun startLogging() {
    locationManager.requestLocationUpdates(provider, 100, 0f, this)
}

private fun stopLogging() {
    locationManager.removeUpdates(this)
}

```

Obr. 8 Ukázka přístupu k GNSS senzoru Android zařízení

Ukládání záznamů do databáze

Hlavním cílem GNSS aplikace je kontinuální záznam polohy zařízení pomocí GNSS senzoru pro následný export, z čehož vyplývá, že si aplikace bude muset záznamy polohy ukládat. Vývojáři aplikací mají v dnešní době několik možností pro ukládání dat v mobilních aplikacích – například ukládání pouze do proměnné v RAM paměti, zápis do souboru, databáze nebo služby třetích stran jako Firebase od společnosti Google. GNSS aplikace pracuje s větším množstvím strukturovaných dat, nad kterými bude aplikace provádět operace typu export, zjištění počtu záznamů a získání posledního záznamu. Na základě definovaných funkčních požadavků aplikace je nejvhodnější možnost ukládání dat databáze.

Operační systémy iOS i Android poskytují aplikacím SQLite databázi. Aplikace mohou s databází komunikovat napřímo pomocí manuálního sestavování query dotazů. Výrobci obou operačních systémů poskytují vývojářům databázové nadstavby, které vývojářům usnadňují práci s databází – iOS nadstavba: CoreData; Android nadstavba: Room.

GNSS aplikace bude vždy ukládat data pouze jednoho typu – záznam GNSS polohy, proto návrh databáze aplikace obsahuje pouze jednu tabulku. Jednotlivé záznamy

v databázi musí obsahovat veškeré informace, které budou potřebné k následné analýze dat měření.

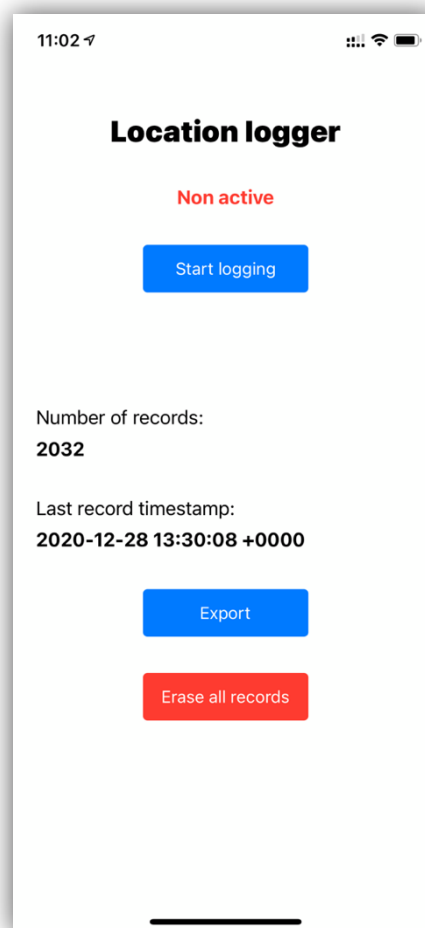
Tabulka 1 Databázová tabulka pro záznam GNSS polohy

Název	Datový typ	Popis
date	Datetime	Čas záznamu
device	String	Výrobce a model zařízení
latitude	Double	Zeměpisná šířka
longitude	Double	Zeměpisná výška

Uživatelské rozhraní aplikace

Uživatelské rozhraní aplikace se skládá z obrazovek, které uživateli umožňují interakci s aplikací. Výrobci mobilních operačních systémů poskytují SDK balíčky pro tvorbu uživatelských rozhraní za pomoci předdefinovaných komponent (text, tlačítko, výpis, atd.) Operační systémy iOS a Android mají odlišné SDK, ale pro většinu komponent obou balíčků existuje ekvivalentní komponenta v druhém balíčku. Vývojáři aplikací mohou komponenty kombinovat a upravovat jejich vizuální podobu. Díky tomuto faktu všechny aplikace na našich mobilních telefonech nevypadají stejně, i když ve většina z nich na pozadí používá totožné komponenty.

Návrh obrazovek aplikace by měl vždy vycházet z požadovaných funkcí aplikace, jež, v našem případě, jsou definovány v Usecase digramu, viz



Obr. 9 Uživatelské rozhraní GNSS aplikace pro iOS zařízení

Obr. 4. GNSS aplikace nevyžaduje komplexní interakci s uživatelem. Všechny stavové informace a ovládací prvky aplikace je možné zobrazit na 1 obrazovce.

4.1.2 Bluetooth RSSI

Hlavním cílem aplikace je zaznamenávání síly signálu (RSSI) vysílaného Bluetooth Beacon zařízením. Součástí aplikace musí být také perzistentní ukládání měření pro následný export do CSV souboru. Požadované funkcionality aplikace se částečně prolínají s předešlou GNSS aplikací, proto části aplikace vycházejí z GNSS aplikace.

Přístup k Bluetooth senzoru zařízení

Přístup k Bluetooth senzoru zařízení umožňují oba testované operační systémy – iOS a Android.

Operační systém iOS přístup k senzoru podmiňuje udělením oprávnění pro přístup k poloze zařízení. Postup získání oprávnění je totožný s postupem získání oprávnění přístupu k GNSS senzoru zařízení, viz kapitola 4.1.1 GNSS.

Android systém přístup k senzoru podmiňuje udělením následujících oprávnění, jež musí být definovány v AndroidManifest.xml souboru a aplikace si za běhu musí vyžádat jejich udělení uživatelem – postup viz kapitola 4.1.1 GNSS.

- android.permission.BLUETOOTH
- android.permission.BLUETOOTH_ADMIN
- android.permission.ACCESS_COARSE_LOCATION

Samotný přístup k Bluetooth senzoru iOS zařízení, stejně jako u GNSS senzoru, poskytuje třída CLLocationManager. Aplikace může zahájit vyhledávání beaconů v okolí zařízení voláním metody startRangingBeacons, jejíž parametr typu CLBeaconIdentityConstraint definuje požadované vlastnosti vyhledávaných beaconů. CLBeaconIdentityConstraint vyžaduje minimálně definování UUID identifikátoru beaconu a volitelně umožňuje definici major a minor identifikátorů.

Aktualizace beaconů v okolí zařízení operační systém aplikaci poskytuje skrze rozhraní CLLocationManagerDelegate; metoda locationManager(_ manager: CLLocationManager, didRange beacons: [CLBeacon], satisfying beaconConstraint: CLBeaconIdentityConstraint).

```
private let locationManager = CLLocationManager()
private let uuid = UUID(uuidString: "b9407f30-f5f8-466e-aff9-25556b57fe6d")!

private func startBeaconRanging() {
    locationManager.startRangingBeacons(satisfying: CLBeaconIdentityConstraint(uuid: uuid))
}

private func stopBeaconRanging() {
    locationManager.stopRangingBeacons(satisfying: CLBeaconIdentityConstraint(uuid: uuid))
}

private func locationManager(_ manager: CLLocationManager, didRange beacons: [CLBeacon],
satisfying beaconConstraint: CLBeaconIdentityConstraint) {
    // Information about ranged beacons is available in the beacons parameter
}
```

Obr. 10 Ukázka přístupu k Bluetooth senzoru iOS zařízení

Výrobce Bluetooth Beaconů (společnost Estimote), které byly zapůjčeny Univerzitou Hradec Králové pro účel vypracování této práce, nabízí volně dostupný balíček pro Android aplikace poskytující nadstavbu usnadňující přístup k Bluetooth Beacon senzoru zařízení. Implementace nadstavby společnosti Estimote obnáší přidání balíčku com.estimote:sdk do Graddle závislostí projektu definovaných v build.gradle souboru. Beacon aplikace implementuje nejnovější verzi nadstavby v době tvorby aplikace – verze 1.0.12.

Pro vyhledání beaconů nacházejících se v okolí zařízení aplikace musí nejdříve inicializovat objekty tříd BeaconManager a BeaconRegion. BeaconRegion definuje požadované vlastnosti vyhledávaných beaconů, stejně jako

CLBeaconIdentityConstraint v iOS aplikaci. Samotné vyhledávání beaconů aplikace zahájí voláním metody startRanging na objektu třídy BeaconManager. Informace o beaconech v okolí zařízení aplikace získá nastavením zpětného volání setRangingListener, které poskytuje BeaconManager.

```
private lateinit var beaconManager: BeaconManager
private lateinit var region: BeaconRegion

override fun onCreate(savedInstanceState: Bundle?) {
    super.onCreate(savedInstanceState)
    binding = ActivityMainBinding.inflate(layoutInflater)
    setContentView(binding.root)
    setupBeaconRanging()
}

override fun onResume() {
    super.onResume()
    SystemRequirementsChecker.checkWithDefaultDialogs(this)
    beaconManager.connect { beaconManager.startRanging(region) }
}

override fun onPause() {
    beaconManager.stopRanging(region)
    super.onPause()
}

private fun setupBeaconRanging() {
    beaconManager = BeaconManager(this)
    region = BeaconRegion("ranged_region", UUID.fromString("b9407f30-f5f8-466e-aff9-25556b57fe6d"), null, null)
    beaconManager.setRangingListener(BeaconRangingListener { _, list ->
        // Information about nearby beacons is available in the list parameter
    })
}
```

Obr. 11 Ukázka přístupu k Bluetooth senzoru Android zařízení

Ukládání záznamů do databáze

Aplikace ukládá měření do SQLite databáze poskytované operačním systémem. Postup práce s databází je totožný s GNSS aplikací, viz kapitola 4.1.1 GNSS.

Tabulka 2 Databázová tabulka pro záznam Bluetooth RSSI měření

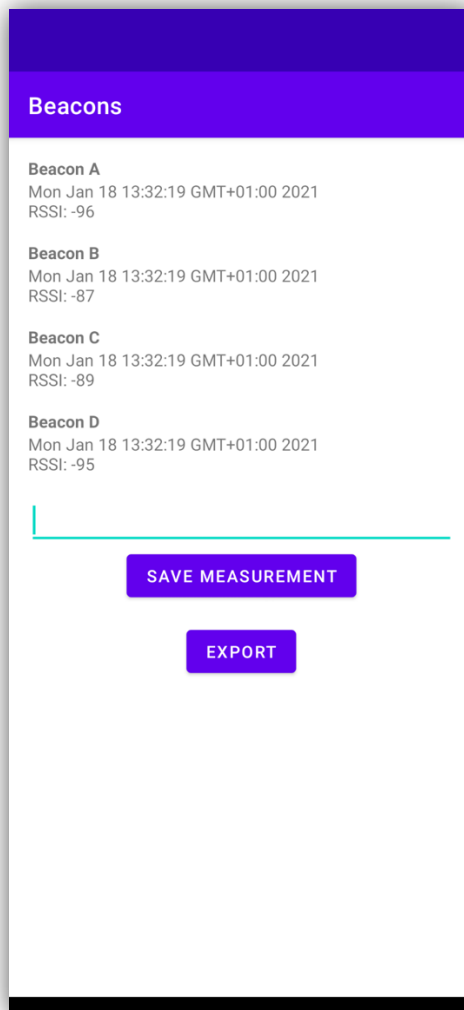
Název	Datový typ	Popis
date	Datetime	Čas záznamu
device	String	Výrobce a model zařízení
rssia	Int	Síla signálu beaconu A
rssib	Int	Síla signálu beaconu B
rssic	Int	Síla signálu beaconu C
rssid	Int	Síla signálu beaconu D

Uživatelské rozhraní aplikace

Bluetooth Beacon vysílače, jejichž signál aplikace bude měřit, jsou fixně definovány již při tvorbě aplikace, proto uživatelské rozhraní nemusí obsahovat konfiguraci identifikátorů beaconů.

Aplikace automaticky zahájí vyhledávání beaconů ihned po spuštění, takže aplikace nemusí obsahovat prvky pro ovládání vyhledávání beaconů (zahájení / ukončení).

Nejdůležitější informací pro uživatele aplikace je hodnota aktuálního signálu z beacon zařízení, proto aplikace vždy uživateli zobrazuje všechny aktuální hodnoty měření včetně času měření. Obrazovka aplikace dále obsahuje tlačítka pro uložení aktuálního měření do databáze aplikace a pro export databáze do CSV souboru.



Obr. 12 Uživatelské rozhraní aplikace pro měření Bluetooth RSSI na Android zařízení

4.1.3 Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT

Technologie Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT jsou primárně využívány pro lokalizaci mobilních zařízení v rámci indoor prostředí. Obě technologie jsou založeny na principu měření signálu vysílaného Wi-Fi Access Pointem. Pro lokalizaci pomocí technologie Wi-Fi RSSI je možné využít jakýkoliv Wi-Fi Access Point zařízení, protože metoda lokalizace pracuje pouze se silou signálu – RSSI hodnota. Technologie Wi-Fi RTT vyžaduje hardwarovou implementaci na straně Wi-Fi Access Pointu i mobilního zařízení. V době tvorby této bakalářské práce (leden 2021) technologii Wi-Fi RTT podporují pouze 4 modely Wi-Fi Access Pointů, z čehož výrobcem tří modelů je společnost Google a výrobce čtvrtého Access Pointu je

společnosti Compulab [16]. Seznam mobilních zařízení podporujících Wi-Fi RTT je také velmi omezený; obsahuje pouze 42 modelů (například produktovou řadu mobilních zařízení Pixel společnosti Google) [16].

Vytvářená aplikace bude provádět vyhledání Wi-Fi sítí nacházejících se v okolí mobilního zařízení. Aplikace musí podporovat vyhledání Wi-Fi sítí s frekvencí 2,4 GHz i 5 GHz a zjištění síly přijatého signálu – RSSI hodnota. V případě, že Wi-Fi Access Point i mobilní zařízení budou podporovat technologii Wi-Fi RTT, aplikace provede určení fyzické vzdálenosti mezi mobilním zařízením a Wi-Fi Access Pointem. Aplikace bude hodnoty měření ukládat do interní databáze pro následný export do CSV souboru. Požadované funkcionality aplikace se částečně prolínají s předešlými aplikacemi GNSS a Bluetooth Beacons, takže části Wi-Fi aplikace budou vycházet z předešlých aplikací.

Výrobce operačního systému iOS (společnost Apple) bohužel neumožňuje aplikacím třetích stran přímý přístup k Wi-Fi čipu zařízení, takže v rámci iOS aplikace není možné vyhledat Wi-Fi sítě nacházející se v okolí zařízení a zjistit sílu přijatého signálu [17]. Na základě tohoto faktu je součástí této práce tvorba aplikace měřící Wi-Fi signál pouze pro mobilní zařízení s operačním systémem Android.

Vyhledání Wi-Fi sítí nacházených se v okolí zařízení

Vyhledání Wi-Fi sítí v okolí Android zařízení systém podporuje na základě udělení následujících oprávnění, která musí být definována v AndroidManifest.xml souboru a aplikace si za běhu musí vyžádat jejich udělení uživatelem – postup viz kapitola 4.1.1 GNSS.

- android.permission.ACCESS_FINE_LOCATION
- android.permission.ACCESS_COARSE_LOCATION
- android.permission.CHANGE_WIFI_STATE
- android.permission.ACCESS_WIFI_STATE

Operační systém Android umožňuje vyhledání Wi-Fi sítí v okolí zařízení skrze systémovou službu WiFiManager. Aplikace může zahájit vyhledávání voláním metody startScan. Operační systém následně aplikaci informuje o nalezených Wi-Fi sítích pomocí BroadcastReceiver.

```
private lateinit var wifiManager: WifiManager

private fun setupWiFiManager() {
    wifiManager = applicationContext.getSystemService(WIFI_SERVICE) as WifiManager
    registerReceiver(broadcastReceiver,
        IntentFilter(WifiManager.SCAN_RESULTS_AVAILABLE_ACTION))
    wifiManager.startScan()
}

private val broadcastReceiver = object : BroadcastReceiver() {
    override fun onReceive(context: Context?, intent: Intent?) {
        handleWifiDataUpdate(wifiManager.scanResults as ArrayList<ScanResult>)
    }
}

private fun handleWifiDataUpdate(data: ArrayList<ScanResult>) {
    // Information about nearby networks is available in the data parameter
}
```

Obr. 13 Ukázka vyhledání Wi-Fi sítí v okolí Android zařízení

Přístup k Wi-Fi RTT senzoru zařízení

Seznam modelů mobilních zařízení podporujících technologii Wi-Fi RTT je bohužel velmi omezený, viz úvod kapitoly 4.1.3 Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT. Operační systém Android umožňuje ověření podpory technologie za běhu aplikace pomocí třídy PackageManager, viz Obr. 14.

```
packageManager.hasSystemFeature(PackageManager.FEATURE_WIFI_RTT)
```

Obr. 14 Ukázka ověření dostupnosti Wi-Fi RTT

Pokud mobilní zařízení technologii Wi-Fi RTT podporuje, tak aplikace může zahájit Wi-Fi RTT měření voláním metody `startRanging` na objektu třídy `WiFiRttManager`. Tato metoda vyžaduje jako parametr objekt třídy `RangingRequest`, pro jehož vytvoření je nutné definovat konkrétní vyhledávané Wi-Fi Access Pointy. To znamená, že aplikace musí nejdříve provést klasické vyhledání Wi-Fi sítí popsané dříve v této kapitole.

Operační systém aplikaci informuje o výsledcích Wi-Fi RTT měření pomocí zpětného volání `RangingResultCallback`. Datový typ výsledku Wi-Fi RTT měření je `RangingResult`, jehož důležité vlastnosti jsou:

- `status`: Hodnota vlastnosti `status` musí být rovna 0. V opačném případě výsledek měření není validní (nastala chyba) a přístoupení k ostatním vlastnostem `RangingResult` může způsobit pád aplikace.
- `macAddress`: Mac adresa Wi-Fi Access pointu, pomocí které aplikace může přiřadit výsledky měření ke konkrétním Wi-Fi Access Pointům.
- `distanceMm`: Fyzická vzdálenost mezi mobilním zařízením a Wi-Fi Access Pointem. Hodnota je uvedena v milimetrech.

```

private lateinit var rttManager: WifiRttManager

private fun setupRtt() {
    val rttIsAvailable =
packageManager.hasSystemFeature(PackageManager.FEATURE_WIFI_RTT)
    if (!rttIsAvailable) {
        // Handle not available state
    } else {
        rttManager = this.applicationContext.getSystemService(WIFI_RTT_RANGING_SERVICE) as
WifiRttManager
        startRttRanging()
    }
}

private fun startRttRanging() {
    val rangingRequest = RangingRequest
        .Builder()
        .addAccessPoints(currentWifiResults)
        .build()
    val rangingCallback = object : RangingResultCallback() {
        override fun onRangingFailure(code: Int) {
            // Handle ranging error
        }

        override fun onRangingResults(data: MutableList<RangingResult>) {
            val measurement = data.firstOrNull { it.status == 0 && it.macAddress!!.toString() ==
AP_MAC_ADDRESS }
            val distanceFromAp = measurement?.distanceMm
        }
    }
    rttManager!!.startRanging(rangingRequest, mainExecutor, rangingCallback)
}

```

Obr. 15 Ukázka přístupu k Wi-Fi RTT senzoru zařízení

Ukládání záznamů do databáze

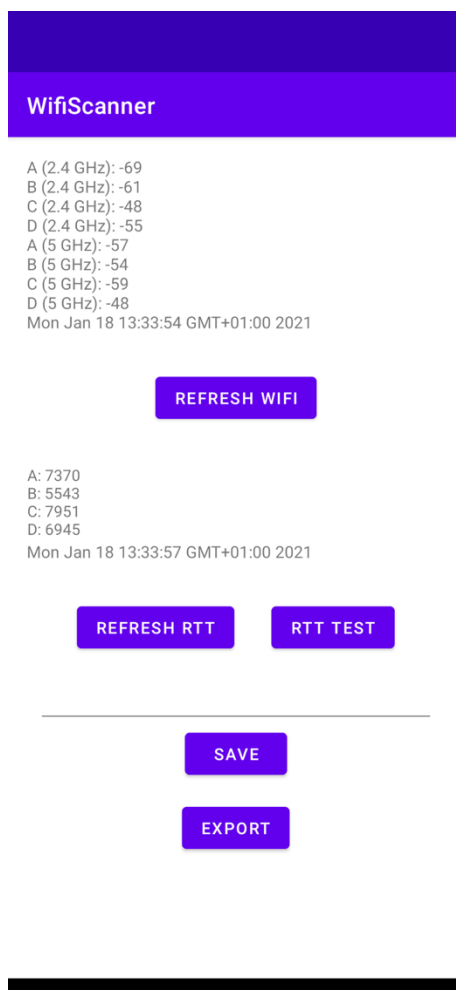
Wi-Fi aplikace, stejně jako předešlé aplikace, ukládá výsledky měření do databáze pro následný export do CSV souboru. Postup práce s databází je totožný s předešlými aplikacemi, viz kapitola 4.1.1 GNSS.

Tabulka 3 Databázová tabulka pro záznam Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT měření

Název	Datový typ	Popis
date	Datetime	Čas záznamu
device	String	Výrobce a model zařízení
wifi2A	Int	Síla signálu Wi-Fi AP A (2,4 GHz)
wifi2B	Int	Síla signálu Wi-Fi AP B (2,4 GHz)
wifi2C	Int	Síla signálu Wi-Fi AP C (2,4 GHz)
wifi2D	Int	Síla signálu Wi-Fi AP D (2,4 GHz)
wifi5A	Int	Síla signálu Wi-Fi AP A (5 GHz)
wifi5B	Int	Síla signálu Wi-Fi AP B (5 GHz)
wifi5C	Int	Síla signálu Wi-Fi AP C (5 GHz)
wifi5D	Int	Síla signálu Wi-Fi AP D (5 GHz)
rttA	Int	Vzdálenost od AP A v mm (RTT)
rttB	Int	Vzdálenost od AP B v mm (RTT)
rttC	Int	Vzdálenost od AP C v mm (RTT)
rttD	Int	Vzdálenost od AP D v mm (RTT)

Uživatelské rozhraní aplikace

Uživatelské rozhraní Wi-Fi aplikace se skládá z 1 obrazovky. Textové komponenty obrazovky informují uživatele o aktuálních hodnotách měření Wi-Fi RSSI 2,4 GHz, Wi-Fi RSSI 5 GHz a Wi-Fi RTT vůči všem testovaným Access Pointům. Tlačítka obrazovky umožňují uživateli manuální obnovení měření, RTT test (automatické provedení 100 RTT měření s časovým rozestupem 150 ms), uložení měření do databáze aplikace a export dat z databáze aplikace do CSV souboru.



Obr. 16 Uživatelské rozhraní Wi-Fi aplikace na Android zařízení

4.2 Prostředí

4.2.1 Outdoor prostředí – GNSS technologie

Testování lokalizace zařízení pomocí GNSS senzoru se skládá ze 4 měření. Každé měření probíhalo za jiných podmínek, aby bylo možné porovnat data z různých situací. Měření bylo vždy provedeno na všech zařízeních současně, takže výsledky nemohou být ovlivněny změnou prostředí.

První měření byl „Stacionární test“, kde zařízení byla položena na zem a zaznamenávala svoji polohu po dobu 150 sekund. Poloha zařízení se po celou dobu měření nezměnila, takže GNSS souřadnice všech záznamů jednoho zařízení by měly být totožné a rozdíly mezi polohami zařízení by měly být do vzdálenosti 0,5 metru (fyzická vzdálenost mezi zařízeními během testu). Vzhledem ke charakteristikám technologie GNSS je možné předpokládat, že reálná data z GNSS senzorů zařízení budou ale odlišná (budou obsahovat určitou míru chybovosti). Cílem testu je zjištění 3 informací:

1. Průměrný rozdíl mezi záznamy z GNSS senzoru 1 konkrétního zařízení. Tzn. jak se liší souřadnice mezi záznamy z daného zařízení.
2. Počet GNSS záznamů za 150 sekund. Tzn. počet aktualizací polohy poskytnutých operačním systémem během experimentu.
3. Rozdíl mezi průměrnými polohami zařízení. Tzn. jak se liší zprůměrovaná poloha zařízení oproti zprůměrovaným polohám ostatních zařízení.



Obr. 17 Měření záznamů z GNSS senzorů zařízení

Zbylá 3 měření simulovala zaznamenávání polohy během jízdy automobilem. Každé měření bylo provedeno v odlišném prostředí, tak aby bylo možné porovnat data z různých situací.

První automobilový test byla jízda v městské zástavbě. V průběhu testovací jízdy automobil několikrát zastavil – čekání na světelnou signalizaci, dávání přednosti v jízdě atd. Městská trasa, oproti následujícím 2 jízdám, obsahovala největší množství prudkých změn směru jízdy (zatačky na silnici).

Trasou druhého automobilového testu byl městský okruh města Hradec Králové. Trasa obsahovala menší množství změn směru jízdy oproti předchozímu testu, ale automobil se stále na několika místech zastavil z důvodů čekání na světelnou signalizaci.

Poslední měření se zaměřilo na jízdu po rychlostní silnici. Automobil se, po většinu doby průběhu testu, pohyboval konstantní rychlostí bez změn směru jízdy.

Největší prostor pro vznik chyb v určování polohy zařízení, vzhledem k vlastnostem GNSS technologie, vzniká v momentech prudké změny směru jízdy automobilu a v situacích, kdy se automobil nepohybuje. Na základě těchto faktů můžeme předpokládat, že největší množství chyb při určování polohy zařízení se bude vyskytovat v prvním automobilovém testu jízdy v městské zástavbě. Prostředí testu komplikuje určování polohy nejen povaha samotné jízdy, ale i vyšší množství výskytu budov v okolí zařízení, což může mít negativní vliv na přesnost GNSS technologie. Jízda po městském okruhu, vzhledem ke svým charakteristikám, by měla obsahovat nižší množství chyb. Měření trasy jízdy po rychlostní silnici je ideálním prostředím pro určování polohy zařízení, protože se v blízkém okolí zařízení nachází minimum budov a směr i rychlost jízdy jsou téměř konstantní. Je možné předpokládat, že výskyt chyb v určení polohy při jízdě po rychlostní silnici bude nejmenší v porovnání s předchozími automobilovými testy.

Cílem automobilových testů je zjistit 2 informace:

1. Počet GNSS záznamů za dobu průběhu jízdy. Tzn. počet aktualizací polohy poskytnutých operačním systémem.
2. Celkovou délku jízdy. Tzn. součet vzdálenosti mezi jednotlivými body měření daného zařízení.



Obr. 18 Trasa testu jízdy ve městské zástavbě



Obr. 19 Trasa testu jízdy po městském okruhu



Obr. 20 Trasa testu jízdy po rychlostní silnici

4.2.2 Indoor prostředí – Bluetooth Beacons, Wi-Fi a Wi-Fi RTT technologie

Experimenty lokalizace zařízení v indoor prostředí se zaměřují na technologie Bluetooth RSSI, Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT. Cílem práce je porovnat technologie (vlastnosti a přesnost) a určit vliv modelu měřícího zařízení na výsledek měření.

Vysílací zařízení

Všechny porovnávané indoor technologie, na rozdíl od předešlé technologie GNSS, vyžadují pro provedení experimentu vlastní vysílací zařízení, pomocí kterého měřící zařízení bude určovat svoji polohu.

V experimentu zabývajícím se Bluetooth RSSI byly jako vysílací zařízení použity 4 kusy zařízení Bluetooth Beacon od společnosti Estimote. UUID identifikátor všech vysílačů byl totožný – b9407f30-f5f8-466e-aff9-25556b57fe6d. Aplikace beacony identifikovala na základě rozdílného Major identifikátoru:

- Beacon A: 9943
- Beacon B: 19104
- Beacon C: 48550
- Beacon D: 11234

Wi-Fi a Wi-Fi RTT experimenty měřily signál vysílaný stejným zařízením – Wi-Fi access point Google Nest Wi-Fi. Tento model je jeden ze 4 modelů, které podporují technologii Wi-Fi RTT, viz úvod kapitoly 4.1.3 Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT. Počet kusů Google Nest Wi-Fi zařízení byl, stejně jako u Bluetooth, 4 kusy. Aplikace Access Pointy rozpoznávala na základě jejich mac adresy:

- Access Point A: f0:72:ea:02:85:5a
- Access Point B: cc:f4:11:67:c6:bb
- Access Point C: f0:72:ea:02:85:5d

- Access Point D: cc:f4:11:67:c6:bf

Všechna vysílací zařízení byla zapůjčena Univerzitou Hradec Králové za účelem vypracování této práce, za což univerzitě děkuji.

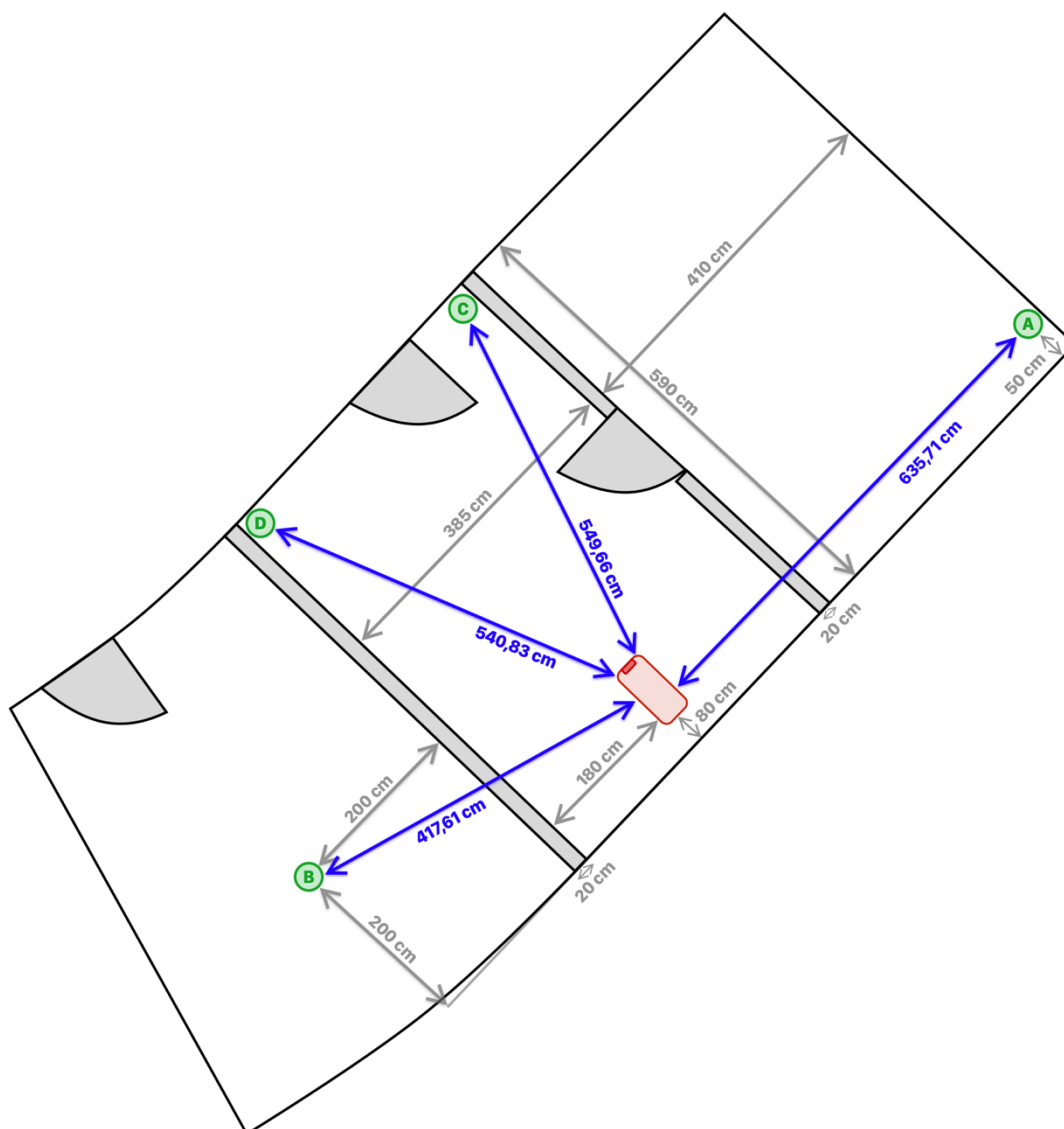


Obr. 21 Google Nest Wi-Fi



Obr. 22 Estimote Bluetooth Beacons

Proces měření



Obr. 23 Půdorys budovy

Měření bylo provedeno v prostorách budovy, jejíž půdorys je naznačen na Obr. 23. Pozice vysílacích zařízení a mobilního zařízení byla stejná pro všech experimenty – Bluetooth RSSI, Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT. Reálné vzdálenosti mezi mobilním zařízením a vysílacími body jsou zaznamenány v půdorysu budovy modrou barvou. Pozice mobilního zařízení je vyznačena červenou barvou; vysílací zařízení jsou reprezentována zelenou barvou a obsahují identifikátor zařízení (A, B, C, D).

Mezi měřícím zařízením a vysílači C a D se během testu nenacházela žádná překážka a reálná vzdálenost od měřícího zařízení byla velmi podobná, proto můžeme předpokládat, že výsledky měření z těchto vysílacích bodů budou velmi podobné. Bod B byl v průběhu měření nejbližší mobilnímu zařízení, ale signál z bodu B musel během měření překonat překážku v podobě stěny budovy. Nejdále od měřícího zařízení se nacházel bod A, jenž se také nacházel v jiné místnosti objektu, takže jeho signál musel projít stěnou budovy, která v tomto případě obsahovala zavřené dveře.

Experimenty byly provedeny v následujícím pořadí: Bluetooth RSSI, Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT. Při každém experimentu bylo měření provedeno postupně na každém testovaném mobilním zařízení.

Počet zaznamenaných hodnot během měření:

- Bluetooth RSSI: 10 hodnot
- Wi-Fi RSSI: 10 hodnot
- Wi-Fi RTT: 500 hodnot

V případě měření RSSI (Wi-Fi i Bluetooth) testované operační systémy iOS a Android neumožňují získávání hodnot ve velmi malých časových intervalech. Minimální prodleva mezi měřeními závisí na operačním systému a konkrétním zařízení, ale obecně řečeno se jedná o jednotky sekund. Technologie Wi-Fi RTT naopak umožňuje získávat měření se signifikantně menší časovou prodlevou. Během testu Wi-Fi RTT měřící zařízení měřila vzdálenost v intervalu 150 ms. Rozdílné počty zaznamenaných hodnot během testů jednotlivých technologií reflektují rozdíly v minimální požadované prodlevě mezi měřeními, z nichž vyplývá i počet měření, která by zařízení prováděla praxi.

Během testu byly vždy všechny dveře objektu zavřeny a v objektu budovy se v době experimentu nenacházela žádná osoba, kromě autora této práce z důvodu obsluhy měřících zařízení. Experimenty byly provedeny sekvenčně v rámci jednoho

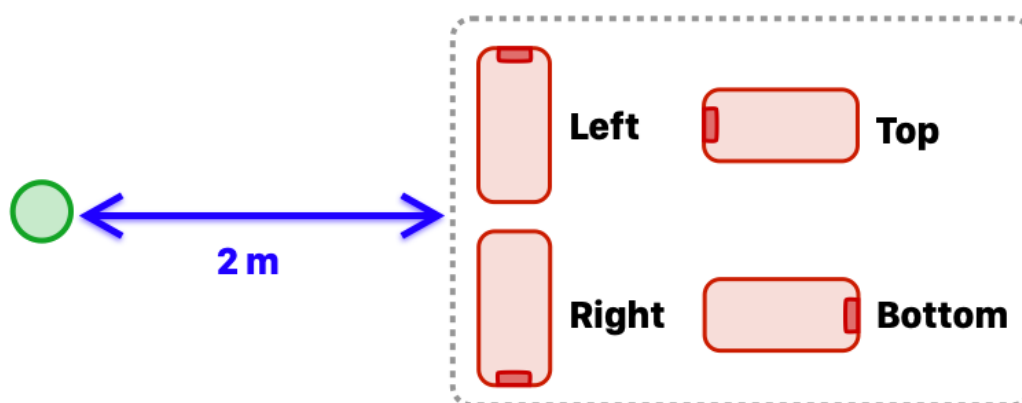
odpoledne. Díky těmto faktům by výsledky měření měly být minimálně ovlivněny změnou stavu prostředí.

Dodatečné Wi-Fi RTT experimenty

Během analýzy výsledků Wi-Fi RTT měření bylo objeveno neočekávané chování výsledných hodnot, viz kapitola 5.4 Wi-Fi RTT. Na základě těchto zjištění byly provedeny 2 dodatečné experimenty zkoumající vliv vzdálenosti a směrovosti na technologii Wi-Fi RTT. Tyto experimenty byly provedeny na vysílacím zařízení s identifikátorem A a měřícím zařízením Google Pixel 3a.

Test vzdálenosti probíhal jako jediný ve venkovním prostředí. Během experimentu zařízení zaznamenalo 5 měření s různou reálnou vzdáleností od vysílače – 1 m, 2 m, 3 m, 4 m a 5 m. V každé vzdálenosti měřící zařízení pořídilo 100 záznamů.

V průběhu testu směrovosti byla reálná vzdálenost mezi měřícím a vysílacím zařízením vždy stejná – 2 m. Experiment se skládal ze 4 měření, kde před každým měřením bylo měřící zařízení otočeno o 90 stupňů, viz Obr. 24. V každé pozici mobilní zařízení zaznamenalo 200 hodnot.



Obr. 24 Diagram měření směrovosti Wi-Fi RTT

5 Analýza naměřených dat

5.1 GNSS

5.1.1 Stacionární test

Během stacionárního testu zařízení zaznamenávala svoji polohu po dobu 150 sekund. Reálná poloha zařízení se během testu neměnila, takže jakékoliv odchylky v rámci záznamů jednoho zařízení můžeme považovat za chybu měření. Kapitola 4.2.1 Outdoor prostředí – GNSS technologie obsahuje podrobnější popis podmínek a prostředí stacionárního testu.

Počet záznamů

Tabulka 4 Přehled počtu záznamů polohy během stacionárního testu

Zařízení	Počet záznamů	Průměrný počet záznamů za 1 sekundu
Huawei P40 Pro	138	0,92
iPad Air 2	137	0,91
iPhone SE	149	0,99
Nokia 3.1	189	1,26
Nokia 8	142	0,95
Google Pixel 3a	143	0,95
Xiaomi Mi A1	236	1,57
Xiaomi Redmi Note 4	209	1,39
iPhone 11 Pro	147	0,98

- Průměrná hodnota počtu záznamů: 165,6
- Směrodatná odchylka počtu záznamů: 36,5
- Minimální hodnota počtu záznamů: 137 (iPad Air 2)
- Maximální hodnota počtu záznamů: 236 (Xiaomi Mi A1)

Rozdíly v počtu záznamů polohy mezi zařízeními jsou signifikantní. Zařízení modelu iPad Air 2 zaznamenalo o 99 záznamů méně (77 %) než zařízení Xiaomi Mi A1.

Při pohledu na hodnoty zařízení výrobců Xiaomi a Apple (iPhone a iPad) bychom mohli dojít k závěru, že existuje korelace mezi počtem záznamů ve stacionárním testu a výrobcem zařízení nebo nadstavbou operačního systému, jenž výrobce instaluje do zařízení. Tento předpoklad ale vyvrací zařízení Nokia 3.1 a Nokia 8, jež mají signifikantně rozdílný počet záznamů i přes stejného výrobce zařízení.

Naměřená data můžeme označit za signifikantně rozdílná, ale bohužel z dostupných informací není možné určit příčinu variability výsledků.

Rozdíl mezi průměrnými polohami zařízení

Tabulka 5 Rozdíly mezi průměrnými polohami zařízení ve stacionárním testu

Zařízení	Průměrná zeměpisná šířka	Průměrná zeměpisná výška	Vzdálenost od celkové průměrné polohy [m]
Huawei P40 Pro	50,21311454	15,82520233	1,608085488
iPad Air 2	50,21309045	15,82514873	3,902731095
iPhone SE	50,21308838	15,82521642	1,69190831
Nokia 3.1	50,21311667	15,82522667	2,583438869
Nokia 8	50,21304542	15,82519087	6,12812233
Google Pixel 3a	50,21313292	15,82523273	4,285179766
Xiaomi Mi A1	50,21309669	15,82519736	0,472240017
Xiaomi Redmi Note 4	50,21309498	15,82516343	2,762348799
iPhone 11 Pro	50,2131211	15,82523301	3,252380979

Sloupce *Průměrná zeměpisná šířka* a *Průměrná zeměpisná výška* obsahují průměrnou polohu zařízení vypočtenou ze všech záznamů daného zařízení. Celková průměrná poloha je průměrem průměrných poloh všech zařízení. Vzhledem k faktu, že celková průměrná poloha vychází z největšího počtu záznamů a kombinuje data z několika senzorů, můžeme celkovou průměrnou polohu označit za nejpřesnější určení reálné polohy během testu. Sloupec *Vzdálenost od celkové průměrné polohy* obsahuje vypočtenou vzdálenost v metrech mezi průměrnou polohou daného zařízení a celkovou průměrnou polohou.

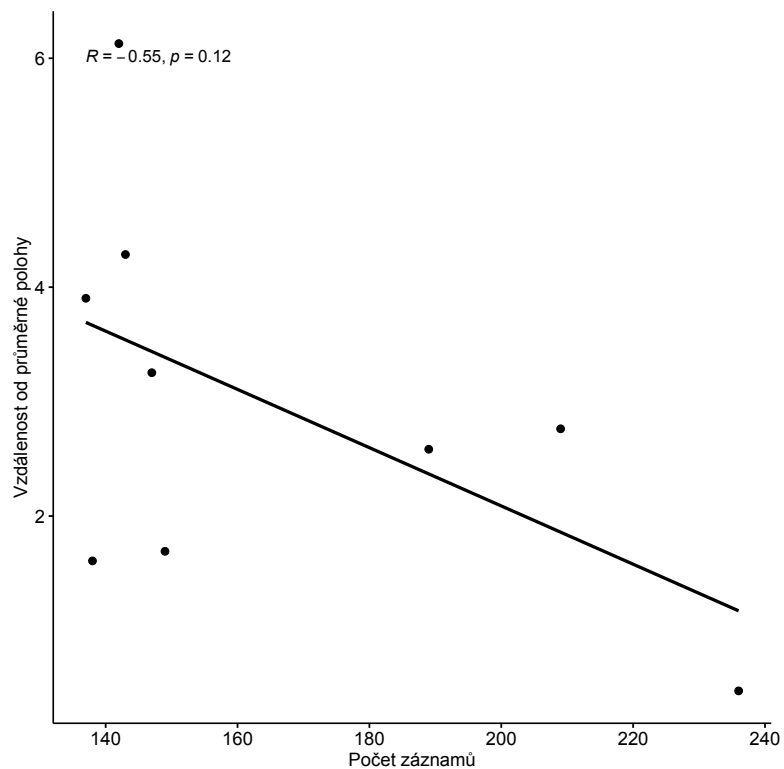
Celková průměrná poloha:

- Zeměpisná šířka: 50,2131001
- Zeměpisná délka: 15,8252013

Statistická analýza hodnoty průměrné vzdálenosti od celkové průměrné polohy:

- Průměr: 2,97
- Směrodatná odchylka: 1,68
- Minimum: 0,47 (Xiaomi Mi A1)
- Maximum: 6,13 (Nokia 8)

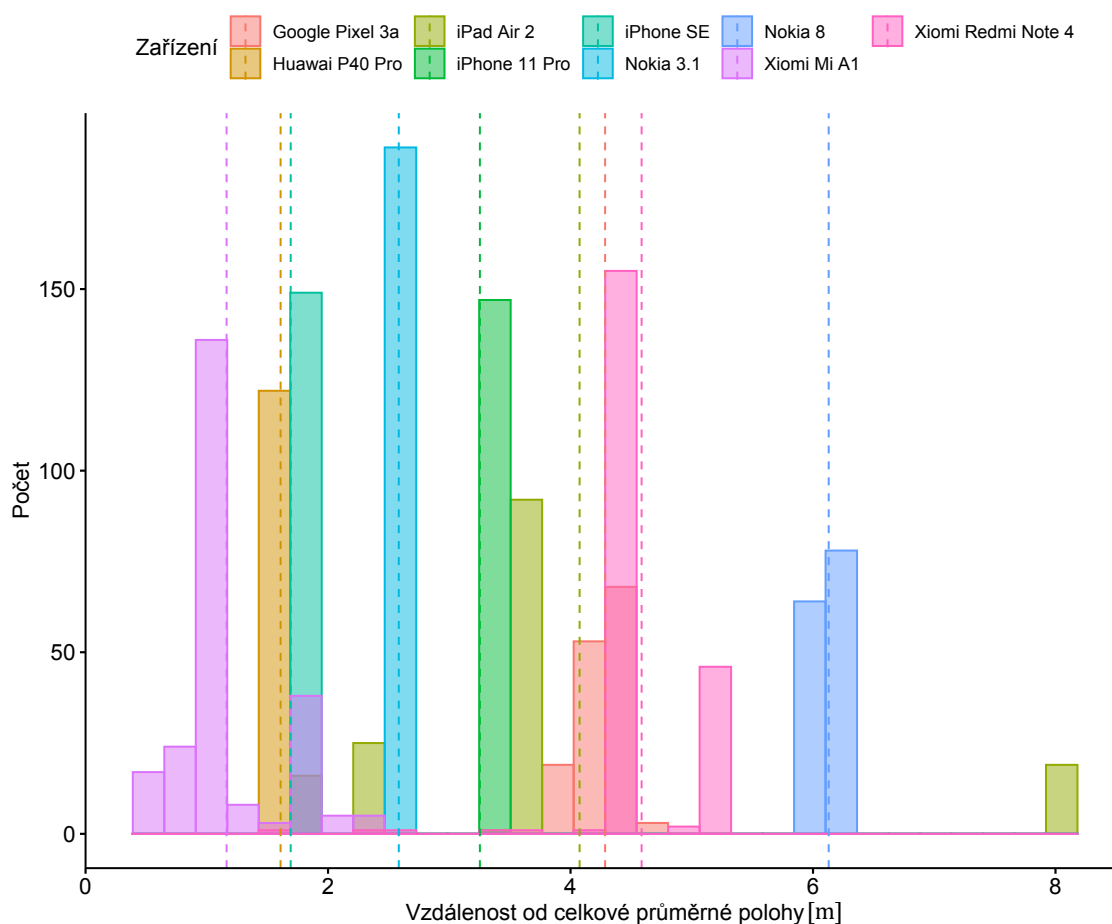
Měření bylo provedeno na všech zařízeních současně, tak aby výsledky měření nebyly ovlivněny změnou prostředí. V průběhu měření byla mobilní zařízení položena na zemi vedle sebe, takže reálná fyzická poloha zařízení nebyla totožná. Výsledky mohou obsahovat drobné rozdíly v poloze přibližně do 0,5 metru, ale jakýkoliv signifikantnější rozdíl je možné považovat za chybu v lokalizaci zařízení.



Obr. 25 Korelace mezi počtem záznamů a vzdáleností od průměrné polohy

Obr. 25 obsahuje výsledek výpočtu korelace mezi počtem záznamů a vzdáleností od celkové průměrné polohy. Hodnota $R = -0,55$ naznačuje, že korelace opravdu existuje a je možné říct, že čím vyšší je počet záznamů, tím přesnější je určení polohy zařízení (respektive průměrná poloha). Velikost testovaného vzorku je ale malá, takže není možné vyloučit možnost, že se jedná pouze o anomálii.

Rozdíly mezi záznamy konkrétních zařízení



Obr. 26 Histogram vzdálenosti od celkové průměrné polohy

Tabulka 6 Statistická analýza vzdálenosti od celkové průměrné polohy

Zařízení	Průměr	Směrodatná odchylka
Google Pixel 3a	4,28518768	0,18948199
Huawei P40 Pro	1,60861996	0,04058059
iPad Air 2	4,07468692	1,6759625
iPhone 11 Pro	3,25238122	0
iPhone SE	1,6919084	0
Nokia 3.1	2,58343906	0
Nokia 8	6,12939613	0,06104865
Xiaomi Mi A1	1,16318557	0,42982474
Xiaomi Redmi Note 4	4,58623215	0,44619489

V předešlé sekci jsme určili celkovou průměrnou polohu zařízení. Cílem této sekce je porovnání záznamů konkrétních zařízení oproti celkové průměrné poloze. Pro každý záznam polohy každého zařízení byla určena vzdálenost v metrech od celkové průměrné polohy a tato vzdálenost je vizualizována v Obr. 26 a Tabulka 6.

Při pohledu na data je zřejmé, že se zařízení chovají rozdílně. Určená poloha zařízení iPhone 11 Pro, iPhone SE a Nokia 3.1 byla ve všech záznamech daného zařízení totožná. Naopak největší rozdíly mezi záznamy jednoho zařízení můžeme nalézt u iPad Air 2, jehož směrodatná odchylka záznamů je 1,68, což je téměř čtyřnásobně větší hodnota v porovnání s Xiaomi Redmi Note 4, jenž má druhou nejvyšší směrodatnou odchylku záznamů o hodnotě 0,45.

Vysoký rozdíl mezi průměrem a směrodatnou odchylkou dat iPhone 11 Pro, iPhone SE a iPad Air 2 vyvrací možnost korelace mezi určením polohy a výrobcem zařízení či nadstavbou operačního systému výrobce.

Čas GNSS satelitu může být nepřesný řádově o nanosekundy, díky limitacím technologií dnešní doby. Tento fakt může způsobit chybu v měření o hodnotě přibližně 1 meter [2]. Fyzická poloha zařízení během měření se lišila přibližně o 0,5 metru. Na základě těchto informací můžeme označit hodnoty pod 1,5 metru jako přesné určení polohy za limitací použité technologie. Provedený experiment dokazuje, že v reálném prostředí většina zařízení určila svoji polohu s lehce vyšší nepřesností, ale ve všech případech se jedná řádově o jednotky metrů.

5.1.2 Test jízdy automobilem

Test jízdy automobilem se skládal ze 3 měření. Každé měření probíhalo v jiném prostředí, viz kapitola 4.2.1 Outdoor prostředí – GNSS technologie.

Všechna měření nebyla z logistických důvodů provedena na všech zařízeních. Pokud měření na zařízení nebylo provedeno, tak Tabulka 7 a Tabulka 9 obsahuje symbol pomlčky místo hodnoty měření. Na většině zařízení byla provedena měření ve všech

testovaných podmínkách, takže nedostupnost některých dat by neměla mít signifikantní vliv na výsledek experimentu.

Počet záznamů

První sledovanou vlastností je počet záznamů polohy, který operační systém poskytl aplikaci během měření.

Tabulka 7 Přehled počtu záznamů polohy během jízdy automobilem

Zařízení	Jízda ve městské zástavbě	Jízda po městském okruhu	Jízda po rychlostní silnici
Huawei P40 Pro	824	608	896
iPad Air 2	825	609	897
iPhone SE	825	609	897
Nokia 3.1	824	608	896
Nokia 8	824	608	896
Google Pixel 3a	824	608	896
iPhone 11 Pro	826	609	890
Sony Xperia Z4 (SGP771)	821	-	896
iPhone 6S	826	-	896
Xiaomi Mi A1	-	608	-
Xiaomi Redmi Note 4	-	608	-

Tabulka 8 Statistická analýza počtu záznamů polohy během jízdy automobilem

	Jízda ve městské zástavbě	Jízda po městském okruhu	Jízda po rychlostní silnici
Minimum	821	608	890
Maximum	826	609	897
Průměr	824,3333333	608,3333333	895,5555556
Směrodatná odchylka	1,5	0,5	2,127857556

Počet záznamů polohy ve všech měřeních byl na všech zařízeních velmi podobný. Rozdíl mezi maximálním a minimální počtem záznamů byl méně než 5 %, takže rozdíl můžeme považovat za statisticky nevýznamný.

Z výsledků měření můžeme usoudit, že v testovaných podmínkách nemá model zařízení ani operační systém signifikantní vliv na počet záznamů polohy.

Délka jízdy

Délka jízdy je kumulativní součet vzdáleností mezi jednotlivými polohami, které operační systém poskytl danému zařízení během experimentu. Naměřené hodnoty jsou vždy uváděny v jednotkách metrů.

Tabulka 9 Přehled záznamu délky jízdy během jízdy automobilem

Zařízení	Jízda ve městské zástavbě [m]	Jízda po městském okruhu [m]	Jízda po rychlostní silnici [m]
Huawei P40 Pro	9603,391523	6305,550333	23170,80033
iPad Air 2	9574,704407	6304,960163	23176,94322
iPhone SE	9563,991675	6292,725092	23169,17424
Nokia 3.1	9630,832964	6341,556806	23195,3268
Nokia 8	9557,277496	6313,331973	23157,95836
Google Pixel 3a	9615,768935	6291,030151	23156,7065
iPhone 11 Pro	9659,739435	6337,755267	23172,68798
Sony Xperia Z4 (SGP771)	9622,680134	-	23151,4929
iPhone 6S	9665,857363	-	23156,78153
Xiomi Mi A1	-	6330,53327	-
Xiomi Redmi Note 4	-	6284,523434	-

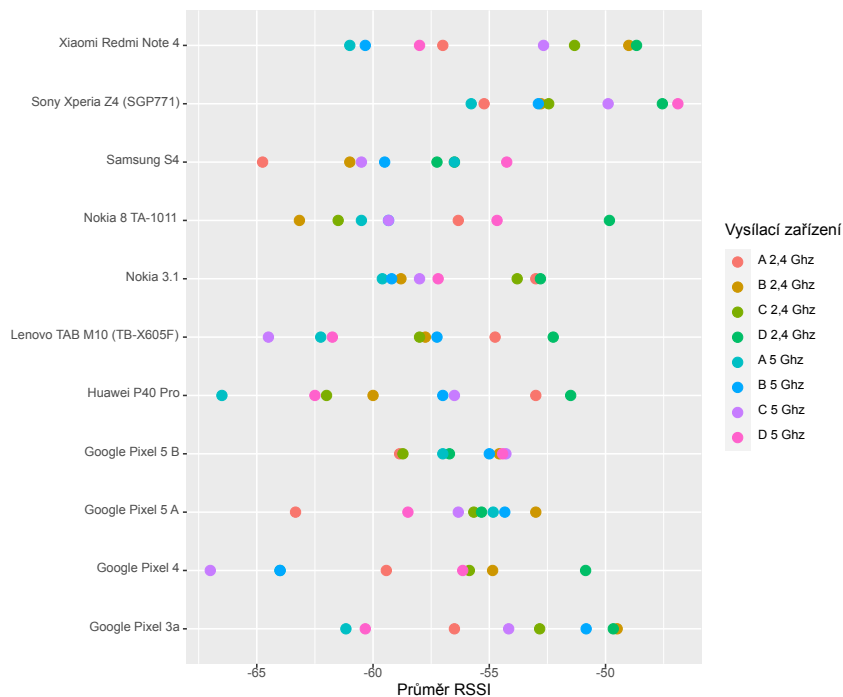
Tabulka 10 Statistická analýza záznamu délky jízdy během jízdy automobilem

	Jízda ve městské zástavbě [m]	Jízda po městském okruhu [m]	Jízda po rychlostní silnici [m]
Minimum	9557,277496	6284,523434	23151,4929
Maximum	9665,857363	6341,556806	23195,3268
Průměr	9610,471548	6311,32961	23167,54132
Směrodatná odchylka	39,37958421	21,02238633	13,614126

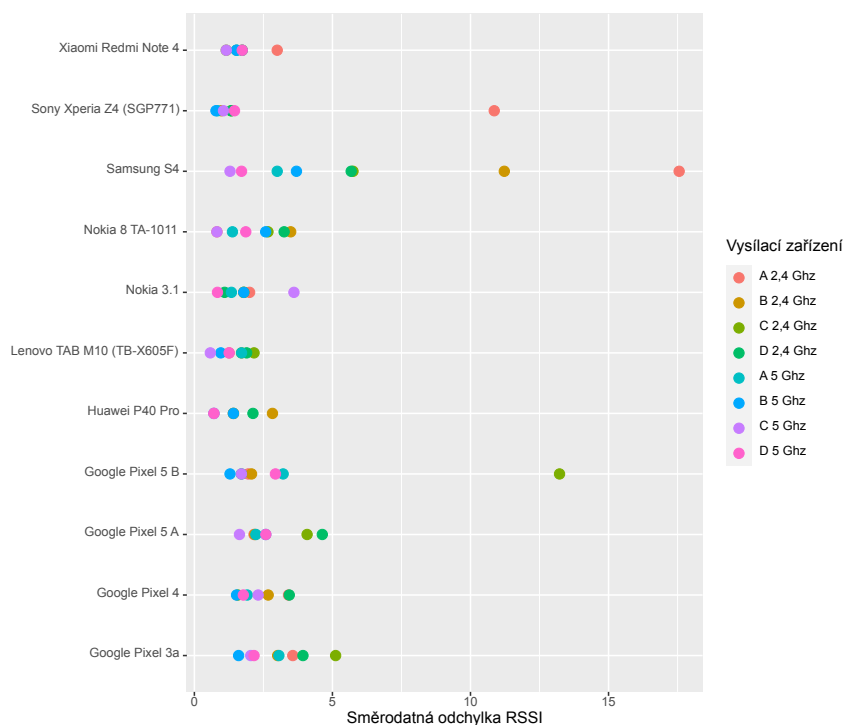
Zaznamenaná délka jízdy se mezi zařízeními signifikantně neliší. Rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou je, stejně jako u počtu záznamů, méně než 5 %, takže je statisticky nevýznamný.

V kapitole 4.2.1 Outdoor prostředí – GNSS technologie je uveden předpoklad, že, vzhledem k vlastnostem GNSS technologie, nejmenší rozdíly mezi zařízeními budou u záznamu jízdy po rychlostní silnici. Naopak největší rozdíly jsem předpokládal u testu jízdy ve městské zástavbě. Na základě výsledků měření je možné tento předpoklad označit za pravdivý; jízda ve městské zástavbě má největší směrodatnou odchylku a jízda po rychlostní silnici má nejmenší směrodatnou odchylku.

5.2 Wi-Fi RSSI



Obr. 27 Wi-Fi RSSI průměr



Obr. 28 Wi-Fi RSSI směrodatná odchylka

Tabulka 11 Statistická analýza Wi-Fi RSSI

	A	B	C	D
Průměr 2,4 GHz	-57,661017	-55,440678	-55,915254	-51,881356
Průměr 5 GHz	-59,271186	-56,847458	-57,254237	-55,694915
Směrodatná odchylka 2,4 GHz	6,91976223	5,35714536	5,93728179	4,31151124
Směrodatná odchylka 5 GHz	3,83194606	4,31442472	5,53855832	4,8289866

Hodnota Wi-Fi RSSI značí sílu přijatého signálu mobilním zařízením. Primární využití RSSI, na rozdíl od GNSS nebo Wi-Fi RTT, není lokalizace mobilního zařízení, ačkoliv jí některé systémy takto využívají [9].

Průměrná změřená RSSI hodnota se signifikantně liší mezi modely zařízení, viz Obr. 27. Měření ze zařízení *Google Pixel 5 A* a *Google Pixel 5 B* dokazují, že RSSI se může lišit nejen mezi modely zařízení, ale i mezi jednotlivými kusy stejného modelu, byť se jedná o menší rozdíl oproti jiným modelům. Většina hodnot se nachází v rozmezí -50 až -65. Průměrná směrodatná odchylka v měření je 4,6, což je relativně vysoká hodnota vzhledem k velikosti rozsahu RSSI hodnot.

Tabulka 11 obsahuje průměrné RSSI a jeho směrodatnou odchylku pro obě frekvenční pásma každého vysílače zařízení. Průměrné RSSI u vysílačů C a D je zásadně rozdílné v obou měřených frekvencích, i přesto že vzdálenost mezi zařízením a vysílačem byla téměř totožná a mezi zařízením a vysílačem se nenacházela žádná překážka. U všech vysílačů platí, že měření na frekvenci 5 GHz mají menší směrodatnou odchylku než u frekvence 2,4 GHz.

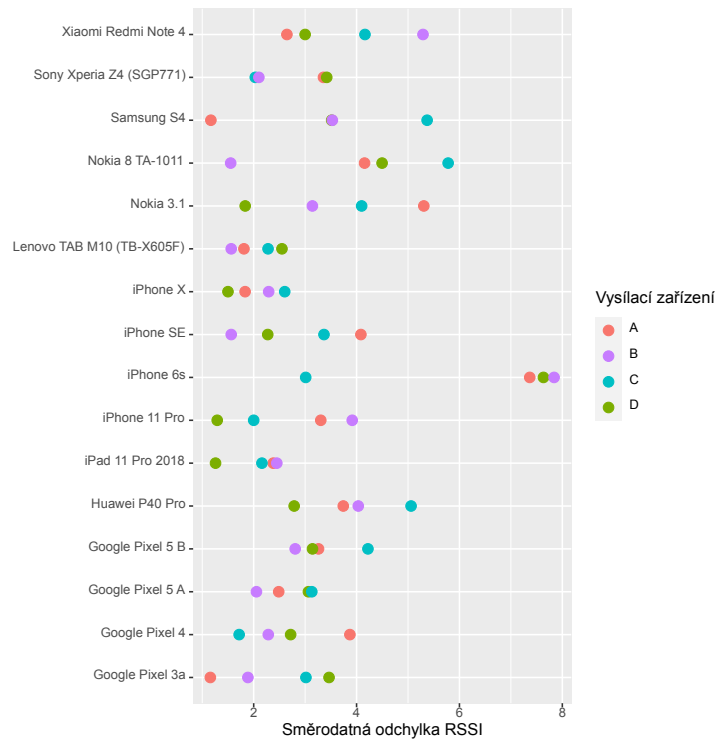
Z výsledků je zřejmé, že pokud se vysílač nachází blíže k zařízení, tak nemusí mít vyšší sílu signálů. Tento fakt se dal předpokládat vzhledem k vlastnostem chování signálu v indoor prostředí a v dnešní době existují metody (například fingerprint algoritmus), které tento problém řeší a jsou více popsány v kapitole 3.2 Lokalizace v indoor prostředí. Zásadním problémem je, ale vysoká variabilita RSSI hodnot mezi jednotlivými zařízeními, viz Obr. 27. Z výsledků provedených měření je možné dojít

k závěru, že lokalizace zařízení na základě Wi-Fi RSSI není vhodným způsobem pro určení polohy zařízení.

5.3 Bluetooth RSSI



Obr. 29 Bluetooth RSSI průměr



Obr. 30 Bluetooth RSSI směrodatná odchylka

Tabulka 12 Statistická analýza Bluetooth Beacons RSSI

	A	B	C	D
Průměr	-93,485876	-92,112994	-88,112994	-92,632768
Směrodatná odchylka	4,40313337	3,49166224	4,13393668	4,33218003

Lokalizace zařízení pomocí Bluetooth se stejně jako u předešlé sekce zakládá na měření síly signálu neboli RSSI. V rámci experimentu zařízení měřila signál od 4 vysílacích zařízení (A, B, C, D), která byla umístěna na totožných místech jako Wi-Fi vysílací zařízení se stejným identifikátorem.

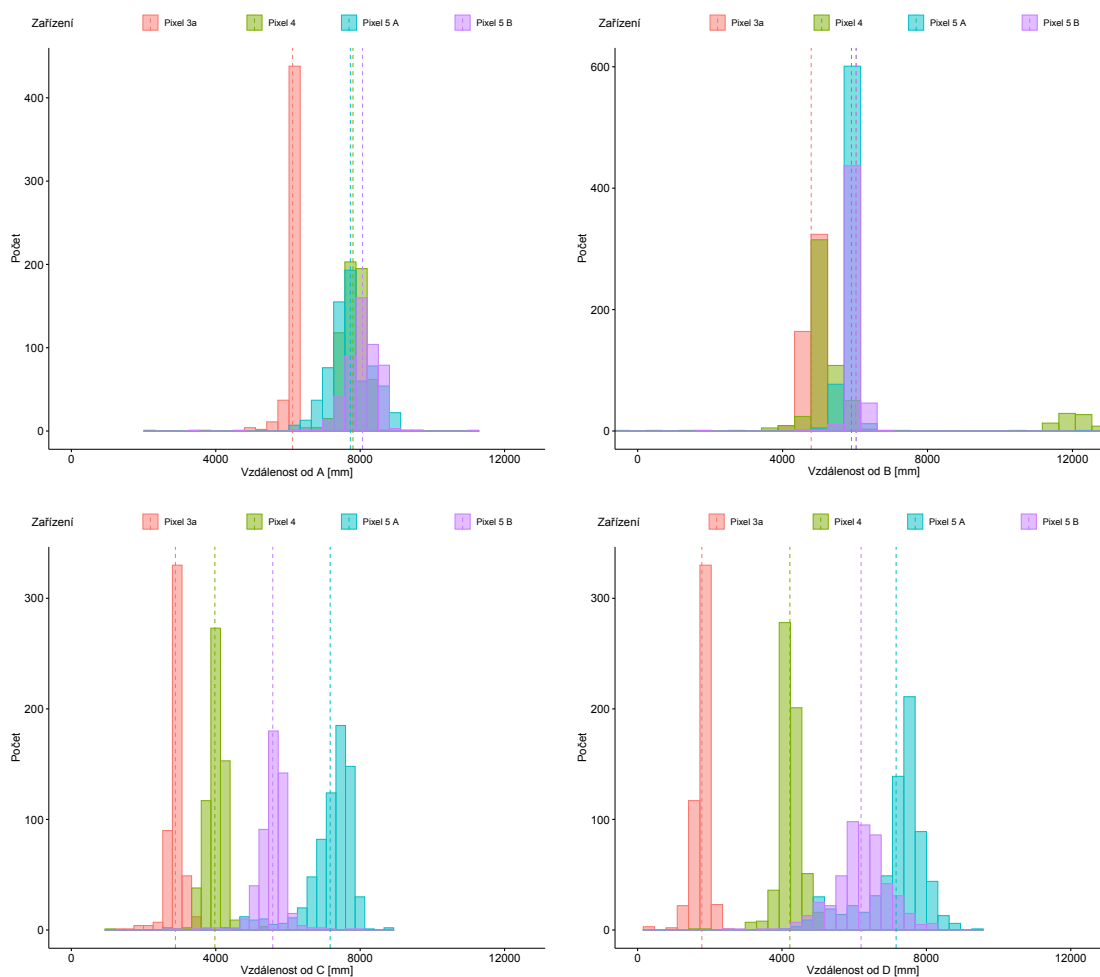
Graf na Obr. 29 znázorňuje průměrné RSSI hodnoty pro každé zařízení. Většina hodnot se nachází v rozmezí od -100 do -85. Velikost rozsahu většiny hodnot je podobná jako u měření Wi-Fi RSSI, ale rozsah je posunutý o -35.

Data na Obr. 29 ukazují signifikantní rozdíly mezi hodnotami z jednotlivých zařízení. Stejný problém se vyskytl také u měření Wi-Fi RSSI. Tento fakt bohužel zásadně negativně ovlivňuje využitelnost technologie pro lokalizaci zařízení, viz kapitola 5.2 Wi-Fi.

Průměrná směrodatná odchylka měření je 4,075, což je nižší hodnota než u měření Wi-Fi RSSI. Stále se ale jedná o vysokou hodnotu vzhledem k velikosti rozsahu výsledků měření. Díky nižší variabilitě mezi zařízeními můžeme říct, že v testovaném prostředí je Bluetooth RSSI vhodnější lokalizační metoda než Wi-Fi RSSI, i tak musíme počítat s vysokou mírou chybovosti v určení polohy zařízení. Pokud bychom Bluetooth RSSI použili v kombinaci s fingerprint algoritmem, tak můžeme očekávat chybovost lokalizace zařízení v řádech jednotek metrů. Přesná hodnota chybovosti bude záviset na vlastnostech prostředí a implementaci fingerprint algoritmu. Pokud potřebujeme určit polohu zařízení s vyšší přesností, tak metody založené měření RSSI nejsou vhodnou metodou lokalizace zařízení.

5.4 Wi-Fi RTT

Wi-Fi RTT měření bylo provedeno v totožných podmínkách s předchozími Wi-Fi RSSI a Bluetooth RSSI testy. Vzhledem k omezenému množství podporovaných modelů zařízení bylo Wi-Fi RTT měření provedeno pouze na 4 mobilních zařízeních – Google Pixel 3a, Google Pixel 4 a 2 kusy Google Pixel 5.



Obr. 31 Histogramy Wi-Fi RTT měření

Z histogramů výsledků měření je zjevné, že variabilita výsledků je výrazně vyšší u vysílačích zařízení C a D. Variabilita u těchto vysílačů je překvapivá, jelikož se mezi mobilním zařízením a vysílači C a D nenacházela žádná překážka na rozdíl od vysílačů A a B, jejichž měření má paradoxně nižší směrodatnou odchylku.

Tabulka 13 Statistická analýza Wi-Fi RTT měření

	Průměr	Směrodatná odchylka
Vzdálenost od A	7473,27693	846,5783959
Vzdálenost od B	5721,78064	1331,049066
Vzdálenost od C	5057,61143	1721,165593
Vzdálenost od D	5013,0157	2132,279129

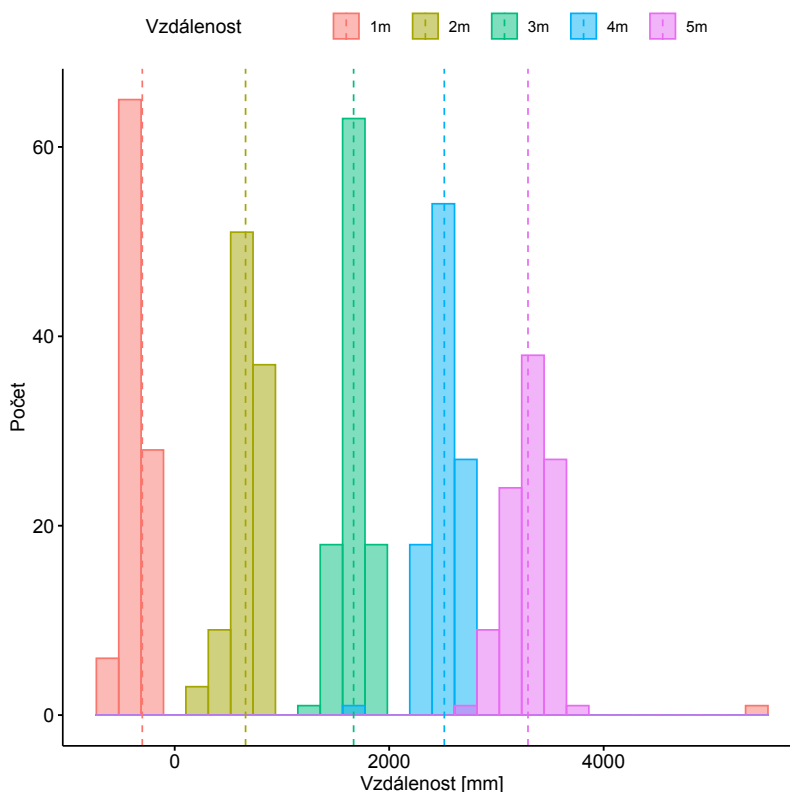
Dle statistické analýzy můžeme vysílací zařízení rozdělit do dvou skupin. Měření u vysílačů A a B má nižší směrodatnou odchylku, ale vyšší rozdíl mezi průměrnou určenou a reálnou vzdáleností. Data měření vysílačů C a D mají sice vyšší směrodatnou odchylku, ale v průměru mají nižší chybu v určení vzdálenosti.

Vysílače v těchto skupinách měly během testu 2 společné vlastnosti:

1. Směrovost: Vysílače C a D se nacházely nad mobilním zařízením; vysílače A a B se nacházely vedle zařízení.
2. Vzdálenost: Reálná vzdálenost mezi mobilním zařízením a vysílači C a D byla velmi podobná – přibližně 5,45 m. Vysílač A se nacházel nejdále od mobilního zařízení – 6,36 m – a vysílač B se naopak nacházel nejbližší s vzdáleností 4,18 m.

Na základě zjištěných výsledků byly provedeny 2 dodatečné experimenty ověřující vliv daných vlastností na přesnost lokalizace zařízení technologií Wi-Fi RTT.

5.4.1 Vzdálenost



Obr. 32 Histogram měření vzdálenosti Wi-Fi RTT

Tabulka 14 Statistická analýza Wi-Fi RTT měření vzdálenosti

	Průměr	Směrodatná odchylka
1m	-302,2	586,6193679
2m	660,8	120,743488
3m	1668,31	134,8223444
4m	2513,95	145,868723
5m	3294,41	182,0128253

Výsledky testů můžeme, dle statistické analýzy v Tabulka 14, rozdělit do dvou skupin podle charakteristik výsledků. Při měření s reálnou vzdáleností 1 m mají výsledky násobně vyšší variabilitu oproti ostatním vzdálenostem. Průměrná určená vzdálenost je -302,2 mm, což je jednoznačně chybná hodnota, protože vzdálenost může být pouze nezáporné číslo. Dokumentace společnosti Google uvádí, že při blízkých vzdálenostech může určená vzdálenost být záporná, ale v dokumentaci

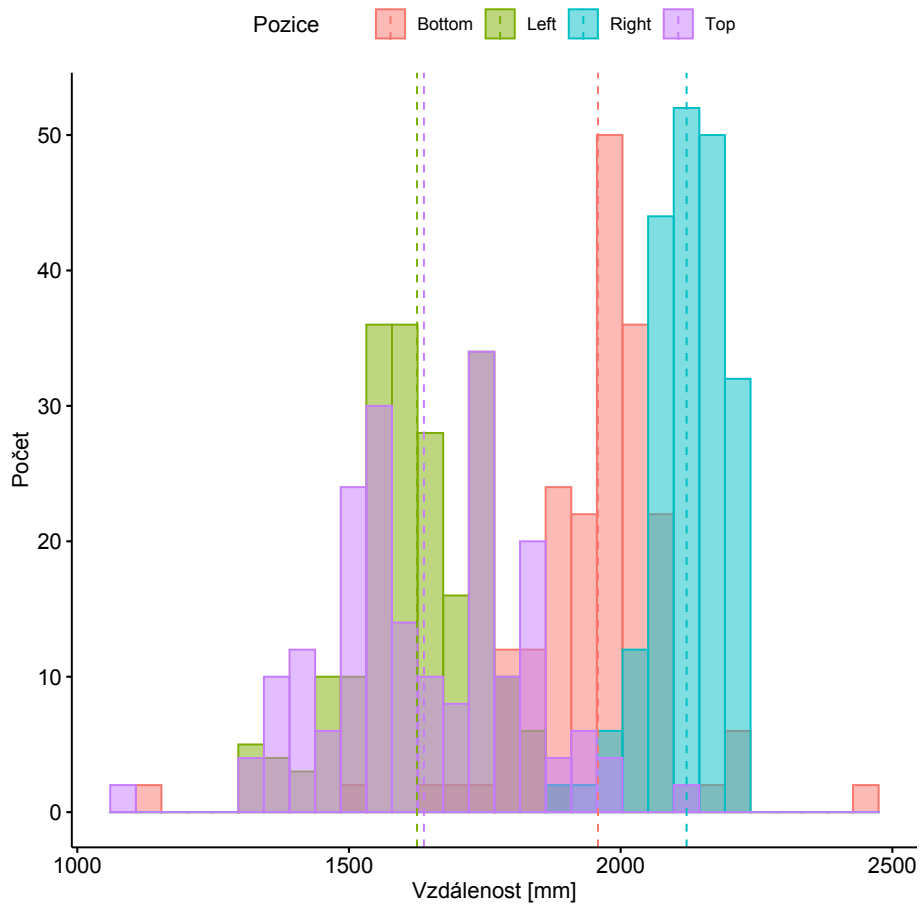
není řečeno, co přesně záporná hodnota znamená a jak by s ní aplikace měla pracovat [18].

Výsledky měření s reálnou vzdáleností 2 m nebo více mají nižší směrodatnou odchylku, která se postupně zvyšuje s nárůstem reálné vzdálenosti. Při všech vzdálenostech byla určená vzdálenost výrazně nižší než reálná hodnota. Rozdíl mezi určenou a reálnou vzdáleností se pohyboval v rozmezí -1,3 m až -1,7 m a postupně se zvyšoval při zvětšení reálné vzdálenosti.

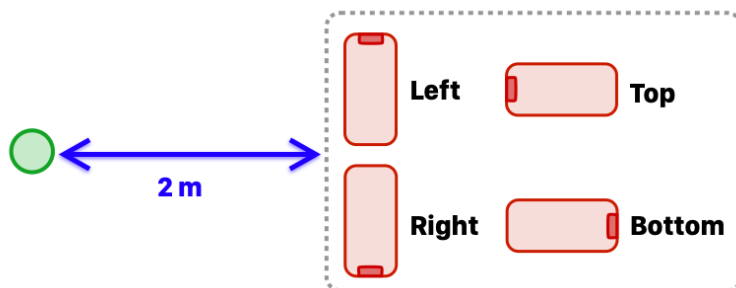
Pokud je vzdálenost mezi vysílačem a zařízením vyšší než 2 m, tak rozdíl mezi reálnou a určenou vzdáleností je sice signifikantní, ale také konzistentní a predikovatelný. Pokud s tímto faktem budeme počítat již při návrhu systému, tak se nejedná o zásadní problém znemožňující využití technologie.

Fingerprint algoritmus se sice standardně používá v kombinaci s technologiemi založenými na měření RSSI, ale algoritmus je možné použít i v kombinaci s Wi-Fi RTT. Při správném sestavení radiové mapy, například pomocí neuronové sítě [9], můžeme zcela eliminovat problém s rozdílem mezi reálnou a změřenou vzdáleností.

5.4.2 Směrovost



Obr. 33 Histogram měření směrovosti Wi-Fi RTT



Obr. 34 Diagram měření směrovosti Wi-Fi RTT

Tabulka 15 Statistická analýza směrovosti Wi-Fi RTT

	Průměr	Směrodatná odchylka
Bottom	1958,25	149,988768
Left	1625,22	119,541173
Right	2121,32	60,3440521
Top	1637,93	179,577072

Experiment směrovosti se skládal ze 4 měření. Vzdálenost mezi zařízením a vysílačem byla ve všech měřeních stejná – 2 m. Před každým měřením bylo zařízení otočeno o 90 stupňů. Vzhledem k totožné reálné vzdálenosti můžeme označit jakýkoliv rozdíl mezi měřeními za chybu.

Výsledky měření zobrazené v Obr. 33 a Tabulka 15 zobrazují signifikantní rozdíl mezi hodnotami v měřeních. Reálná vzdálenost mezi vysílačem a zařízením byla 2 m; rozsah průměrů změřených hodnot je v rozmezí od 1,6 m do 2,1 m.

Vliv směrovosti na Wi-Fi RTT lokalizaci může představovat zásadní problém komplikující využití této technologie v praxi. Pokud bychom například technologii využili ve skladové budově pro lokalizaci robotů, tak směr natočení robota bude ovlivňovat výsledek Wi-Fi RTT lokalizace a vzhledem k velikosti rozdílů je pravděpodobné, že by chyby měření výrazně negativně ovlivnily chování robota.

Průměrná určená vzdálenost ve všech 4 měření byla blíže reálné hodnotě než u předešlého testu vzdálenosti, viz kapitola 5.4.1 Vzdálenost. V testu vzdálenosti byla průměrná hodnota (při reálné vzdálenosti 2 m) 0,66m, což je násobně nižší hodnota než při testu směrovosti. Rozdíl mezi těmito 2 testy byl v prostředí – test směrovosti byl proveden uvnitř budovy; test vzdálenosti probíhal ve venkovním prostředí. Kombinace výsledků těchto měření dokazuje, že charakteristiky prostředí zásadně ovlivňují výsledky měření, což můžeme považovat za další nevýhodu technologie Wi-Fi RTT.

6 Závěr, shrnutí výsledků a doporučení

Předmětem práce „Lokalizační technologie pro mobilní zařízení“ bylo srovnání 4 technologií umožňujících určení polohy mobilního zařízení – GNSS, Bluetooth RSSI, Wi-Fi RSSI a Wi-Fi RTT. První kapitoly práce se zabývaly popisem jednotlivých technologií, jejich vlastností a limitací. Druhá část práce obsahovala sérii experimentů zkoumajících chování technologií v podmínkách reálného světa.

První experimenty pracují s technologií GNSS, což je kategorie satelitních lokalizačních systémů jako například GPS, které se primárně využívají v outdoor prostředí, vzhledem ke vlastnostem technologie. Typickým příkladem využití může být například automobilová navigace. Provedená série měření dokazuje, že lokalizace pomocí GNSS je spolehlivá s chybovostí v řádu jednotek metrů. Model měřícího zařízení nemá signifikantní vliv na výsledek měření.

Následující experimenty se zaměřily na Bluetooth RSSI a Wi-Fi RSSI. Obě metody lokalizace se zakládají na měření síly signálu (RSSI) vysílaného vysílači v testovaném prostředí. Výsledky experimentů objevily signifikantní rozdíly mezi daty z jednotlivých měřících zařízení. Obecně známým problémem při měření RSSI jsou vlastnosti signálu v indoor prostředí, kde překážky (například stěny objektu) zásadně ovlivňují chování signálu. Existují metody jako fingerprint algoritmus [9], které tento problém částečně řeší, ale i pro tyto metody jsou zásadním problémem zjištěné signifikantní rozdíly mezi daty z jednotlivých zařízení.

Poslední série experimentů se věnuje zkoumání technologie Wi-Fi RTT. Mezi hlavní limitace Wi-Fi RTT patří velmi omezený seznam podporovaných zařízení, jelikož technologie vyžaduje hardwarovou implementaci na straně měřícího i vysílačiho zařízení. Provedená měření odhalila závislost výsledků měření na směrovosti (natočení měřícího zařízení vůči vysílači), což by mohl být problém při nasazení v reálném systému.

Částečným nedostatkem práce je limitovaný vzorek testovaných zařízení. Je možné, že výsledky experimentů obsahují anomálie, jež by větší testovaný vzorek eliminoval. Nicméně to nic nemění na faktu, že experimenty objektivně porovnávají měření na testovaných zařízeních v daném prostředí.

Lokalizace mobilního zařízení je v dnešní době již běžná operace. Existuje mnoho technologií umožňujících určení polohy mobilního zařízení a každá z nich má svoje výhody i nevýhody. Při návrhu systému pracujícího s lokalizací zařízení je důležité myslet na vlastnosti prostředí, z nichž by měla vycházet volba lokalizační technologie a modelu zařízení. Všechny porovnávané technologie se shodují ve faktu, že výsledky měření obsahují určitou míru chybovosti, jejíž hodnota závisí na mnoha faktorech. Obecně řečeno, při lokalizaci pomocí technologií dnešní doby, můžeme očekávat chybovost měření v řádech jednotek metrů.

7 Seznam použité literatury

- [1] „*Number of smartphone users worldwide*” [online]. [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>
- [2] Malý, F., Slabý, A., Kozel, T, Kříž. P. „*Intelligent mobile technologies as a tool of scientific teamwork*”. Gaudeamus Hradec Králové, 2014. ISBN 978-80-7435-353-6.
- [3] Oxford Technical Solutions Ltd., „*What is GNSS?*” [online]. [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://www.oxts.com/what-is-gnss/>
- [4] Kovář P., České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta, „*Softwarové rádio a jeho aplikace v GNSS*”. V Praze: České vysoké učení technické, 2007. ISBN 978-80-01-03884-0.
- [5] Oxford Technical Solutions Ltd., „*Trilateration: How distance measurements help to work out location*” [online]. [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://www.oxts.com/trilateration>
- [6] European GNSS Agency, „*Test your Android device’s satellite navigation performance*” [online]. [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/test-your-android-device-s-satellite-navigation-performance>
- [7] Bekkelien A., „*Bluetooth Indoor Positioning*”, Master thesis, University of Geneva.
- [8] Xu R., Liu J., Zhu J., a Jiang X., „The Design and Construction of WLAN-Based Indoor Navigation System”, in *Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem*, roč. 482, F. Bian a Y. Xie, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, s. 437–446. ISBN 978-3-662-45737-5.
- [9] B. Jia, Z. Zong, B. Huang, a T. Baker, „A DNN-based WiFi-RSSI Indoor Localization Method in IoT”, in *Communications and Networking*, roč. 352, H. Gao, P. Fan, J. Wun, X. Xiaoping, J. Yu, a Y. Wang, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2021, s. 200–211. ISBN 978-3-030-67720-6.
- [10] Kochkurov D., „*Technology of iBeacon and its application for people with special needs*”, Master thesis, Czech Technical University of Prague Faculty of Transportation Sciences.
- [11] Bluetooth Special Interest Group, Inc., „*Bluetooth Radio Versions*” [online]. [cit. 2021-01-16]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/radio-versions/>
- [12] Apple Computer, Inc., „*Apple Developer Documentation: Bluetooth*” [online]. [cit. 2021-01-16]. Dostupné z: <https://developer.apple.com/bluetooth/>

- [13] Bluetooth Special Interest Group, Inc., „*Bluetooth Low Energy – It Starts with Advertising*” [online]. [cit. 2021-01-16]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/blog/bluetooth-low-energy-it-starts-with-advertising/>
- [14] Hernández-Rojas D., Fernández-Caramés T., Fraga-Lamas P., a Escudero C., „*Design and Practical Evaluation of a Family of Lightweight Protocols for Heterogeneous Sensing through BLE Beacons in IoT Telemetry Applications*”, *Sensors*, roč. 18, č. 2, s. 57, pro. 2017, DOI: 10.3390/s18010057.
- [15] „*Wi-Fi location: ranging with RTT*” [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/wifi-rtt>
- [16] Google LLC, „*Android devices that support WiFi-RTT*” [online]. [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/wifi-rtt#supported-devices>
- [17] Apple Computer, Inc., „*iOS Wi-Fi Management APIs*” [online]. [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: https://developer.apple.com/library/archive/qa/qa1942/_index.html
- [18] Google LLC, „*Android Developers Documentation: RangingResult*” [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://developer.android.com/reference/android/net/wifi/rtt/RangingResult>

8 Přílohy

- 1) Zdrojový kód měřících mobilních aplikací (GNSS, Bluetooth a Wi-Fi).

Zadání bakalářské práce

Autor: Tomáš Pařízek

Studium: I1800507

Studijní program: B1802 Aplikovaná informatika

Studijní obor: Aplikovaná informatika

Název bakalářské práce: **Lokalizační technologie pro mobilní zařízení**

Název bakalářské práce AJ: Location technology for mobile devices

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Rámcová osnova práce:

1. Úvod\par
2. Cíl práce\par
3. Lokalizační technologie (*popis technologií, historie, rozdíly, ideální využití*)\par
 1. GPS
 2. WIFI
 3. Bluetooth beacons
4. Experimenty\par
 1. GPS
 1. Metodika
 2. Výsledky
 2. WIFI
 1. Metodika
 2. Výsledky
 3. Bluetooth beacons
 1. Metodika
 2. Výsledky
5. Závěr a doporučení\par
6. Seznam použité literatury\par

Lokalizační technologie (GPS, Bluetooth Beacons,WIFI) podstata, rozdíly, přesnost

Získání, zpracování, porovnání a zhodnocení dat z lokalizačních senzorů konkrétních mobilních zařízení s použitím vlastní mobilní aplikace

- MALÝ, Filip, A. SLABÝ, T. KOZEL, P. KŘÍŽ, O. BERGER, T. CHLOUBA, J. KYSELA, M. ZVÍŘECÍ. Intelligent mobile technologies as a tool of scientific teamwork. 1.vyd. Hradec Králové: Gaudeamus, 2014. ISBN 978-80-7435-353-6.
- Hernández N., Alonso J.M., Oca\ {n

a M., Marina M.K. (2013) Impact of Signal Representations on the Performance of Hierarchical WiFi Localization Systems. In: Moreno-Díaz R., Pichler F., Quesada-Arencia A. (eds) Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2013. EUROCAST 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol 8112. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-53862-9_3

- Kwiecień A., Maćkowski M., Kojder M., Manczyk M. (2015) Reliability of Bluetooth Smart Technology for Indoor Localization System. In: Gaj P., Kwiecień A., Stera P. (eds) Computer Networks. CN 2015. Communications in Computer and Information Science, vol 522. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19419-6_42
- Yang L., Li B., Li H., Shen Y. (2017) iBeacon/WiFi Signal Characteristics Analysis for Indoor Positioning Using Mobile Phone. In: Sun J., Liu J., Yang Y., Fan S., Yu W. (eds) China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2017 Proceedings: Volume I. CSNC 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 437. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4588-2_35
- Lee L., Jones M., Ridenour G.S., Testa M.P., Wilson M.J. (2015) Investigating and Comparing Spatial Accuracy and Precision of GPS-Enabled Devices in Middle Tennessee. In: Bian F., Xie Y. (eds) Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem. GRMSE 2014. Communications in Computer and Information Science, vol 482. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45737-5_22

Garantující pracoviště: Katedra informatiky a kvantitativních metod,
Fakulta informatiky a managementu

Vedoucí práce: prof. RNDr. PhDr. Antonín Slabý, CSc.

Oponent: Ing. Pavel Kříž, Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce: 15.9.2020