Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Možnosti Bluetooth technologie pro lokalizaci osob v objektu

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

Autor práce:

Matěj Štangler

Praha 2021

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Matěj Štangler

Zemědělské inženýrství

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Možnosti bluetooth technologie pro lokalizaci osob v objektu

Název anglicky

Possibilities of Bluetooth technology for locating people in the building

---

Cíle práce

Cílem práce je analyzovat technologii Bluetooth pro sledování pohybu osob v uzavřeném objektu. Bude proveden fyzikální rozbor přenosu, popis verzí, analýza energetické náročnosti. Na základě těchto poznatku bude navržen a realizován praktický pokus na jehož základě budou formulovány závěry pro reálné možnosti nasazení technologie pro uvedené použití. V závěru bude diskutován reálný dosah, přesnost a možnosti pro další zpřesnění.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika
4. Popis technologie a verze
5. Porovnání a zhodnocení verzí
6. Definice metodiky měření a praktická realizace měření
7. Výsledky a analýza měření
8. Zhodnocení a závěr

Doporučený rozsah práce

30 až 40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Klíčová slova

počítačová síť, bezpečnost, bluetooth, lokalizace

Doporučené zdroje informací

Alasdair Allan: Make: Bluetooth, O'Reilly Media, Inc, USA, 2015, ISBN: 1457187094
internet
Tkáč, J.: Jak na Bluetooth v rekordním čase, Grada, 2005, ISBN:8024710811
Townsend, Kevin: Getting Started with Bluetooth Low Energy, O'Reilly Media, Inc, USA, 2014

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2020

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 07. 04. 2021

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Možnosti Bluetooth technologie pro lokalizaci osob v objektu vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne: ....

Matěj Štangler

Poděkování

Tímto bych chtěl věnovat poděkování vedoucímu práce, panu Ing. Zdeňku Votrubovi, Ph.D., za pomoc při výběru tématu a jeho následném zpracování. Dále také patří dík mým přátelům a kolegům, kteří mi v průběhu práce dávali rady a cennou zpětnou vazbu.

Možnosti Bluetooth technologie pro lokalizaci osob v objektu

Abstrakt: Tato práce zkoumá možnosti technologie Bluetooth. Cílem bylo zjistit, jestli je možné ji využít jako lokalizační technologii v rámci budovy. Po teoretickém přezkoumání problematiky a utvoření dílčích závěrů byl proveden pokus zkoumající vliv prostředí na kvalitu přenosu. Z jeho závěru vyplívá, že tento vliv je nezanedbatelný, a tudíž se mu musí architektura systému do určité míry přizpůsobit. Obě části práce se shodují na tom, že Bluetooth se zamýšleným způsobem za určitých podmínek využít dá.

Klíčová slova: Bluetooth, lokalizace, Bluetooth Low Energy, Beacon, počítačová síť, bezpečnost

Possibilities of Bluetooth technology for locating people in the building

Summary: This thesis assesses the possibilities of Bluetooth. The goal was to find out, if it is possible to use it for localization within a building. After a theoretical review and sectional conclusions were made, an experiment was performed. This experiment was focused on examining the influence of the environment on the transmission. Its conclusion indicates that it is necessary to take the environmental circumstances into consideration while designing supposed system. Both parts of this thesis conclude that it is possible to use Bluetooth as intended if certain conditions are met.

Key words: Bluetooth, localization, Bluetooth Low Energy, Beacon, computer network, security

Obsah

1. Úvod 1
2. Cíle práce 2
3. Metodika 2
4. Princip činnosti 3
4.1. Kontext problematiky 3
4.1.1. Internet věcí 3
4.1.2. Chytré budovy 3
4.2. Shrnutí 4
4.3. Bluetooth – verze a jejich rozdíly 4
4.3.1. Bluetooth 2.1 + EDR 5
4.3.2. Bluetooth 3.0 + HS 7
4.3.3. Bluetooth 4.0 7
4.3.4. Bluetooth 4.1 a 4.2 12
4.3.5. Bluetooth 5.0 12
4.3.6. Bluetooth 5.1 13
4.3.7. Bluetooth 5.2 15
4.4. Vyhodnocení vhodnosti verzí 16
4.4.1. Stanovení požadavků 16
4.4.2. Vyhodnocení vyhovění požadavkům 17
4.5. Rozbor fungování radiového přenosu 19
4.5.1. Frekvence 19
4.5.2. Modulace 20
4.5.3. Radiová anténa a vysílaní signálu 21
4.5.4. Rušení frekvenčně sousedními technologiemi 25
4.5.5. Vliv prostředí 27
4.5.6. Shrnutí 29

4.6. BLE zařízení 29
4.6.1. BLE beacony 30
4.6.2. Hardwarové platformy 32
5. Praktická část práce 32
5.1. Návrh metodiky 33
5.2. Popis realizace 33
5.2.1. Určení míry FSL 33
5.2.2. Zjištění vlivu překážek v ose přenosu na sílu signálu 34
5.2.3. Vliv překážek ve Fresnelově zóně 34
5.3. Výsledky 35
5.3.1. Free space loss 35
5.3.2. Překážky v ose přenosu 37
5.3.3. Překážky pouze ve Fresnelově zóně 39
5.4. Vyhodnocení a závěr praktické části 39
6. Závěr 41
Seznam zdrojů 44
Seznam obrázků 48
Seznam tabulek 48
Seznam rovnic 48
Seznam zkratek 49
Přílohy I

1. Úvod

Již z historie je známo, že výměna informací přináší největší obohacení. Právě tento princip je jedním ze základních pro obor informačních technologií, jehož účelem je mimo jiné také rozvoj systémů pomocí zisku, transportu a zpracování dat.

Se záměrem naplnění této myšlenky se v současné době silně projevuje trend, který se snaží rozšířit možnosti systémů, pomocí zavádění „inteligence“ do zařízení, kde doposud nebyla a tato zařízení spojovat do sítí. Díky vzájemné spolupráci dokážou vylepšovat své existující funkcionality, nebo vykonávat úplně nové. Tímto trendem není nic jiného než internet věcí (IoT).

Pokud se budeme problematikou internetu věcí chvíli zabývat, pak téměř jistě narazíme také na pojem chytrá budova. Jedním z druhů informací, které by takové budově byly užitečné je lokalizace osob, které se v ní pohybují. Precizní mapování pohybu uvnitř budovy je bohužel problémem, který tradiční satelitní lokalizace nedokáže efektivně řešit. Proto se hodí hledat alternativu, která jí v tomto případě nahradí. Je zapotřebí najít takovou technologii, která bude dostatečně přesná, odolná vůči zdrojům rušení, a obecně co nejefektivnější pro danou situaci.

Takovou technologií by mohlo být právě Bluetooth. Jednou z jeho hlavních předností je, že pomocí něj dokáže komunikovat valná většina „chytrých“ zařízení, která jsou v současné chvíli na trhu. A ta zařízení, která jej nemají, jím mohou být poměrně snadno vybavena.

Bluetooth bylo ovšem vyvíjeno primárně jako komunikační médium, a nikoliv jako lokalizační technologie. Vyvstává tedy otázka, jestli je vůbec vhodné pro takové využití a pokud ano, pak do jaké míry. Touto problematikou se budu dále zabývat ve své bakalářské práci.

2. Cíle práce

Hlavním cílem práce je analyzovat vhodnost technologie Bluetooth pro sledování pohybu zařízení (a tím nepřímo také osob) v uzavřeném objektu.

Za účelem ověření této hypotézy je zapotřebí prozkoumat několik klíčových problematik, jejichž závěry budou sloužit jako základ pro návrh praktického pokusu. Cílem pokusu bude poskytnout reálná fakta, která podloží závěr celé práce.

Závěrem práce bude, kromě hodnocení pravdivosti hlavní hypotézy, také předložení návrhů na zlepšení realizace a přesnosti navrhovaného lokalizačního systému.

3. Metodika

V první části bude uveden kontext problematiky a teoretický rozbor verzí Bluetooth. Díky takto získaným znalostem bude předmět zkoumání zúžen pouze na jednu verzi, která nejlépe odpovídá definovaným požadavkům.

Na vybrané verzi budou dále zkoumány vlastnosti, které ovlivňují cílovou funkcionalitu, aby se z hotové rešerše dala jasně vyvodit vhodnost zvolené verze. Bude analyzována především fyzická vrstva přenosu a její fyzikální podstata, jelikož vyšší vrstvy již budou popsány v předešlé části.

Principy, na kterých bude technologie testována v rámci praktické části práce, budou vycházet ze závěrů teoretické části a z předpokládaného reálného využití. Na základě analýzy dat získaných z pokusu bude vypracován závěr dále hodnotící způsobilost verze a tím také technologie k navrhovanému využití. Vyplynou z něj limity, které omezují její přesnost a použitelnost. Pro zjištěná omezení budou diskutována opatření, která by je co nejvíce minimalizovala.

4. Princip činnosti

4.1. Kontext problematiky

4.1.1. Internet věcí

Internet věcí, zkráceně IoT, je pojem, pod kterým se může skrývat mnoho věcí. Obecně se jedná o síť vzájemně propojených zařízení a systémů, které spolupracují a vyměňují si data pro dosažení rozšířené funkcionality. V zásadě nejde o přelomovou novou technologii jako spíš o nový pohled na již existující.

Ještě do nedávna bylo IT považováno za obor, který v mnoha institucích s odlišným zaměřením fungoval pouze jako podpůrný. S příchodem automatizace a elektronizace se však začaly objevovat křížené obory, které se zaměřují na integraci informačních technologií do dlouho zaběhlých praktik ostatních oborů. Tím vznikla iniciativa obohacovat využívaná „ne-chytrá“ zařízení o sběrné systémy a schopnost komunikace. Díky tomu je lze spojovat do sítí, ve kterých probíhá sběr a výměna dat za účelem jejich dalšího využití v jiné části systému, jak diktuje myšlenka IoT.

Takový posun se kromě vývoje nových chytrých zařízení také promítá do uvažování, nad již existujícími strukturami a tím, jak v nich zužitkovat nově získané informace. Do budoucna se dá očekávat rozvoj, který se již začal projevovat v běžném pracovním provozu a v omezené míře i v domácnostech běžných uživatelů ve formě tzv. chytré domácnosti.

4.1.2. Chytré budovy

Co je to vlastně chytrá, nebo inteligentní budova? Autor článku definuje inteligenci budovy jako: *„Schopnost samostatně se rozhodovat na základě zjištěných informací, řešit nově vzniklé nebo obtížné situace a přizpůsobovat se uživateli.“* [2] Tím je naznačeno využití určité míry umělé inteligence pro řízení systémů budovy. Aby taková UI měla dostatek dat, ze kterých se učit, tak potřebuje sběrnou síť, která jí je dodá. To přímo navazuje na podstatu IoT.

Na základě této úvahy by se chytré budovy daly charakterizovat jako objekty, které obsahují pokročilou elektroinstalaci a automatizované integrované systémy, které zajišťují škálu funkcionalit a jejich autonomní přizpůsobování se okolnostem pomocí vzájemného propojení a komunikace.

Ve světle této definice lze usoudit, že mít schopnost lokalizovat zařízení a osoby, které se momentálně v objektu nacházejí, by bylo pro takový řídící systém velice praktické. Příkladem by mohl být scénář, kdy má centrální řízení budovy optimalizovat svou spotřebu tepla pro vytápění prostor. Zde by statistické zpracování výskytu osob v místnostech ve vztahu k času mělo velkou vypovídací hodnotu. Díky němu by se dalo dobře optimalizovat vytápěcí křivky pro jednotlivé místnosti tak, aby se vyhovělo obvyklým potřebám obyvatel budovy a zároveň se minimalizovala spotřeba energie na vytápění, nebo chlazení.

Dalším příkladem použití z aktuální praxe je aplikace eRouška, jakožto součást tzv. chytré karantény, která využívá právě Bluetooth ke zjištění přítomnosti ostatních zařízení (v tomto případě především mobilních telefonů) ve svém okolí. Ačkoliv nejde výslovně o lokalizační systém, tak princip, na kterém funguje, je dost podobný. Tím, že proximitu nezjišťuje satelit, ale zařízení samotné, tak tato aplikace může fungovat i v problematických místech, kterými jsou vnitřní prostory budov, nebo například podzemní prostory metra. Díky nasbíraným informacím o proximitě zařízení, zdravotním stavu jeho majitele a délce doby kontaktu lze informovat uživatele, zda byli ohroženi nákazou.

4.2. Shrnutí

Pokud se spojí informace a závěry z předešlých částí, tak se dá dojít k názoru, že je zapotřebí vyvinou funkční alternativu pro lokalizaci v rámci budov. K jejímu zajištění je nutné obstarat senzory, které budou sbírat informace o poloze. Ty se propojí s centrální jednotkou, která by je vyhodnocovala a dále využívala pro bezprostřední ovlivňování aktuálního fungování. Zároveň by posloužily jako základ pro tvorbu kontextů, které by zaručily optimálnější reakci na budoucí události. Zavedením takového systému by vznikla platforma pro vytvoření inteligentní budovy. Jedinou neznámou je tedy technologie, která by tento typ lokalizace umožnila.

4.3. Bluetooth – verze a jejich rozdíly

Technologie Bluetooth je již dlouho zaběhlým komunikačním standardem, který prošel mnoha generacemi a verzemi během svého vývoje. Největším bodem zlomu v jeho průběhu je představení low energy větve. Její zavedení do uživatelské elektroniky posunulo bezdrátové varianty běžně užívaných přístrojů a příslušenství do mnohem pokročilejšího stádia. Věnování zvýšené pozornosti této variantě Bluetooth je tedy na

místě. Specifikace verzí 1.0–2.0+EDR již v oficiálním archivu Bluetooth SIG nejsou dostupné a jsou velice zastaralé, proto zde nebudou dokumentovány.

4.3.1. Bluetooth 2.1 + EDR

Verze 2.1 + EDR pracuje na frekvencích vyskytujících se v rozmezí 2,4000 – 2,4835 GHz s komunikačními kanály od sebe vzdálenými 1 MHz. Na těchto kanálech se využívá metody frequency hoppingu, která v průběhu přenosu dat mezi dvěma zařízeními provádí rychlé přeskakování mezi jednotlivými kanály v používaném pásmu. Využívá se proto, aby se omezilo rušení. Kromě toho je užitečná v oblasti bezpečnosti, jelikož ztěžuje odposlouchávání jedné souvislé komunikace. [4]

Přenosová rychlost základní verze (BR – basic rate) je 1Mb/s, zatímco u rozšířené verze (EDR – enhanced data rate) se může pohybovat podle preferencí na 2Mb/s, nebo 3Mb/s. Nutno zdůraznit, že tyto rychlosti jsou označovány za teoretické. Dá se očekávat, že skutečná rychlost je díky omezujícím vlivům nižší. [4]

Kromě základní GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) modulace, kterou využívá BR jádro jsou využívány ještě 8DPSK (8 differential phase shift keying), kterou využívá 3Mb/s EDR a π/4DQPSK (pi/4 rotated differential quaternary phase shift keying), kterou využívá 2Mb/s EDR. [4]

Pro vznik spojení mezi více zařízeními najednou je zapotřebí, aby utvořily síť, která se v případě Bluetooth nazývá piconet. V rámci této sítě je nutné účastníky identifikovat. K tomu slouží šesti bajtová hexadecimální adresa zkráceně označovaná jako BD_ADDR, která se skládá ze tří částí. První část, označovaná jako NAP (non-significant address part) slouží pouze k určení algoritmu pro frequency hopping. Druhá část, UAP (upper address part), doplňuje NAP a tvoří s ním část adresy označovanou jako OUI (organizationally unique identifier). Jeho účelem je sloužit jako identifikátor výrobce zařízení, který je využíván některými vnitřními procedurami Bluetooth k unikátnímu nastavení charakteristik přenosu. OUI zabírá tři z šesti dostupných bytů. Zbylé tři patří části LAP (lower address part), kterou přiděluje výrobce zařízení tak, aby bylo v rámci jeho OUI domény unikátní. [4]

Při vytvoření piconetu se zařízení automaticky synchronizují tak, aby jejich vnitřní časovače a ostatní náležitosti pro komunikaci byly sladěné. Díky tomu mohou koordinovaně vysílat informace do sítě, aniž by docházelo ke vzájemným kolizím.

Proces sjednocení začíná rozlišením zařízení na dvě skupiny. První skupinou je jediné master zařízení, které poskytuje referenční data všech potřebných hodnot, a druhou skupinou jsou slave zařízení, která si podle těchto referenčních hodnot upraví svá nastavení. Po určení algoritmu pro přeskakování frekvencí se může používaný kanál rozdělit na tzv. sloty, což jsou časová okna konstantní délky, během kterých mohou jednotlivé body sítě vysílat. Bluetooth se skrze toto dělení dokáže přiblížit typu přenosu běžně označovanému jako full duplex pomocí tzv. Time-Division Duplex. Jeho princip je založený na dedikování některých slotů pro příjem a jiných pro vysílání, což dodá efekt full duplexového přenosu. Problém může nastat při maximálním objemu komunikace v obou směrech najednou, jelikož dojde ke snížení potenciální maximální rychlosti v jednom směru zhruba na polovinu. [4]

Strukturu kanálů a linků popisuje dokumentace následovně*: „Nad fyzickým kanálem existuje několik vrstev linků, kanálů a přidružených ovládacích protokolů. Hierarchie kanálů a linků od fyzické vrstvy nahoru je: fyzický kanál, fyzický link, logický transport, logický link a L2CAP kanál.“* [4] Princip fungování této struktury dále vysvětluje tak, že v rámci fyzického kanálu (kanál frekvenčního pásma) se tvoří fyzické linky (spojení v rámci fyzického kanálu), které vznikají mezi dvěma body sítě a to vždy mezi master a slave zařízením. Z tohoto tvrzení je možné vyvodit, že topologie piconetu je minimálně na fyzické úrovni hvězdicová. Na jednom fyzickém linku se pomocí multiplexování do časových slotů fyzického kanálu může vytvořit několik logických linků. Ty smí v rámci piconetu vznikat i mezi dvěma slave zařízeními. L2CAP kanál představuje vrstvu abstrakce, která poskytuje možnost aplikacím využívat kanály a linky bez nutnosti zabývání se právě popsanou problematikou o kterou se starají nižší vrstvy autonomně. [4]

Přenosové technologie se obvykle skládají z několika vrstev protokolů a Bluetooth není výjimkou. Hierarchie začíná protokolem ovládajícím hardware, který se nazývá jednoduše Radio. Jeho úkolem je obstarat problematiku okolo operační frekvence, modulace a vysílání signálu, frequency hoppingu atd. Na něj plynule navazuje protokol nazývaný Baseband, který se zabývá adresací, formátováním paketů, časováním multiplexace a podobně. Pro správu linků existuje protokol LMP (Link manager protocol), který linky nejen tvoří, ale také zajišťuje jejich udržení v provozu a napojení na vyšší vrstvy. Tyto tři nízko úrovňové protokoly společně tvoří část nazývanou Controller. Ovládání v této vrstvě je stále velice podrobné, jelikož podléhá časování a ostatním náležitostem,

které jdou automatizovat. Z toho důvodu vzniklo rozhraní označované jako HCI, což je zkratka pro Host Controller Interface. [4]

Host zde reprezentuje skupinu vyšších protokolů, které se již nemusí zabývat záležitostmi nízko-úrovňových problematik. Díky tomu se propojují s aplikacemi snadněji než protokoly Controlleru. Třemi hlavními, které sem spadají, jsou L2CAP, RFCOMM a SDP. L2CAP, jinak také Logical Link Control and Adaptation Protocol má za úkol spravovat logické linky a sloužit jako prostředník mezi ostatními Host protokoly a Controller vrstvou. Kromě toho slouží ke skládání dat z jednotlivých paketů a obráceně. RFCOMM je transportní protokol, který tvoří další vrstvu abstrakce nad L2CAP. SDP (Service discovery protocol) slouží k vzájemnému rozeznání vysoko úrovňových služeb, které propojená zařízení podporují. [4]

4.3.2. Bluetooth 3.0 + HS

Verze 3.0 + HS s sebou přinesla dvě zásadní změny. První z nich je zavedení AMP (Alternate MAC/PHY) ovladače a druhou je tzv. HS (high speed) mód, které spolu úzce souvisí. AMP je přídavný ovladač, který umožňuje v případě potřeby nahradit standardní BR/EDR spojení novými HS spojeními. Ty ke komunikaci využívají komunikační standard IEEE 802.11 (Wi-Fi), který by v dané konfiguraci měl být teoreticky schopný poskytnout rychlost až 24 Mb/s. Tato funkce se dá ovšem využít pouze v případě, že obě zařízení mají AMP modul, aby mezi sebou mohla komunikovat na takové úrovni. Nutno dodat, že ačkoliv HS spojení ke komunikaci používají standard 802.11, tak inicializace spojení stále probíhá na úrovni BR/EDR a teprve po úspěšném navázání linku dochází k předání kontroly AMP, která přepne na alternativní styl přenosu. [5]

4.3.3. Bluetooth 4.0

Verze 4.0 nově nabízí několik nových funkcionalit z nichž jednoznačně nejzajímavější je představení LE (low energy) standardu, který byl původně vyvíjen firmou Nokia pod označením Wirebee. Díky němu se platforma Bluetooth rozdělila na dvě části. [3] [6]

- Bluetooth classic, které i ve verzi 4.0 pracuje obdobně jako jeho předchůdce 3.0 + HS. Obsahuje tedy: BR, EDR a HS (802.11) jádra. [6]
- Bluetooth low energy (Bluetooth smart, BLE)

Zásadní rozdíl v koncepci mezi klasickou verzí a BLE je patrný již z názvu. Tento rozdíl také popisuje autor v samém úvodu jeho knihy: *„Již od začátku bylo cílem navrhnout rádiový standard s co nejmenší spotřebou energie speciálně optimalizovaný pro levný hardware s malou šířkou pásma, malými nároky na napájení a nízkou komplexitou.“* [3]

Z toho vyplývá, že BLE se nepokoušelo překonat klasické Bluetooth a jeho rivaly v jimi dominovaných sektorech. Přesnější je označovat ho za sesterskou technologii, která se vydala jiným směrem, kterým je nízká spotřeba a komplexita. Ve snaze toho dosáhnout muselo obětovat některé své parametry mezi které patří propustnost dat a dosah signálu. [3]

Omezení rychlosti je popisováno následovně: *„Modulační rychlost Bluetooth Low Energy rádia je podle specifikace nastavená na 1Mbps. Tato rychlost tvoří teoretický horní limit propustnosti, kterou je BLE schopné poskytnout. Ve skutečnosti je tento limit typicky značně snížený množstvím faktorů, mezi které patří například: oboustranný provoz komunikace, protokolová hlavička paketu, CPU a radiová omezení a umělá softwarová omezení.“* [3]

Po uvedení příkladu autor tvrdí, že realisticky se rychlost jednosměrného přenosu pohybuje zhruba mezi pěti a deseti KB/s. I po takovém snížení ovšem může dojít k relativně rychlému vyčerpání malé baterie, na které je většina čistě LE zařízení závislá. Z toho důvodu bylo za potřebí zavést tzv.: idle mód, do kterého zařízení přejde, pokud není aktivně využíváno. Proto také komunikace obvykle probíhá v krátkých kondenzovaných dávkách s prokládáním přechodu do úsporného režimu. Velikost prostoje je volitelná v intervalu: ⟨7,5 ms; 4 s⟩. [3]

Co se omezení dosahu signálu týče, tak ačkoliv je BLE teoreticky schopné dosahovat obdobných vzdáleností jako klasické Bluetooth, tak se pro udržení nízké spotřeby obvykle omezuje pouze na nutnou vzdálenost. Podle autora se pracuje nejběžněji s dosahem od dvou do pěti metrů. Což je v porovnání s klasickou verzí, která operuje typicky až na desítky (výjimečně i stovky) metrů relativně malá vzdálenost. [3]

Implementace Bluetooth do zařízení může mít tři základní podoby [3]:

- Pouze klasické jádro, které pracuje s přenosy BR, EDR a HS
- Pouze low energy jádro
- Kombinace obou, která umožňuje komunikovat na obou standardech (občas označované také jako Bluetooth smart ready).

Takové rozdělení existuje, protože LE a calssic jádra nejsou přímo kompatibilní. Samozřejmě existují i varianty, kde se od sebe dělí části klasického jádra (BR/EDR od HS), nicméně to je u novějších verzí méně běžné, pokud jde o spotřebitelskou elektroniku. [3]

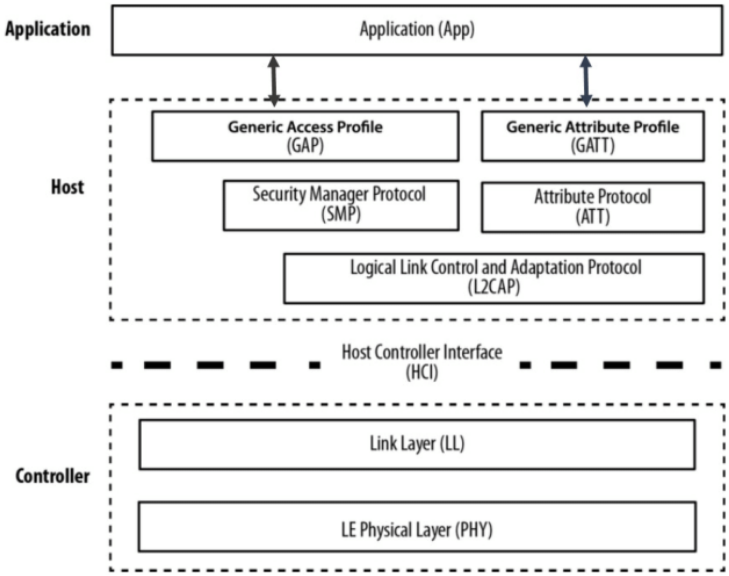
Bluetooth low energy funguje, stejně jako classic, v pásmu 2,4 GHz s využitím frequency hoppingu. Využívá 40 kanálů, které jsou od sebe vzdálené 2 MHz. Z nich je 37 datových a 3 advertisingové. Tyto tři speciální kanály se nacházejí na frekvencích 2402, 2426 a 2480 MHz. [3] [6]

Co se síťových topologií týče, tak zde verze 4.0 přidává nové možnosti, které jsou dostupné pro BLE zařízení. Novým přírůstkem je topologie mesh[1], která byla speciálně implementována za účelem poskytnutí nástroje vývojářům na tvorbu topologicky neomezené sítě low energy zařízení pro snadnější navrhování senzorových struktur v objektech. Spojení této topologie s nově zavedeným broadcastovým typem přenosu tvoří poměrně unikátní sestavu, která se přímo nabízí ke zkoumanému záměru. Fungování tradičního piconetu se oproti tomu v zásadě téměř vůbec nezměnilo. Stejně tak adresace zařízení zůstala nezměněna. [19]

Hierarchie všech protokolů fungujících v BLE výstižně popisuje následující Obrázek 1. Stručné popisy fungování jednotlivých protokolů budou uvedeny dále.

[1] Tato vlastnost byla oficiálně přidána až ve verzi 5.1, nicméně je zpětně kompatibilní až k verzi 4.0 [19]

Obrázek 1 - Hierarchie protokolů u BLE [3]



LE má svou protokolovou hierarchii dělenou na Host a Controller stejně jako Classic. Základní vrstvou je vždy fyzická vrstva přenosu (zde označovaná jako PHY, nebo LE PHY), která je v přiloženém Obrázek 1 znázorněna dole. Reprezentuje v zásadě to samé jako Radio vrstva v klasické verzi. [3] [6]

Nad PHY má přímý dohled vrstva, která zajišťuje ovládání komunikačního hardwaru a tvorbu linků. Tato vrstva je u BLE označována jako LL (link layer) a je paralelou dříve zmíněným LMP a Basebandu u Bluetooth Classic, a proto je od zbytku protokolů také oddělená ovládacím rozhraním HCI. [3] [6]

První vrstvou v horní části je L2CAP, který u BLE funguje obdobně jako u Bluetooth Classic a byl tedy popsán v kapitole 4.3.1. Zde podobnosti končí. Zbytek struktury protokolové architektury host nad L2CAP se skládá především z protokolů: ATT, SMP, GAP a GATT. [3] [6]

ATT (Attribute protocol) je protokol, který určuje, zda se zařízení chová buď jako server, klient, nebo oboje. Základní princip těchto rolí odpovídá jejich obecnému významu. Nutno dodat, že role definovaná tímto protokolem není závislá na rolích v rámci piconetu. Toho se využívá zejména pro šetření energie jednoho ze zařízení. Obvykle se konfigurují tak, že slave zařízení je serverem a master, jakožto centrální zařízení, si z něj data vyžádá v roli klienta. Díky tomu může být periferní slave zařízení z větší části neaktivní do příchodu požadavku, čímž šetří svou baterii. [3] [6]

SMP (Security manager protocol), jak jeho jméno naznačuje, zajišťuje bezpečnost přenosu. Jednou z jeho klíčových funkcionalit je generování a ověřování šifrovacích klíčů, které slouží ke tvorbě zašifrovaných komunikačních kanálů. Obdobně jako většina BLE protokolů, tak i SMP definuje své role pro zařízení tentokrát pojmenované initiator a responder. Tyto role jsou přímo svázané s rolemi, které definuje nadřazený protokol GAP (více o nich níže). Initiator koresponduje s rolí central a responder s peripheral. Využití SMP rolí spočívá v definování výhradního práva initiatora nad responderem v provádění bezpečnostních procedur. Mezi tyto procedury se řadí párování, bonding (trvalé párování a uložení důvěryhodného zařízení do paměti) atd. [3] [6]

Jedním z nejdůležitějších protokolů pro realizaci komunikace je tzv. GAP (Generic access profile), který reguluje, jakým způsobem mezi sebou BLE zařízení komunikují. Komunikace může probíhat buďto vytvořením spojení, nebo broadcastem (adveritsingem). V rámci GAP se definuje, jakými způsoby se zařízení mohou chovat při obou typech komunikace. [3] [6]

Při komunikaci advertisingem zařízení plní GAPem definovanou roli broadcastera, nebo observera. Broadcaster vysílá pakety po příslušných kanálech, zatímco observer tyto kanály aktivně sleduje, aby mohl zachytit veškerou advertising komunikaci. Její podstata spočívá v tom, že jí mohou číst všechny aktivní observery v dosahu broadcastera bez nutnosti tvorby explicitního spojení. Naslouchající zařízení se dále samy rozhodují, jestli budou tzv. advertisingové pakety dále zpracovávat, nebo je budou ignorovat. Na tomto principu komunikace jsou založené i tzv. Bluetooth beacony, které budou popsány později. [3] [6]

Stejným způsobem řídí GAP i tvorbu spojení, kde zařízení označované jako central poslouchá advertising kanál za účelem navázání spojení. Až zachytí příslušný paket vysílaný zařízením označovaným jako peripheral, tak na něj odpoví a naváže spojení na jiném datovém kanále. Role přidělované pomocí GAP mají přímou návaznost na role přiřazované v rámci LL. Central zařízení odpovídá roli master a peripheral jsou všechna ostatní zařízení v piconetu, která jsou označována jako slave. GAP také definuje módy, ve kterých se zařízení mohou nacházet vůči ostatním zařízením v rámci navazování komunikace. K těmto módům, až na výjimky, poskytuje také procedury, které umožňují ostatním zařízením na tento mód zareagovat a využít ho k navázání spojení. Příkladem může být zařízení v módu *limited discoverable*, kdy se dočasně

zviditelní všem v okolí, a k němu korespondující procedura Limited and general Discovery, díky níž lze takové zařízení objevit a inicializovat s ním spojení. [3] [6]

GATT (Generic attribute profile) je protokol nadřazený ATT. Jeho úkolem je správa toku dat na vyšší vrstvě abstrakce. Definuje formáty dat a procedury pro manipulaci s nimi. Kromě toho přejímá od ATT správu nad základními rolemi v při poskytování dat (client a server). Na tomto základě GATT navíc poskytuje vývojářům více abstraktní profily pro komunikaci zároveň s možností tvorby jejich vlastních, které ovšem musí splňovat určitá pravidla. Příkladem takového abstraktnějšího profilu pro komunikaci je podle [3] tzv. proximity profile, jehož funkcí je detekování přítomnosti druhého zařízení a provedení akce při změně tohoto stavu. O těchto vysokoúrovňových předdefinovaných profilech se dá uvažovat jako o výrobcem vytvořených továrních nastaveních, kterými se snaží ušetřit práci vývojářům. [3] [6]

4.3.4. Bluetooth 4.1 a 4.2

Obě tyto aktualizace sloužily především k vyladění nově přidané LE varianty, zvyšování bezpečnosti komunikace a obecnému vylepšování systému, což se projevilo v řadě drobných úprav, které nejsou pro téma této práce příliš podstatné. V plném rozsahu jsou vypsané v dokumentacích, na které odkazují zdroje [7] a [8].

4.3.5. Bluetooth 5.0

Verze 5.0 díky svým změnám přidala hodně potenciálu pro využití BLE v IoT. První hlavní úpravou je implementace SAM (slot availability mask), která zajišťuje optimalizaci volby časových slotů tak, aby docházelo k méně kolizím především s ostatními radiovými komunikačními standardy. Její princip spočívá ve vzájemné indikaci mezi Bluetooth jádrem a ostatními ovladači v rámci zařízení, zda se zrovna nesnaží vysílat, což by mohlo způsobovat vzájemné rušení. Bluetooth si následně volí volné sloty tak, aby zajistilo nejlepší výsledek. Taková koordinace může probíhat i s jiným zařízením a jeho ovladači radiových technologií, a to včetně Bluetooth samotného. V takovém případě se SAM snaží zjistit, zda připojené peer zařízení nemá komunikační požadavky například z jiného piconetu, nebo v rámci scatternetu. [9]

Další změny se týkají především rychlosti přenosu a dosahu signálu. Bluetooth SIG v dokumentaci tvrdí, že LE PHY nově dokáže vyvinout až 2 Mb/s rychlosti, za předpokladu, že nevyužívá tzv. LE coded PHY. Tento přenosový mód je označovaný jako LE 2M PHY. [9]

Kódované PHY je tedy dostupné pouze pro přenosovou rychlost 1 Msym/s (megasymbol za sekundu), která je označovaná jako LE 1M PHY. Zahrnuje více možností nastavení, mezi které patří následující tři základní konfigurace. [9]

- S = 1, což znamená, že 1 Msym reprezentuje 1 Mb, tudíž nedochází k žádnému ECC (error correction coding), ale je vyvinuta maximální rychlost základní konfigurace, tedy 1 Mb/s.
- S = 2, kde 2 Msym popisují 1Mb. To poskytuje základní míru ECC, nicméně za cenu poloviční rychlosti.
- S = 8, kde 8 Msym popisuje 1Mb dat a z kontextu je již zřejmé, že bude podporovat rychlost 125 kb/s.

Taková rychlost sice v současné době není mnoho, ale za tu cenu je poskytnut v celku robustní přenosový prostředek, který je schopný opravovat chyby v komunikaci i v nepříznivém prostředí, kde se vyskytuje velká míra rušení. Pomocí kódování se dá také dosáhnout větší přenosové vzdálenosti bez nutnosti navyšovat vyzářený výkon vysílače, jelikož se dají data znovu rekonstruovat i při větším poměru šumu k signálu. Tato funkcionalita se jinak označuje jako LE long range. To z BLE dělá dobrou volbu i pro náročnější nasazení v průmyslu a vytížených oblastech. Pokud se vezme v úvahu výše uvedená SAM, pak vzniká v celku robustní přenosové médium. [9]

Nově přidaným a jedním z nejzajímavějších druhů broadcastové komunikace je high duty cycle non-connectable advertising. Ten zajišťuje, že konfigurační atributy Advertising_Interval_Max a Advertising_Interval_Min budou ignorovány, což zvyšuje využitelnost BLE k precizní lokalizaci, jelikož umožňuje značně vyšší míru vzorkování. [9]

4.3.6. Bluetooth 5.1

Verze 5.1 s sebou přinesla několik změn. Mezi nejpodstatnější vylepšení patří přidání funkce odhadu úhlu přijímání (AoA – angle of arrival) a vysílání (AoD – angle of departure). Dokumentace tyto nové vlastnosti popisuje ve stručnosti následovně: „*LE zařízení má možnost zpřístupnit svůj směr vůči okolním zařízením pomocí vysílaní směr-vyhledávajících paketů. Použitím takto získaných informací z několika vysílačů je LE rádio schopné určit svou vlastní polohu.*“ [10]

Z tohoto volně přeloženého citátu je zřejmé, že AoA a AoD byly cíleně designované na lokalizaci, což z této verze dělá jednu z nejzajímavějších, protože jde o první takto cílený upgrade.

Získání úhlu (směru) se dá provést dvěma způsoby z nichž první je angle of arrival. Tato metoda spočívá v tom, že přijímající zařízení, které se skládá z více než jedné antény a radio frequency switche, změní anténu, na které přijímá signál v průběhu přenosu. Následně vzniklý fázový rozdíl v signálu se dá využít k aproximaci úhlu, ze kterého signál přichází. Tento fázový rozdíl (ψ) se dá vyjádřit vztahem [10]:

$$\psi = \frac{2\pi \times d \times \cos(\theta)}{\lambda}$$

Rovnice 1 – Výpočet fázového rozdílu v signálu při přepnutí antény v průběhu přenosu

Kde:
Ψ – fázový rozdíl [°]
θ – úhel dopadu (AoA) [°]
λ – vlnová délka [m]
d – vzdálenost mezi anténami [m]

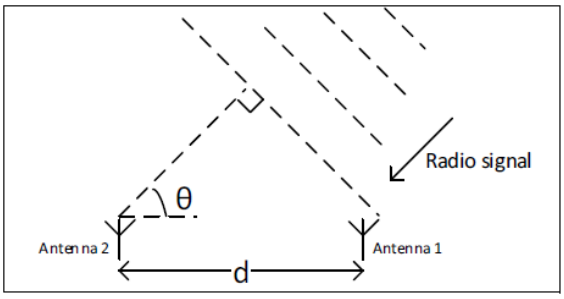
Z této rovnice se dá po úpravě získat následující vzorec pro dopadový úhel [10]:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\psi \times \lambda}{2 \times \pi \times d}\right)$$

Rovnice 2 – Výpočet úhlu dopadu signálu na anténní soustavu

Tento vztah schematicky znázorňuje Obrázek 2:

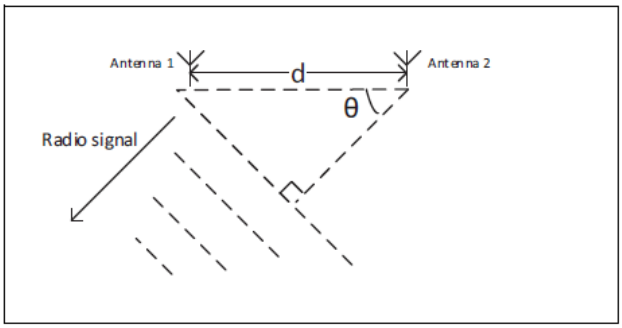
Obrázek 2 - princip měření dopadového úhlu (AoA) [10]



Angle of departure (úhel vyslání) je založen na stejném jevu a vzorcích, nicméně rozdíl je v logice získávání hledaného úhlu. V tomto případě si zařízení, na kterém probíhá výpočet, vystačí pouze s jednou anténou. Tou přijímá signál, který je v průběhu jeho

vysílání stejným způsobem fázově pozměněný pomocí přepnutí vysílací antény. Cílové zařízení sbírá tzv. IQ samples, které mu slouží k dopočtu úhlu, ve kterém k němu vysílač signál poslal. [10] Princip této metody vizualizuje následující Obrázek 3:

Obrázek 3 - princip měření vysílacího úhlu (AoD) [10]



Podle této logiky se dá předpokládat, že pokud by se k lokalizaci používala aproximace úhlu, tak by bylo optimálnější využít AoD. To proto, že se nedá bezpečně spoléhat na existenci pouze takových koncových zařízení, které budou obsahovat potřebnou anténní soustavu pro odhad úhlu pomocí AoA. To ovšem zvýší nákladnost systémových vysílačů, které budou muset tuto aparaturu mít.

4.3.7. Bluetooth 5.2

Ve verzi 5.2 došlo především k následujícím třem změnám: představení technologie isochroních kanálů pro LE, zavedení nové verze ATT protokolu nazvané EATT (enhanced ATT) a v neposlední řadě k přidání technologie LE power control. [11]

Isochroní kanály pro LE přidávají schopnost vysílání stejného kontinuálního signálu několika zařízením najednou ve stejném čase. Tato technologie je podle autora článku prvním krokem k nové technologii LE audio a tím také k synchronnímu přehrávání hudby. [12] Tato funkcionalita ovšem není příliš užitečná co se lokalizace týče, protože u lokalizace nemusí jít o kontinuální přenos dat natož o tvorbu spojení.

EATT protokol je úprava jeho předchůdce primárně představující novou schopnost přijímat požadavky na komunikaci od více než jedné aplikace najednou. Jde tedy o jakýsi přechod od sériového typu komunikace k paralelnímu na aplikační úrovni. Využití této vlastnosti nespočívá přímo v lokalizaci, ale v optimalizaci jejího soužití s ostatními aplikacemi. Vzhledem k tomu, že lokalizace vyžaduje pravidelné dlouhodobé využívání Bluetooth, tak s klasickým ATT by mohlo dojít k blokování ostatních aplikací. [20]

LE power control je schopnost zařízení si autonomně upravovat vyzářený výkon pro lepší kvalitu spojení podle zjištěného RSSI. Řeší se tím dva nežádoucí stavy. Prvním z nich je případ, kdy je vyzářený výkon příliš nízký a dochází k vysoké ztrátovosti. Druhým z nich je případ právě opačný, kdy je zbytečně vysoký a tím způsobuje přesaturování přijímací antény a plýtvání energie na straně vysílače, což jde proti principům LE. [11] [13]

4.4. Vyhodnocení vhodnosti verzí

4.4.1. Stanovení požadavků

Nyní, po uvedení základních vlastností Bluetooth a hlavních rozdílů mezi jeho verzemi, je na místě rámcově vyhodnotit, která z verzí bude nejvhodnější pro zvolený účel a proč. První je zapotřebí definovat, jaké vlastnosti jsou žádoucí, a které naopak zbytné. Jednotlivé body jsou rozdělené do odstavců v této kapitole. Pořadí nereprezentuje vzájemnou prioritu bodů.

V první řadě je zapotřebí se soustředit na to, jaké predispozice vůbec zkoumaná verze má pro to být použitá jako lokalizační médium a jak se dají nakombinovat pro dosažení maximální efektivity. To bude záležet na speciálních funkcích, které jsou v dané verzi dostupné. Příkladem může být angle of departure.

Nízká spotřeba energie je podstatná, jelikož má vliv na možnosti instalace systémových zařízení a na jejich náklady na provoz. Díky nízké spotřebě individuálního zařízení se dá jeho fungování zajistit bez nutnosti zavádění přídavné napájecí kabeláže, jelikož bude možné pokrýt jeho spotřebu z baterie. Kromě toho se díky nízké spotřebě šetří přímé jednotkové náklady na provoz.

Malé pořizovací náklady na systémový hardware zaručí, že se za stejnou cenu dá pořídit více individuálních senzorů, čímž se zajistí větší hustota vysílačů (nebo plocha pokrytí). Této vlastnosti se dá přizpůsobit hlavně dosah zařízení, protože počet referenčních bodů je pro precizní lokalizaci více podstatný než jejich individuální dosah, ale vždy je vhodné najít dobrý kompromis. Nutno dodat, že toto tvrzení je pravdivé pouze pro určité typy lokalizace, které vyhodnocují pozici alespoň z části podle proximity, což se právě u BLE dá očekávat. Pokud by se k lokalizaci měl využívat jako primární faktor například odhad vzdálenosti na základě relativní síly signálu, pak toto tvrzení není úplně pravdivé.

Kompatibilita s co nejpočetnější skupinou běžně užívaných zařízení umožní snadnější zavedení systému do praxe s maximální efektivitou. Interně v rámci technologie Bluetooth jde také o to, aby zvolená verze byla kompatibilní s co nejvíce ostatními verzemi a jádry, a to jak zpětně, tak alternativně i dopředně. Díky této vlastnosti se bude dát navrhovaná služba poskytovat co největšímu spektru uživatelů, což je klíčové.

Stabilita a kvalita přenosu je vždy vítaným aspektem, a proto je také vhodné, aby zvolená verze měla co největší předpoklady pro vypořádání se s rušením a ostatními zdroji nestability.

Pro dosažení výše uvedených vlastností se naopak dá oželet zejména rychlost přenosu, jeho dosah a spojitost. Rychlost přenosu je postradatelná, jelikož objem dat, které jsou potřeba přenést v jeden okamžik, je zanedbatelně malý oproti maximální dostupné rychlosti, kterou je Bluetooth schopné poskytnout. Dosah, jak již bylo zmíněno výše, je v některých případech méně podstatný než počet referenčních bodů, proto se dá také značně zredukovat ve prospěch jiných vlastností. Spojitost přenosu není vyloženě nutná pro fungování systému. Plně dostačujícím stavem je vysílání v dávkách, čímž se dá zredukovat prostoje, které zbytečně plýtvají baterii.

4.4.2. Vyhodnocení vyhovění požadavkům

Následující odstavce odpovídají členěním předcházející kapitole, kterou v jejích bodech evaluují. Toto vyhodnocení vychází z poznatků získaných při studování dříve využitých zdrojů.

První část vývoje, kterou popisují kapitoly 4.3.1 a 4.3.2, o verzích předcházejících 4. generaci, je na speciální vlastnosti využitelné k lokalizaci velice chudá. Ačkoliv by se pomocí těchto verzí dalo docílit lokalizačního systému použitím RSSI a následné trilaterace polohy, tak by to bylo poměrně náročné na realizaci a s pochybným výsledkem, zvláště při zavádění do provozu v místě s velkým počtem sledovaných zařízení na relativně malé ploše. Po představení 4. generace a tím tedy také LE standardu dochází ke značnému rozšíření možností. Především jde o zavedení advertisingového non-connectable způsobu komunikace, který byl dále v 5.0 rozšířen o high duty cycle non-connectable advertising. Ihned poté, v 5.1, byly přidány funkce AoD a AoA, které zajišťují způsob měření relativního úhlu mezi zařízeními. Tím značně přispívají ke zpřesnění lokalizace, a to i v případě, že jsou dostupné méně než tři systémové vysílače. V té samé verzi byla také uvedena nová síťová topologie mesh, která získala zpětnou

kompatibilitu až k verzi 4.0. Pomocí ní se dají tvořit sítě systémových vysílačů bez nutnosti jejich shlukování okolo centrálních master zařízení, čímž se dále zjednodušuje zavádění systému do praxe. Vzniká tím také určitá modularita výsledného řešení, jelikož se dá v rámci možností rozšířit bez větších zásahů do již existující struktury.

Nízkou spotřebu energie primárně zaručují verze, kde se vyskytuje standard LE, jelikož jsou na takové požadavky designované. Verze 5.2 přidala mimo jiné také funkci LE power control, která umožňuje regulovat vyzářený výkon podle zpětné vazby založené na měření RSSI. Díky ní by se dala optimalizovat spotřeba energie na udržování spojení mezi systémovými vysílači za předpokladu bezdrátové instalace.

Nízké pořizovací náklady na jednotku ve většině případů taktéž nejlépe splňují LE varianty díky svým kompaktním vysílačům označovaným jako beacony (více o nich v pozdějších kapitolách). Konkrétní cenová hladina bude ovšem záležet na výsledné podobě realizovaného řešení. Kromě pořizovací ceny mají BLE beacony, které operují na baterii, výhodu, protože nepožadují přídavné rozvádění kabeláže elektrické sítě. Taková montáž se může značně prodražit, a i takové náklady je nutné započítávat do kalkulací nákladů.

Kompatibilita je téma s klady i zápory pro Bluetooth. Dá se na něj dívat ze dvou úhlů pohledu. Prvním z nich je vzájemná schopnost komunikace mezi jednotlivými verzemi. Bluetooth má velice dobrou zpětnou kompatibilitu pro verze v daném jádře. Kamenem úrazu je bohužel ten fakt, že Classic a LE jsou bez nutného přemostění vzájemně nekompatibilní. Z toho důvodu, jak bylo popsáno u verze 4.0, existují kombinovaná jádra. Zde bude nutné udělat kompromis. Z předchozích bodů prozatím vyplívá, že optimální verzí je LE varianta verze 5.2. To by znamenalo, že použité beacony nebudou schopné komunikovat se zařízeními, které jsou buď: starší než verze 4.0, nebo jsou 4.0 a novější, ale neobsahují LE jádro. Pro vyřešení tohoto konfliktu bude nutné rozhodnout, jestli je přípustnější omezení cílové skupiny uživatelů pouze na ty, kteří mají zařízení s LE jádrem, nebo zvýšení investice a instalace beaconů, které obsahují jádro kombinované, což bude navíc pravděpodobně zahrnovat instalaci nějaké formy napájecí sítě. Druhým úhlem pohledu je vnější kompatibilita. Tím je myšlen výskyt technologie Bluetooth jako celku v přenosné uživatelské elektronice, především mobilních telefonech, tabletech a laptopech. Pokud se přeneseme přes vnitřní problematiky s kompatibilitou, tak Bluetooth má jednu z nejlepších základen kompatibilních zařízení, které jeho jádro obsahují. Z toho vyplývá, že hlavním problémem bude kompatibilita vnitřní.

Stabilita přenosu v prostředí hustě saturovaném rušením je velké téma, kterému se bude především věnovat druhá polovina teoretické a praktická část práce. Nicméně schopnost odolávat rušení se nemusí zjišťovat pouze praktickými zkouškami. V průběhu vývoje Bluetooth se objevilo několik vlastností, které zlepšily potenciál pro stabilitu přenosu. Již od verze 2.1 Bluetooth pracuje s principem frequency hoppingu, který se kromě jiného zaměřuje na redukování rušení v rámci kanálů. Další a prozatím poslední verzí, která významně přispěla ke stabilitě přenosu je verze 5.0, kde přibyly funkcionality ECC a SAM, které jsou popsané výše.

Z předcházejících bodů lze usoudit, že optimální verzí pro implementaci bude Bluetooth LE 5.2 s možným přihlédnutím ke classic jádru pro zvýšení kompatibility.

4.5. Rozbor fungování radiového přenosu

V této kapitole bude podrobněji prozkoumán fyzikální princip fungování fyzické části přenosu a potenciální rizikové faktory pro jeho kvalitu a stabilitu.

4.5.1. Frekvence

Bluetooth low energy operuje na frekvencích v rozsahu mezi 2,400 až 2,4835 GHz, jak již bylo zmíněno výše v kapitole o verzi 4.0. Jednotlivé kanály fyzické vrstvy jsou od sebe frekvenčně oddělené podle následujícího vzorce [11]:

$$f = 2402 + k \times 2$$

Rovnice 3 – Vztah pro vyjádření středních frekvencí kanálů BLE

Kde:
f – středová frekvence kanálu [MHz]
k – koeficient odsazení středové frekvence a číslo kanálu; k ∈ ⟨0;39⟩ [MHz]

Z něj je zřejmé, že střední frekvence kanálů u BLE jsou od sebe dvojnásobně dál, než u BR/EDR což zapříčiňuje poloviční počet kanálu (BR/EDR jich má k dispozici 78). [11]

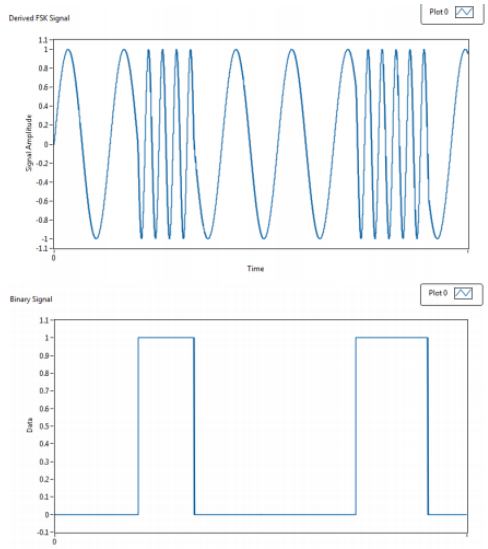
Tolerovaná kombinovaná chyba střední frekvence v průběhu vysílání paketu je |150| kHz, což zahrnuje maximum |50| kHz skutečného posunu v kombinaci s posunem počátečním. Maximální povolená rychlost změny této chyby je 400 Hz/μs. [11]

4.5.2. Modulace

Bluetooth smart využívá k převádění dat na signál tzv. GSFK (gaussian frequency shift keying) modulaci. Modulovat se dá buď pomocí změny v amplitudě, nebo ve frekvenci. Jak naznačuje jméno, tak u GFSK se bude měnit právě frekvence. Modulování pak probíhá navýšením frekvence pro hodnotu 1 a naopak snížením pro hodnotu 0. [11]

Princip FSK modulace, ze které GFSK vychází, dobře znázorňuje Obrázek 4:

Obrázek 4 - Princip FSK modulace [21]



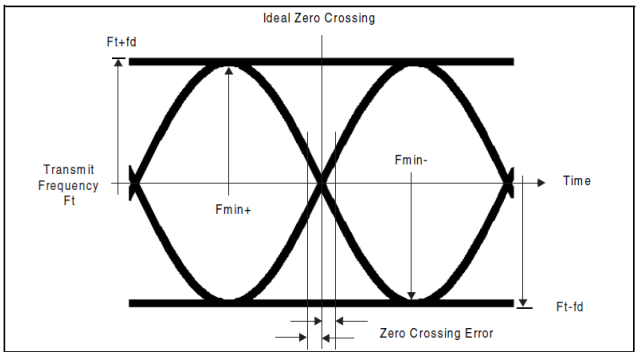
Rozdíl mezi FSK a GFSK je, že u FSK ke změnám ve frekvenci dochází téměř okamžitě (v rámci možností fyziky). To způsobuje charakteristika průběhu modulačního signálu ve spodní části obrázku, jelikož jeho impulzy jsou obdélníkové. To instruuje modulační aparát k tomu, aby měnil frekvenci nosného signálu co nejrychleji to dokáže. Takový druh modulace vyžaduje širší kanál, jelikož způsobuje vznik většího množství bočních emisí, které jsou nežádoucí. Proto se používá GFSK modulace, která implementuje Gaussův filtr na modulační (na obrázku „binární“) signál. Ten z původního obdélníkového signálu udělá signál ve tvaru Gaussových křivek, čímž vznikají mnohem plynulejší přechody mezi nulou a jedničkou. Díky této optimalizaci dochází ke zúžení využitého frekvenčního pásma a snížení bočních emisí, které by jinak mohly způsobovat nežádoucí vlivy. [21]

V dokumentaci Bluetooth jsou uvedeny nároky na charakteristiky vysílače a přesnost modulace:

Pro vysílač je kontrolován především jeho vyzářený výkon, který by měl při maximálním vstupním výkonu spadat do intervalu <0,01;100> mW, což odpovídá <-20;20> dBm. Jedno Bluetooth zařízení ovšem nemá možnost operovat na celém dovoleném rozsahu, jelikož existují čtyři výkonové podkategorie, do kterých může spadat, které uvedený interval dále dělí (detail viz zdroj 11, Table 3.2: LE PHY power classes). Dříve zmíněný LE power control mění vyzářený výkon vysílače na základě zpětné vazby přijímače, která je součástí paketů a reaguje na stav RSSI, který má stanovený své optimální hodnoty. Pokud bude docházet ke změně ve vyzářeném výkonu, pak maximální krok by měl být 8 dB. [11]

Pro modulaci se definuje několik parametrů, které pomáhá vizualizovat Obrázek 5. Mezi tyto nároky patří absolutní minimální nutný rozdíl v nosné frekvenci pro rozlišitelnost informace o přenosu logických hodnot true a false, který na obrázku vyjadřují ukazatele Fmin+ a Fmin-. Taková odchylka by měla být minimálně 185 kHz při přenosu rychlostí 1 Msym/s a 370 kHz při přenosu 2 Msym/s. Dále je vyžadováno dodržování maximální míry chyby při překračování nuly (střední frekvence), nazývané zero crossing error. Tato chyba by neměla překročit |1/8| periody symbolu. [11]

Obrázek 5 - Vizualizace nároků na přesnost modulace [11]



4.5.3. Radiová anténa a vysílaní signálu

Dokumentace nespecifikuje konkrétní konstrukční řešení antény a vysílacího aparátu, pouze uvádí některé nároky, které na něj klade (viz předchozí bod). Proto bude popsána obecná radiová anténa a její princip fungování.

Před vysíláním signálu je zapotřebí data rozdělit do paketů a přiřadit jim protokolové náležitosti, tato činnost připadá vyšším vrstvám jádra. Dále je nutné takto upravená data modulovat do nosného signálu, který je produkovaný oscilačním obvodem. Modulaci provádí D/A převodník, podle modulačního signálu. Výstupní signál je zapotřebí

zesílit, aby byl dostatečně silný pro přenos a odpovídal požadavkům stanoveným dokumentací. Modulovaný a zesílený signál pak prochází anténou za vzniku elektromagnetického vlnění o požadovaných vlastnostech. Charakteristiky vysílaného signálu záleží mimo jiné i na konstrukci antény.

Základním typem antény je tzv. dipól. Jeho fungování je založené na zdroji střídavého napěťového signálu připojeného do středu otevřeného obvodu o funkční délce L. Podle průběhu signálu se v anténním vodiči přeskupují elektrony z jednoho konce na druhý, čímž automaticky na jeho druhé straně vzniká kladné nabití za vzniku dipólu. Mezi oběma konci se pak tvoří elektromagnetické siločáry. Když tento aparát budeme sledovat v čase, tak zjistíme, že bude docházet při vzájemném střídání dipólových stran k uzavírání těchto siločar a tím k jejich propagaci do prostředí. Frekvence emitovaných vln je shodná s frekvencí modulovaného signálu. Použitý otevřený obvod musí splňovat podmínky rezonance s daným signálem. Toho se dosahuje pomocí regulace fyzické délky obvodu (L) tak, aby byl v určitém poměru s vlnovou délkou signálu, který má emitovat. U dipólových antén se obvykle využívá poměr $L = \lambda/2$, což pro 2,4 GHz znamená L = 6,25 cm. To je pro malé anténní obvody integrované do základních desek stále příliš velká délka, a proto se v takových případech využívají tzv quarter-wave monopólové antény, které se dají zabudovat i do velice malých základních desek díky délce obvodu $L = \lambda/4$. Přibližný princip jejich fungování popisuje zdroj tohoto odstavce. [22]

Mezi základní charakteristiky antény, patří ztráta odrazem, šířka pásma, tvar vyzářeného pole (potažmo zisk) a z něj vycházející směrovost. [22]

Ztráta odrazem (angl.: return loss) je matematické vyjádření poměru mezi výkonem na anténu skutečně dodaným a odraženým, kde odražení vzniká při průchodu signálu ze zařízení do anténního obvodu na základě rozdílů charakteristických impedancí [Ω] vodičů. Významem tohoto údaje je reprezentovat efektivitu přechodu signálu z obvodů zařízení do antény. Udává se v decibelech a její výpočet je následující: [22] [24]

$$Z_o = 10 \times log_{10}\left(\frac{P_d}{P_o}\right)$$

Rovnice 4 – Výpočet ztráty odrazem v logaritmických jednotkách dB

Kde:
Z_o – Ztráta odrazem [dB]
P_d – dodaný výkon [W]
P_o – odražený výkon [W]

Vzhledem k tomu, že Bluetooth neoperuje pouze na jedné frekvenci, ale na celé škále (pásmu), tak je zapotřebí řešit tzv. šířka pásma antény (bandwidth). Ta navazuje na téma ztráty odrazem, jelikož se zabývá změnou míry odrazu v případě změny frekvence vysílání. Výpočet ztrát odrazem probíhá stejně jako v předešlém bodě. Klíčovým je porovnání výsledných hodnot po celém pásmu, a především v jeho krajních bodech. Od středové frekvence, na kterou je anténní obvod optimalizovaný (je jí rezonantní), ke krajům pásma má odrazivost rostoucí charakter. Šířka pásma pak definuje na jak velkém pásmu je anténa schopná efektivně pracovat bez překročení určité míry ztrát [22]

Zisk antény (angl.: gain) je relativní údaj, který definuje, o kolik efektivnější je reálná anténa ve vyzařování signálu v daném směru v porovnání s ideální izotropní anténou, které je dodávaný stejný signál (alternativní referencí je ideální dipól, z čehož vycházejí jednotky dBd). Ideální izotropní anténa je v tomto kontextu nekonečně malý bod emitující ideální signál bez ztrát do všech směrů. Reálná anténa má v některých směrech efektivitu menší, a v některých zase větší v závislosti na její konstrukci. Zisk se v tomto případě zapisuje v jednotkách dBi. Výpočet vypadá následovně [22] [24]:

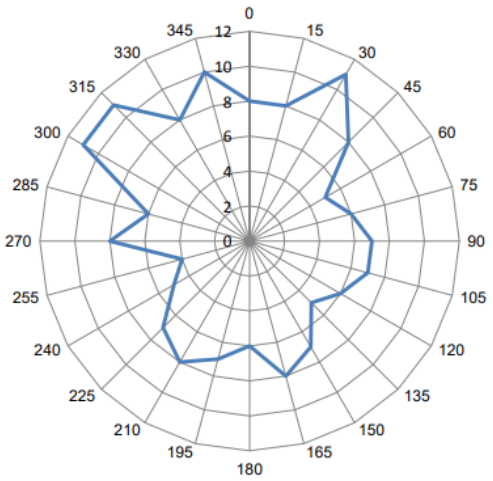
$$Z = 10 \times log_{10}\left(\frac{x}{1}\right)$$

Rovnice 5 – Výpočet zisku antény v logaritmických jednotkách dBi relativních zisku izotropní antény

Kde:
Z – Zisk [dBi]
x – je násobek síly signálu z reálné antény vůči teoretické anténě izotropní, jejíž síla signálu je zde reprezentována jedničkou ve jmenovateli zlomku [-]

Pokud je provedeno měření síly signálu a výpočet zisku v pravidelných intervalech po celém obvodu vyzařovaného pole antény, pak se dají výsledky zakreslit do kružnicové soustavy souřadnic viz Obrázek 6. Při spojení zakreslených bodů vzniká přibližné grafické znázornění tvaru vyzářeného pole. [22]

Obrázek 6 – příklad tvaru vyzářeného pole [22]



Díky tomuto vyobrazení se dá zjistit charakteristika antény, které se říká směrovost. Některé antény jsou speciálně stavěné na to, aby měly extrémně vysoký zisk, a tedy dosah v jednom určitém směru, kterému obětují vysílání jakýmkoliv jiným směrem. Příkladem takových antén jsou vysoko-ziskové satelitní antény, nebo úzce směrové antény obecně. V kontextu tématu práce se tento graf využívá spíše k zjištění kvality antény a toho jak dobře a rovnoměrně dokáže vysílat do různých směrů, jelikož nejběžnější anténou je všesměrová. [22]

V rámci této kapitoly byly definovány jednotky dB a dBi, jejichž původ byl objasněn nicméně v kapitole o modulaci byla využita ještě jednotka dBm, která objasněna úplně nebyla a pro prevenci záměny bude stručně uveden její původ. V jednotkách dBm se uvádí síla signálu, která je vztažená k hodnotě jednoho miliwattu podle obdobného vzorce jako u zisku antény [22] [24]:

$$S = 10 \times log_{10}\left(\frac{x}{1}\right)$$

Rovnice 6 – Výpočet síly signálu v logaritmických jednotkách dBm relativních 1 mW

Kde:
S – Síla signálu [dBm]
x - naměřený výkon signálu [mW]

Z tohoto vzorce je patrné, proč se může stát, že se síla signálu uvádí v záporných hodnotách, je totiž relativní mírou. K takové situaci může dojít v případě, že je výkon menší než 1mW, což je speciálně v případě BLE velice běžné.

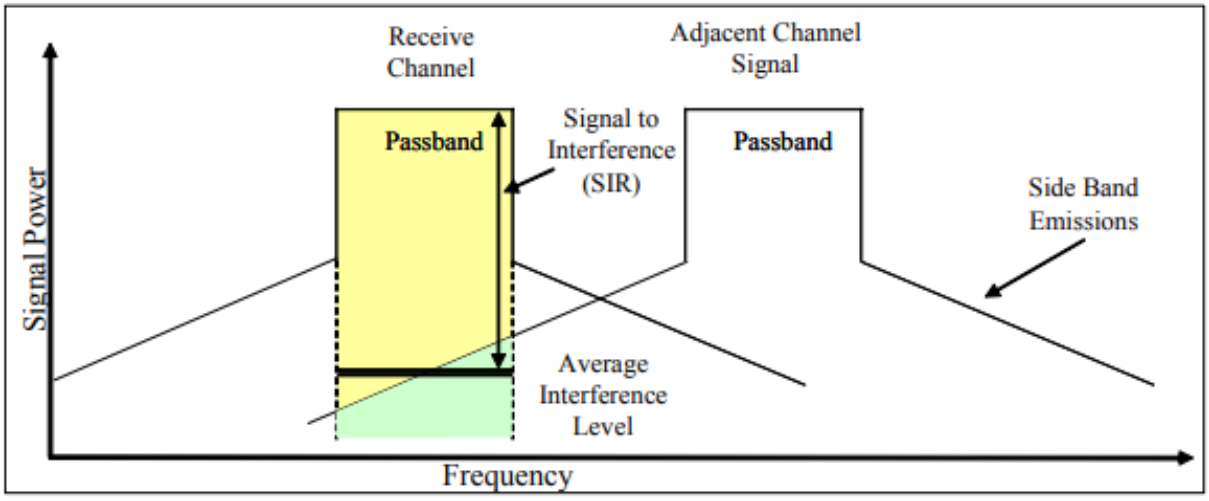
4.5.4. Rušení frekvenčně sousedními technologiemi

Vzájemné ovlivňování dvou a více vlnění je založené na principu superpozice. Tento princip v kontextu základní mechaniky říká, že pokud na těleso působí více nezávislých sil, pak výsledný pohyb je způsobován jejich výslednicí. Stejný princip se dá v jeho zjednodušené podobě aplikovat i na vzájemné ovlivňování signálů. Výsledný signál má průběh závislý na součtu všech, ze kterých se skládá. Z toho vyplívá, že hlavním ovlivněným parametrem bude amplituda. To nepředstavuje příliš velký problémem jelikož, jak bylo řečeno v kapitole o modulaci, BLE využívá frekvenční modulaci a nikoliv amplitudovou. Tudíž není tímto fenoménem významně ovlivněno. To je jednou z hlavních výhod frekvenční modulace (FM) oproti amplitudové (AM).

I přes tento fakt dochází k vzájemnému ovlivňování FM komunikací. Jak je to tedy možné? Hlavními zdroji jsou dva druhy rušení, a to rušení komunikací na stejném kanálu (co-channel interference, jinak také CCI, nebo crosstalk) a komunikací na přilehlém kanálu (adjacent channel interference, jinak také ACI). [18]

ACI je rušení vzniklé komunikací probíhající na frekvenčně blízkých kanálech, které při vysílání tvoří tzv. boční emise viz Obrázek 7. To jsou frekvenčně odlišná vlnění od jejich původního kanálu, která můžou zasahovat až do sousedního frekvenčního pásma a tím pádem se vyhnout frekvenčním filtrům. Vyvarovat se toho, že anténa bude přijímat i tyto signály, příliš nelze. V tu chvíli již záleží na poměru mezi silou signálu chtěného a rušivého (viz signal to interference ratio, Obrázek 7). Pokud je tento rozdíl dostatečně velký, pak i takové rušení lze z větší části odfiltrovat. [18]

Obrázek 7 – vizualizace ACI [18]



Vzhledem k tomu, že BLE operuje v nelicencovaném pásmu 2,4GHz, které je využívané civilními komunikačními technologiemi, tak je bohužel velmi náchylné na rušení, protože toto pásmo nikdo nereguluje. Kromě toho se zde vyskytují technologie, jejichž kanály se buď úplně nebo alespoň z části překrývají s kanály BLE. To způsobuje, že ACI nevzniká pouze díky nechtěným bočním emisím, ale také kvůli tomu, že část záměrně produkovaného signálu zasahuje do kanálu BLE. [18] [23]

Tím lze plynule přejít k definici CCI, což v překladu znamená rušení na společném kanále. Zde může docházet k rušení buď jinou technologií, nebo BLE samotným. CCI mezi BLE a jinou technologií vzniká pouze v případě, že mají shodný kanál. BLE si může být sobě rušením v případě, že se dosahy signálu dvou nepropojených vysílačů překrývají a kolidují vzájemně na jednom přijímači. CCI je problematičtější než ACI, jelikož způsobuje, že se na přijímači tvoří nechtěný signál, který splňuje buď všechny, nebo alespoň většinu kritérií frekvenčního filtru, které takové rušení jen s těží odfiltrují. V nejhorším případě mají tyto dva signály i srovnatelnou sílu, takže ani filtry podle RSSI nezafungují. Takto promíchaný signál pak jde do demodulátoru, kde dochází k poškození informace a tím ke ztrátě části dat, která byla ovlivněna. To způsobuje zpomalení komunikace, jelikož se musí vysílaní poškozené části opakovat. V nejhorším případě může dojít k její chybné interpretaci, kterou systém nerozpozná jako vadnou a může docházet k chybám ve vyšších vrstvách architektury. [18] [23]

Vzhledem k využívanému pásmu se mezi problematické technologie schopné způsobovat některou z právě uvedených forem rušení řadí především IEEE 802.11 (Wi-Fi, f=2,4GHz), IEEE 802.15.4 (ZigBee, f=2,4GHz) a zároveň Bluetooth (classic i LE samotné) a další. [23]

Pro adresaci popisovaného problému má Bluetooth ve svém jádře zabudovaných několik opatření. Pro prevenci vzniku ručení existují dříve uvedená opatření: slot availability mask a frequency hopping. V případě, že k rušení dojde, tak se musí aplikovat frekvenční a jiné filtry pro minimalizaci škod. S výhodou se může využít i ECC , které Bluetooth nabízí a tím zajistit integritu dat i v případě že rušení projde skrz filtrační vrstvu.

4.5.5. Vliv prostředí

Prostup vlnění prostředím ovlivňují především dva faktory: samotná propagace vlny prostorem nehledě na překážky a dále podstata prostředí, ve kterém Bluetooth operuje, způsobující útlum. [14]

První faktor není příliš problematický, jelikož závislost dosahu signálu na ztrátách při pohybu volným prostorem (FSL – free space loss) je dobře odhadnutelná a relativně konzistentní. Tento druh ztrát se dá odhadnout v decibelech použitím následujícího vzorce [14]:

$$FSL(d) = 10 \times log_{10}\left(\frac{4 \times \pi \times d}{\lambda}\right)^2$$

Rovnice 7 – Výpočet odhadu ztráty výkonu při propagaci signálu volným prostorem

Kde:
FSL(d) – ztráta výkonu při pohybu volným prostorem, která je funkcí vzdálenosti [dB]
d – vzdálenost mezi vysílačem a hypotetickým přijímačem [m]
λ – vlnová délka [m]

Je důležité poznamenat, že autor odkazované práce dokumentuje technologii IEEE 802.11. Ta ovšem pracuje ve stejném frekvenčním pásmu jako Bluetooth, tudíž se použitá teorie dá aplikovat i zde. [14]

Na rozdíl od FSL problém nastává u druhého faktoru. Vliv prostředí může mít několik podob, mezi které patří především: absorpce, odrazy, ohyby a rozptyl. Vliv odrazů, ohybů a rozptylu na vlnění není tak problematický jako absorpce, jelikož v jejich případě alespoň dochází k přesměrování signálu do dalších míst, kam by se nemusel přímou cestou dostat (například mezi domy v městské zástavbě, nebo za roh, kam vysílač přímo nevidí), zatímco absorpce signál pohlcuje. Vliv prostředí jako celek je kritický, jelikož ze své podstaty ovlivňuje signál nepravidelně a tím velice komplikuje logiku na základě které je zapotřebí vysílače rozmisťovat. Tomuto jejich výrobce nemůže předcházet, a proto jediný efektivní způsob, jak ho eliminovat, je ho identifikovat a adekvátně mu přizpůsobit prostorovou i hardwarovou architekturu celého systému. [14]

Princip absorpce spočívá ve vlastní podstatě radiového signálu. Radiové vlny jsou propagovány prostorem pomocí energie. Tato energie je jim dána na anténě, jak bylo

popsáno výše. Když vlna prostupuje prostorem, tak k tomu svou energii spotřebovává. Takto spotřebovaná energie se mění na jiné formy, aby byl dodržen zákon zachování energie. Každé prostředí má rozdílnou míru vlivu na signál. Hlavními vlastnostmi vlnění, které diktují jeho chování vůči prostředí jsou jeho vlnová délka (λ) a frekvence. [25]

Jedním z nejvíce absorpčních prostředí pro radiové vlnění je voda, jelikož obsahuje molekuly, které se chovají jako dipól (obsahují atomy s opačnou polaritou na jedné molekule), a tedy se při styku s elektromagnetickým polem snaží přeorientovat v jeho směru, čímž spotřebovávají energii signálu. Dá se tedy předpokládat, že jakékoliv překážky, které mají větší obsah vody budou pro Bluetooth problematické. K absorpci může ovšem docházet i v jiných materiálech, jako jsou např. kovy. [25]

Pokud překážka sníží energii vlny o určitý počet miliwattů, tak se dá hovořit o ztrátě korespondujícího množství dB podle vzorce derivovaného z dříve uvedených vztahů o síle signálu [24]:

$$Z = 10 \times log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Rovnice 8 – Vztah vyjadřující ztrátu výkonu signálu v relativní logaritmické jednotce dB

Kde:
Z – velikost ztráty [dB]
P_1 – výkon signálu před překážkou [W]
P_2 – výkon signálu za překážkou [W]

Bude-li naměřen před překážkou výkon 1mW a za ní 0,5mW, pak zjistíme, že došlo k poklesu o cca 3 dB.

Kromě absorpce vlnění dochází také k jeho odrážení, lomu, nebo rozptylu. Tyto fenomény se projevují při kontaktu vlny s rozhraním dvou prostředí, které mají výrazněji rozdílnou propustnost EM vlnění. V důsledku všech třech jevů dochází ke změně směru propagace signálu v závislosti na tvaru rozhraní, úhlu dopadu vlny a jejích charakteristik. Charakter změny směru je pak závislý na tom, o který jev se jedná. Takový jev může být pro signál jak pozitivní, tak i negativní. Negativním dopadem je, že se signál dále nešíří v původním zamýšleném směru se stejnou silou. Naopak pozitivním dopadem je

to, že se může vlna dostat i do některých míst, které nejsou s vysílačem v přímém LOS (line of sight), s větší než očekávanou silou. Záleží tedy na kontextu. [14]

4.5.6. Shrnutí

V této kapitole byl probrán princip vysílání signálu a jevy, které jeho šíření prostorem a následný příjem ovlivňují. Patří mezi ně hlavně vliv prostředí a rušení ostatními signály.

U rušení ostatními signály se dá předpokládat, že bude méně dominantním problémem z obou zmíněných, jelikož se o jeho eliminaci vývojáři Bluetooth aktivně snaží a zavedli několik opatření, která by měla předcházet problémům se vzájemným rušením signálů, nebo jejich následky minimalizovat. Mezi ně se řadí dříve zmíněný frequency hopping, SAM, filtry a ECC.

V kontrastu s tím je vliv prostředí tématem, které je potřeba zdokumentovat, aby se dala odhadnout míra vhodnosti využití BLE k fungování v rámci budovy, která ze své podstaty představuje soustavu překážek, kterou musí signál úplně pokrýt. Údaje získané z takového zkoumání se kromě teoretického využití dají také s výhodou aplikovat při navrhování konkrétní sítě. Tedy aby se dal najít co nejlepší kompromis mezi redundantně hustou sítí a neúplným pokrytím.

4.6. BLE zařízení

V tento moment je zapotřebí, aby bylo rozhodnuto o tom, jaký logický princip bude pravděpodobně nejvýhodnějším pro lokalizaci pomocí Bluetooth, jelikož to bude diktovat výběr hardwaru pro realizaci. Nabízí se buď využívat primárně RSSI k odhadu vzdálenosti mezi vysílačem a lokalizovaným zařízením a následnou trilaterací polohy, což by znamenalo menší počet vysílačů s větším dosahem, nebo primární využití proximity s dodatečnou trilaterací.

Vzhledem k tomu, že za nejvhodnější verzi bylo vybráno BLE 5.2 s jeho již dříve vyzdviženou schopností komunikovat broadcastem na krátkou vzdálenost s minimální spotřebou, je zřejmé, že využití proximity k primárnímu určení polohy bude pravděpodobně nejefektivnější. Upřesnění konkrétní polohy pak může probíhat na základě dopočtu polohy v subsystému proximitou vybraných vysílačů.

Jaký typ zařízení je tedy na takové nasazení nejoptimálnější? Autor knihy Make: Bluetooth [15] v desáté kapitole popisuje, že účel zařízení, označovaných jako BLE beacony,

je sloužit aplikacím pracujícím s proximitou zařízení, což je přesně to, co je žádáno. Další součástí mozaiky je popis GATT profilů poskytnutý v publikaci Getting started with Bluetooth low energy [3], kde můžeme najít mimo jiné také popis *proximity profile* a informaci o tom, že je možné tvořit vlastní profily. Na základě těchto dvou faktů se dá odhadovat, že právě BLE beacony budou nejvhodnějším kandidátem.

4.6.1. BLE beacony

Kombinace problematiky GATT profilů a beaconů nevyhnutelně vede k pojmům Eddystone, iBeacon a Altbeacon, které mají společné, že jsou GATT profilem, který ze standardního BLE zařízení udělá „beacon“. Beacon je v tomto kontextu zařízení, které vysílá do svého okolí broadcastové pakety za účelem předávání informace specifické pro daný beacon pomocí non-connectable advertisingového typu komunikace. Právě tento framework by se dal využít k tvorbě lokalizačního systému. [17]

Pozn.: Vzhledem k tomu, že Altbeacon se do značné míry podobá iBeaconu, tak bude dále provedeno srovnání především mezi prvními dvěma uvedenými typy.

Tyto profily vznikly z potřeby standardizace, a proto ačkoliv si každý výrobce HW beaconů může teoreticky vyvinou vlastní GATT profil, tak je daleko efektivnější využít jeden ze široce známých profilů. Z toho důvodu na trhu v současné chvíli najdeme primárně beacony, které využívají jeden z uvedených, nebo nemají zvolený žádný a tím umožňují instalaci jakéhokoliv z nich. [17]

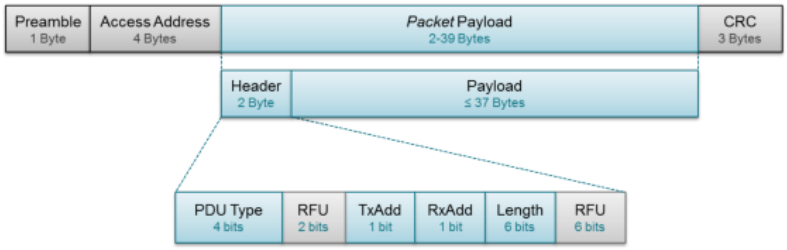
iBeacon je profil vyvinutý firmou Apple, který se stal průkopníkem technologie beaconů. Jelikož byl svého času iBeacon exkluzivní Apple zařízením, tak vznikl Altbeacon, který se ho snažil imitovat pro ostatní výrobce. Brzy ovšem vstoupila na trh konkurenční technologie v podobě profilu Eddystone, který vyvinula firma Google. V současné době tyto dva profily již nejsou tolik omezené kompatibilitou s koncovými zařízeními. Jediné, v čem se liší je struktura advertisingového paketu a drobné rozdíly ve funkcionalitě. Obecně se dá tvrdit, že Eddystone profil je více otevřený k interpretaci díky tomu, že je opensource a jeho modulární struktuře paketu. Na druhou stranu iBeacon poskytuje značně lepší kompatibilitu a rozšířené funkce se zařízeními od firmy Apple díky spolupráci vyšších vrstev komunikace. [17]

Profily ovlivňují strukturu advertisingového paketu, který beacon vysílá do okolí. Nejprve je ovšem nutné popsat, jak vypadá základní formát paketu. BLE paket se dá chápat jako vrstvená struktura, kterou graficky zobrazuje Obrázek 8. [17]

První vnější vrstva se skládá z preambule, adresy, obsahu paketu (packet payload) a CRC. Preambule je kód využívaný k úpravám náležitostí pro komunikaci. Adresa pak slouží k rozlišení komunikací, které existují na stejném kanálu, aby se předcházelo kolizím, což u přenosu broadcastem není zapotřebí, a proto je adresa advertising paketu nastavená na fixní hodnotu. CRC, nebo také cyclic redundancy check je kód používaný ke kontrole celistvosti paketu. [16]

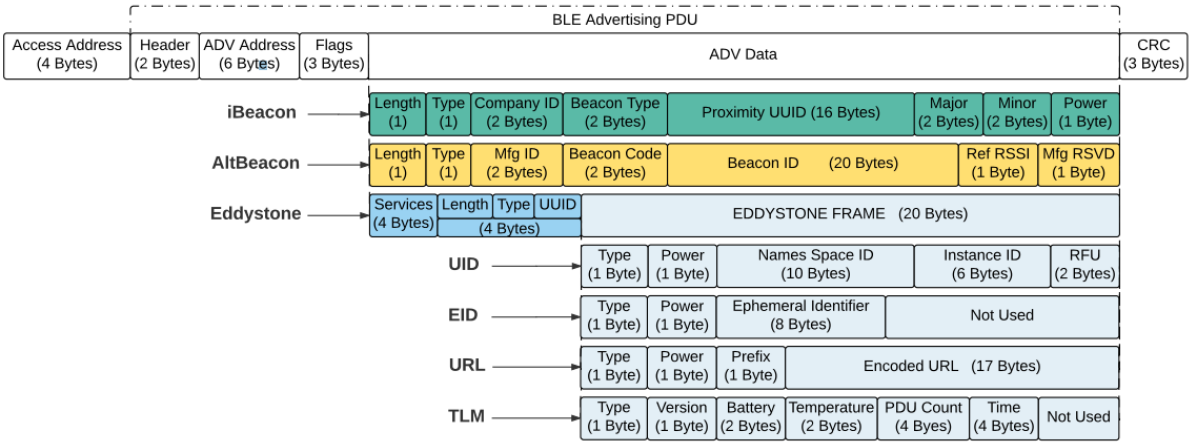
Druhá vrstva paketu je zanořená do packet payloadu, který obsahuje hlavičku a payload samotný. Hlavička obsahuje mimo jiné i informace o typu a délce payloadu. [16]

Obrázek 8 - struktura BLE paketu [16]



To, v čem se uvedené profily vzájemně liší, je právě payload, jelikož to je část, kterou lze ovlivňovat pomocí GATT. Přehledně rozdíly ve struktuře vyobrazuje Obrázek 9, kde je mimo jiné znázorněná i struktura Altbeaconu. Již od pohledu je vidět jasná podobnost mezi paketem iBeaconu a Altbeaconu, na kterou bylo poukazováno výše. [17]

Obrázek 9 - struktura payloadu v závislosti na profilu [17]



Z obrázku je patrné, že iBeacon má pouze jeden typ paketů, zatímco Eddystone jich má hned několik podle zamýšleného využití. Význam jednotlivých položek této struktury je již příliš podrobný pro rozsah této práce, více informací poskytuje zdroj: [17].

4.6.2. Hardwarové platformy

V předcházející kapitole bylo řečeno, že ke vzniku funkcionality beaconu stačí implementovat příslušný GATT profil. Z toho vyplývá, že prakticky každé zařízení s příslušným Bluetooth jádrem dokáže fungovat jako beacon. BLE se ovšem využívá především v drobné elektronice, která je úplně bezdrátová a pokud možno co nejmenší. Proto se pod pojmem beacon v praxi většinou setkáme s malým bateriovým zařízením, které bez krytu zabírá pár čtverečních centimetrů a je designované tak, aby s co nejmenší spotřebou dokázalo plnit nutné úkony pro provoz BLE jádra s příslušným profilem. [17]

Předními výrobci chipsetů pro beacony jsou firmy s velkým jménem na trhu jako například Nordic semiconductors, Texas instruments, Qualcomm atd. Tyto chipsety jsou dále zpracovávány firmami jako například Kontakt.io, Estimote, Swirl, Radius Networks a mnoho dalších. [17]

Hardwarově nejsou tvůrci příliš omezeni, a proto existuje velké množství různých druhů beaconů, které se zaměřují na různá použití. Zajímavostí je, že v tabulce relevantních komerčních beaconů (pro rok vydání publikace: přelom 2017-18) autoři publikace [17] uvádí odhady výdrže baterie, které se pohybují v širokém rozmezí od 5 měsíců až po astronomických 72 měsíců. To jen dále potvrzuje tvrzení, že se nedá příliš generalizovat, pokud jde o platformy označované jako beacony, jelikož jejich zaměření a výkonnost v daném směru jsou dost specifické.

5. Praktická část práce

Z obsahu literární rešerše vystupuje jedna problematika, která má značný vliv na závěr, ke kterému má tato práce dojít a to způsobem, který se nedá příliš ovlivnit jinak než ho respektovat, a v míře, která je potřeba zdokumentovat. Touto problematikou je vliv prostředí na šíření signálu.

5.1. Návrh metodiky

Navrhovaný pokus bude sestávat ze tří částí. První bude zjišťovat, jak velký vliv má FSL na přenos pomocí měření RSSI v závislosti na vzájemné vzdálenosti vysílače a přijímače. V druhé části půjde o testování míry vlivu vybraných materiálních překážek na sílu signálu mezi dvěma konstantně vzdálenými zařízeními v ose přenosu. Třetí a poslední částí bude zkoumání vlivu nejvíce rušivé překážky (vycházející z druhé části) na sílu signálu, a to pouze při narušování Fresnelovy zóny, a nikoliv osy přenosu.

Protože v kapitole o HW platformách bylo řečeno, že se jen s těží dá hovořit o jednotnosti typů zařízení, tak bude využito běžně dostupných, jako je kupříkladu laptop, nebo mobilní telefon, které musí obsahovat LE jádro (konkrétní popisy použitých zařízení budou dodány v popisu realizace). Vzhledem k tomu, že všechny verze BLE operují na stejném frekvenčním pásmu, tak není vyloženě nutné, aby využitá zařízení obsahovala dříve doporučenou verzi jádra 5.2, ale i starší budou dostatečné.

5.2. Popis realizace

Ke všem částem pokusu budou využita dvě zařízení, a to notebook Lenovo ThinkPad X270 s verzí Bluetooth® 4.2 s LE a mobilní telefon Samsung Galaxy S9 s verzí Bluetooth® 5.0 s LE. Na uvedeném notebooku je nainstalovaný unixový operační systém Ubuntu, ve kterém se bude spouštět skript, pomocí něhož se bude provádět zisk dat o síle signálu. Jeho konkrétní podoba a popis fungování jsou uvedené v první příloze této práce.

5.2.1. Určení míry FSL

Pro toto měření nebude nutné mít žádné přídavné vybavení (kromě dříve uvedené elektroniky).

Princip měření bude spočívat v rozmístění zařízení do vzdálenosti 15 m od sebe tak, aby mezi nimi, ani v nejbližší blízkosti osy přenosu nebyly jakékoliv překážky, či jiné rušivé vstupy, které by mohly významně ovlivnit výsledek měření. Bude vytvořeno spojení a na jednom ze zařízení bude spuštěn příslušný software, který umožní sledovat RSSI. Tato hodnota bude zapsána na výchozí vzdálenosti 15 m a dále průběžně měřena v závislosti na vzdálenosti s krokem 1 m. Pro každý krok bude navíc vypočítána teoretická míra ztrát podle Rovnice 7 pro výpočet FSL. Díky tomu bude ověřena platnost vztahu a přesnost jeho aproximace a zároveň budou poskytnuty kontrolní referenční hodnoty pro měření. Při sečtení naměřené hodnoty RSSI a vypočítané ztráty pro danou

vzdálenost by vždy mělo vyjít více méně stejné číslo, které bude přibližně reprezentovat vyzářený výkon.

Výstupem této části bude průběh změny síly signálu v závislosti na vzdálenosti, ověření platnosti použitého vztahu pro FSL a odhad vyzařovaného výkonu.

5.2.2. Zjištění vlivu překážek v ose přenosu na sílu signálu

Pro toto měření bude nutné obstarat, kromě dříve použitých zařízení, ještě několik druhů materiálu o nejmenším rozměru dvojnásobku vlnové délky, tedy 25 cm. Výjimkou je tloušťka (nicméně i ta hraje roli). Vybrané materiály pro tento pokus jsou: dřevo, cihlová zeď, lidské tělo reprezentující biologický materiál, voda a hliníková folie (reprezentující vodivé kovy).

Princip bude spočívat v rozmístění vybraných zařízení do vzdálenosti 5 m, stejně jako u první části, jen s tím rozdílem, že v ose přenosu se bude nacházet vždy jedna z vybraných překážek. Bude provedeno opakované měření síly signálu pod vlivem zvoleného materiálu pro všechny vybrané položky. Takto získaná hodnota RSSI bude porovnána s hodnotou získanou v první části pokusu pro vzdálenost 5 m.

Výstupem této části bude míra ztrát pro všechny zvolené materiály a jejich vzájemné srovnání.

5.2.3. Vliv překážek ve Fresnelově zóně

Pro toto měření budou použity obě zařízení a pouze jeden z materiálů využitých v druhé části a to ten, který bude shledán nejvíce rušivým.

Zařízení budou opět umístěna do vzdálenosti 5 m, tak aby jejich osa a Fresnelova zóna nebyly narušeny nechtěnými vlivy. Fresnelova zóna by pro f = 2.4 GHz a d = 5 m měla mít poloměr přibližně 40 cm [26]. Vprostřed mezi oběma zařízeními bude do oblasti předpokládaného výskytu Fresnelovy zóny vnášen vzorek materiálu tak, aby se nedostal do osy přenosu. Bude změřena síla signálu, která pak bude srovnána s příslušným výsledkem stejného materiálu z druhé části pokusu.

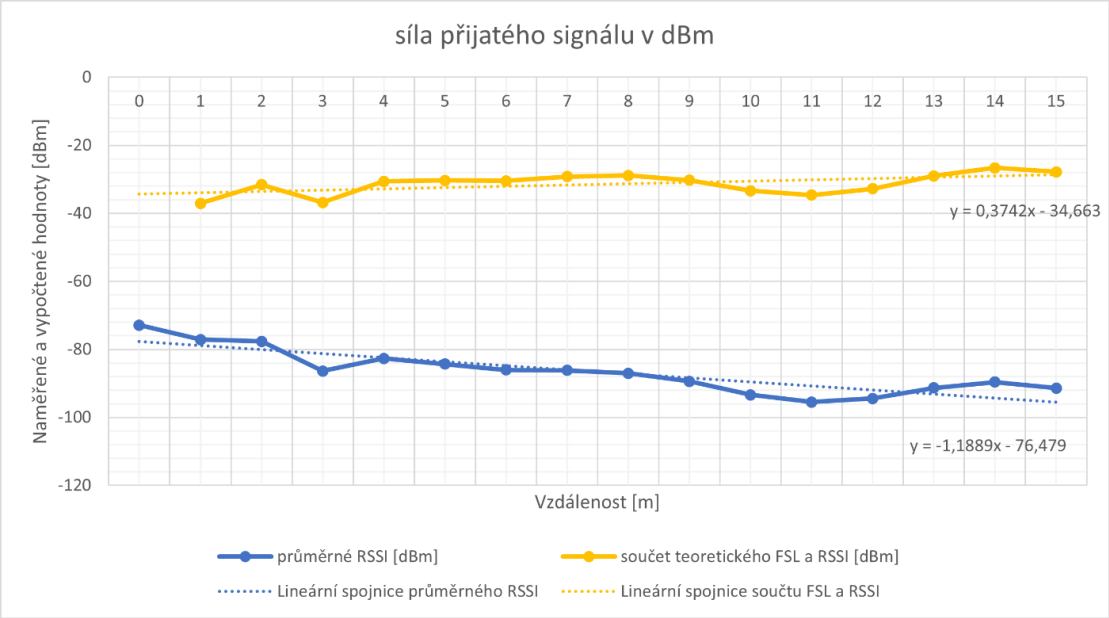
Výstupem tohoto měření bude rozdíl míry vlivu rušivého matriálu přímo v ose přenosu a ve Fresnelově zóně.

5.3. Výsledky

5.3.1. Free space loss

Ačkoliv naměřené hodnoty RSSI při některých vzdálenostech měly poměrně velký rozptyl a tedy způsobily, že jejich průměrná hodnota vybočuje z řady, tak lineární spojnice trendu vyšla v rámci očekávání. Je tedy klesající v závislosti na zvyšující se vzdálenosti viz Obrázek 10, modrá křivka. Korelační koeficient pro naměřené hodnoty a hodnoty lineární regrese je v tomto případě roven 0,87 s koeficientem determinace rovným 0,76, což naznačuje že jejich vzájemná závislost je přímá a v celku těsná (maximální hodnota obou koeficientů je 1).

Obrázek 10 - graf výsledků měření na 15-0 m v dBm



Za účelem ověření platnosti vztahu č.7 pro výpočet FSL uvedeného v teoretické části práce byly vypočítány hodnoty FSL pro jednotlivé vzdálenosti, které po přičtení k příslušenému průměrnému RSSI vykreslily křivku žluté barvy (viz Obrázek 10), která by měla reprezentovat reálně vyzářený výkon. Podle získané rovnice lineární spojnice žluté křivky je vidět, že i přes nekonzistence ve výsledcích měření je výsledek více méně konstantní s koeficientem naklonění jen drobně rozdílným od nuly v kladném směru, což může být způsobeno nepřesností měření a nestálostí síly signálu způsobené prostředím. Korelační koeficient mezi vypočtenými hodnotami a hodnotami jejich lineární regrese je ovšem roven pouze 0,54 a koeficient determinace tedy vychází 0,29, což naznačuje určitou míru závislosti, ale s malou korelací. Tento fakt je částečně v rozporu s úsudkem při pohledu na graf, jelikož se žlutá křivka jeví dokonce těsnější než modrá,

ale statistika mluví jistě. Při zvážení obou hledisek se dá říct, že uvedený vztah do určité míry aproximuje skutečnost, ale provedené měření bylo provedeno s jistými nedostatky v přesnosti.

Konkrétní naměřené a vypočtené hodnoty obsahuje následující Tabulka 1. Z grafů (viz Obrázek 10) je vidět, že nejlépe se spojnice trendu pro naměřené RSSI drží hodnoty ve vzdálenostech 4-8 m. Hodnoty teoreticky vyzářeného výkonu se pro ně pohybují v blízkosti -30 dBm, což by se dalo považovat za nejpřesnější odhad skutečně vyzářeného výkonu. Při srovnání tohoto čísla s hodnotami, které by měl vyzařovaný výkon dodržovat podle pravidel zmiňovaných v kapitole 4.5.2 (část popisující power class zařízení), je zřejmé, že je o -10 dBm pod limitem, což ovšem neznačí chybu, jelikož dokumentace Bluetooth uvádí, že pravidla pro power class definují maximální a minimální vyzářený výkon při maximálním vstupním výkonu. To tedy naznačuje, že zařízení při tomto pokusu nepracovala na svůj maximální možný výkon.

Tabulka 1 - Hodnoty měření a výpočtů pro zjištění míry vlivu FSL

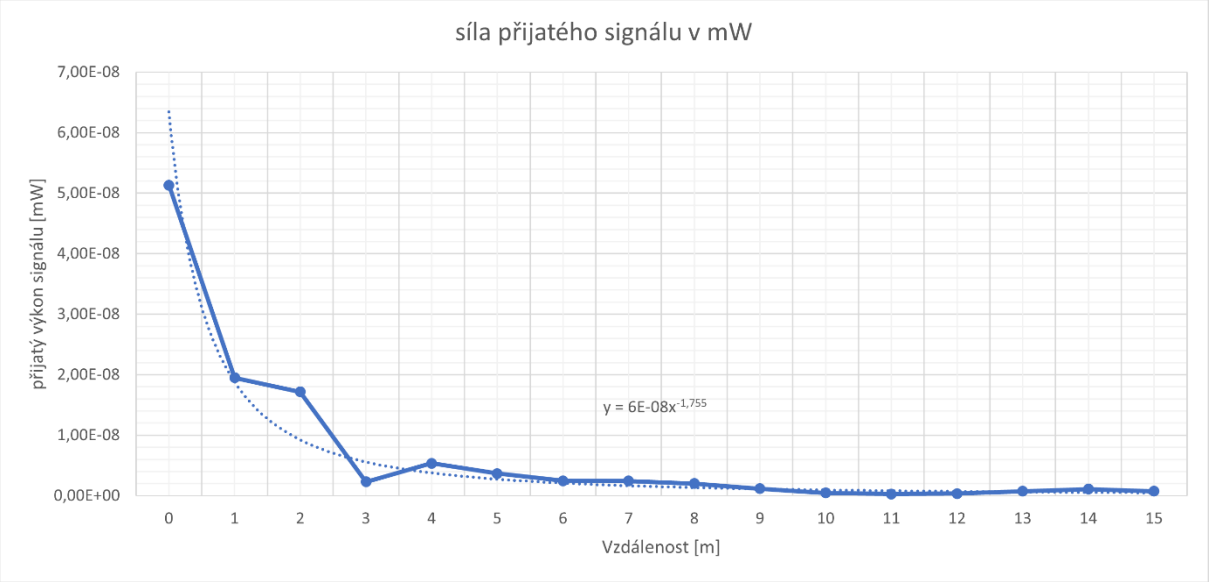
vzdálenost [m]	průměrné RSSI [dBm]	Přijatý P signálu [mW]	Vypočtený FSL [dB]	Teor. vyzářený P [dBm]
0	-72,9	5,13E-08	-	-
1	-77,1	1,95E-08	40,04599702	-37,05400298
2	-77,65	1,72E-08	46,06659693	-31,58340307
3	-86,4	2,29E-09	49,58842211	-36,81157789
4	-82,7	5,37E-09	52,08719685	-30,61280315
5	-84,35	3,67E-09	54,02539711	-30,32460289
6	-86,05	2,48E-09	55,60902203	-30,44097797
7	-86,15	2,43E-09	56,94795782	-29,20204218
8	-87	2,00E-09	58,10779676	-28,89220324
9	-89,4	1,15E-09	59,13084721	-30,26915279
10	-93,4	4,57E-10	60,04599702	-33,35400298
11	-95,5	2,82E-10	60,87385072	-34,62614928
12	-94,4	3,63E-10	61,62962194	-32,77037806
13	-91,35	7,33E-10	62,32486407	-29,02513593
14	-89,6	1,10E-09	62,96855773	-26,63144227
15	-91,4	7,24E-10	63,5678222	-27,8321778

Pozn.: Tabulka 1 obsahuje pouze nejrelevantnější hodnoty, její úplnou podobu lze najít v druhé příloze této práce.

Výkon přijatého signálu neklesá se vzdáleností lineárně, tak jak to vykresluje Obrázek 10, ale exponenciálně, proto pokud se využije dříve uvedené Rovnice 6 pro výpočet

jednotky dBm a z ní se vyjádří síla signálu, tak vznikne křivka viz Obrázek 11, která vyjadřuje naměřené hodnoty v mW, a proto má tvar klesající exponenciály.

Obrázek 11 - graf výsledků měření na 15-0 m v mW

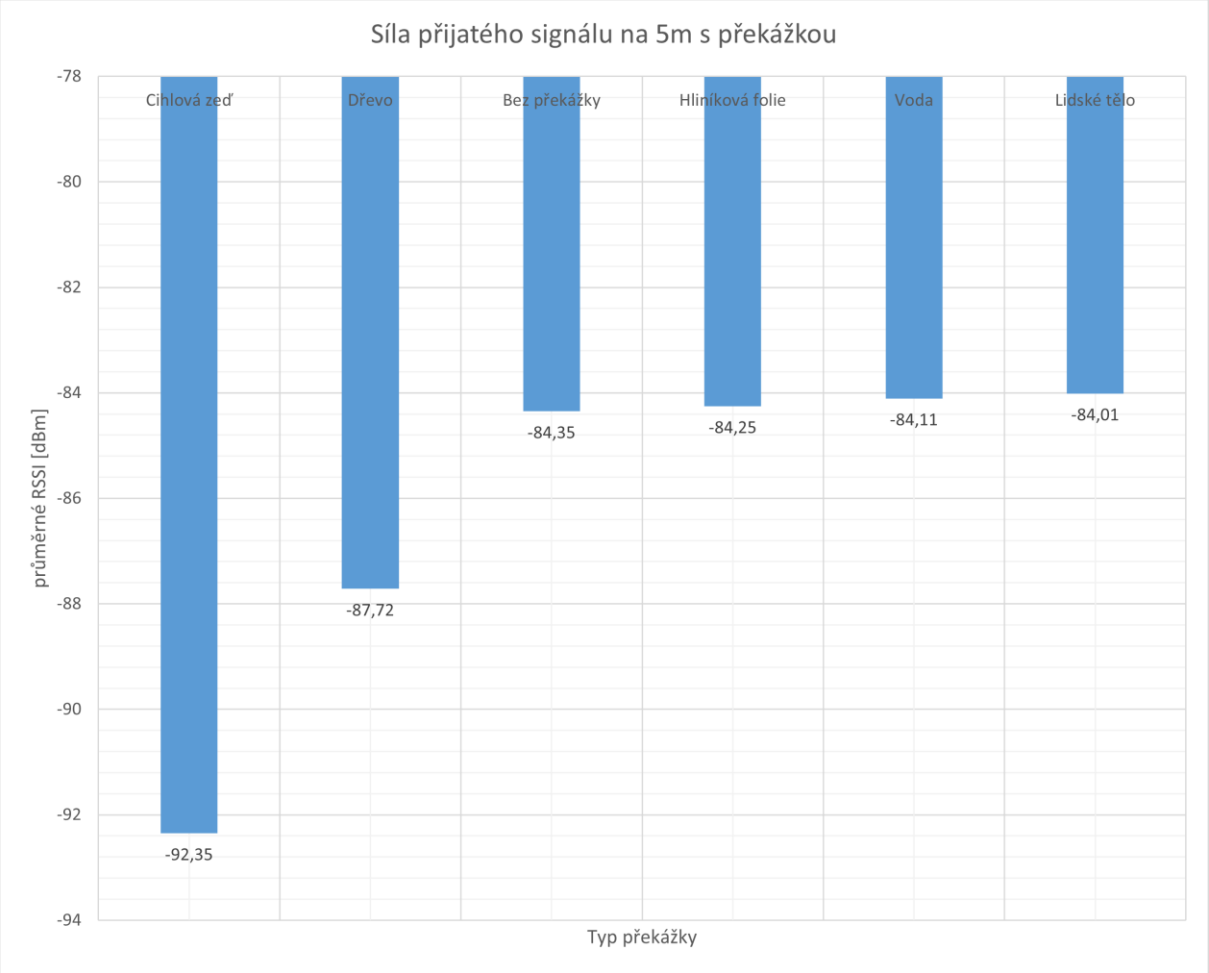


5.3.2. Překážky v ose přenosu

Při prvním měření v rámci této části pokusu, které probíhalo na vzdálenosti 5 m bylo zjištěno, že zvolená minimální velikost překážky není dost velká na to, aby udělala rozdíl v naměřeném RSSI pro tuto vzdálenost. Důvodem mohou být dva jevy. Prvním z nich je pravděpodobně poměr plochy překážky vůči ploše Fresnelovy zóny pro danou vzdálenost a frekvenci. Pro vzdálenost 5 m mezi vysílači, frekvenci 2,4 GHz a překážku přesně uprostřed je plocha F.Z. rovna přibližně 0,5024 m^2 [26]. Za předpokladu, že byla použita čtvercová překážka o velikosti strany 25 cm, tak její plocha 0,0625 m^2 pokrývá pouze cca 12,44% celkové plochy přenosu. Tato skutečnost platí pouze pro překážky: lidské tělo, voda a hliníková folie (některé z nich byly o něco málo větší než 25x25 cm, ale stále se řadí k menším z překážek). Oproti nim pro materiály dřevo a cihlová zeď byly využity podstatně větší překážky, které bezpečně zakryly celou plochu F.Z, což se také projevilo ve výsledcích (viz Obrázek 12). Druhým důvodem je skutečnost, že použitá zařízení obsahují všesměrovou anténu, a tudíž se signál může dostávat na přijímač ve větší míře i odrazem, což vliv překážky dále snižuje. Výsledek tohoto měření napovídá, že podstata překážky není jejím jediným podstatným aspektem, ale také zmíněný poměr její plochy vůči velikosti F.Z. v daném místě, směrovost antény a charakter okolního prostředí obecně.

Tento závěr potvrzuje graf na Obrázek 12, kde je vidět, že pro překážky, které přibližně dodržely zadaný rozměr, se síla signálu příliš nezměnila a držela se okolo -84 dBm. Zatímco pro překážky dřevo a cihlová zeď, které byly podstatně větší, se síla signálu zvládla změnit očekávaným způsobem.

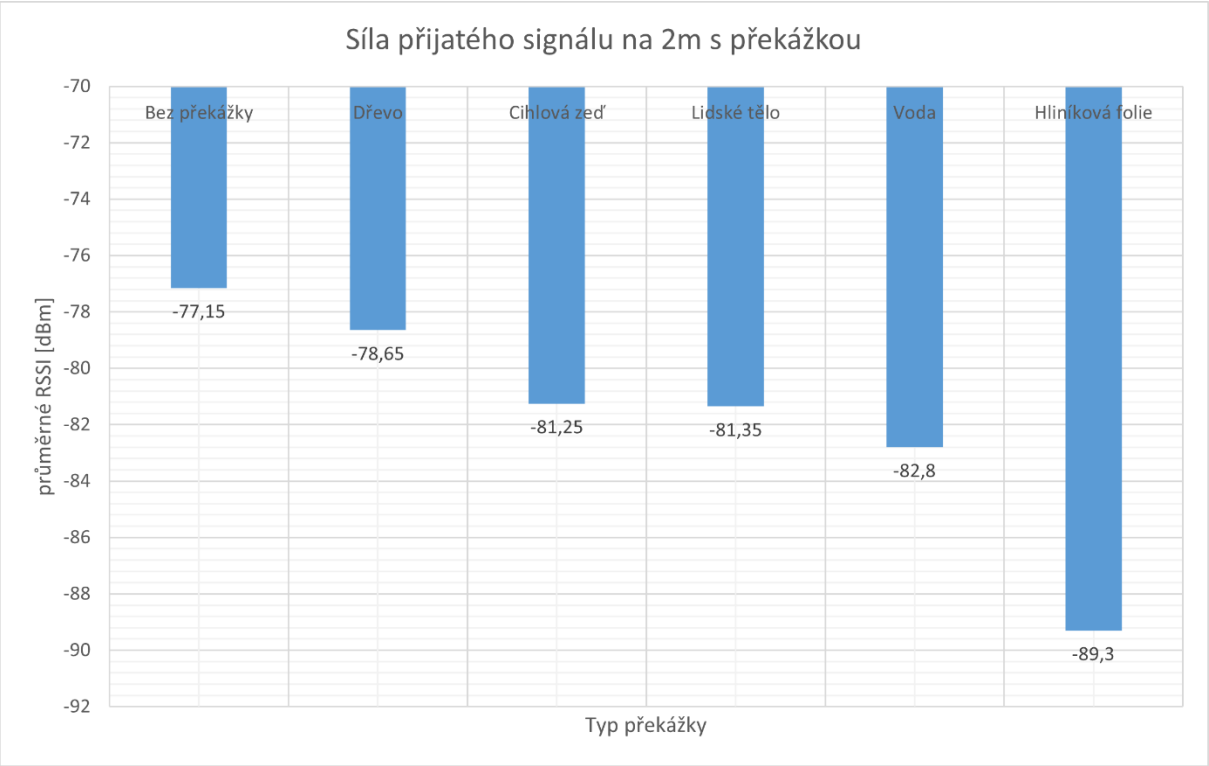
Obrázek 12 – graf výsledků měření RSSI s překážkou na 5 m



Ačkoliv je toto zjištění užitečné, tak neuspokojuje zamýšlený účel měření. Z toho důvodu bylo měření se stejnými překážkami opakováno, ale tentokrát na vzdálenosti 2 m mezi vysílači. Zde je plocha F.Z. rovna 0,1256 m^2 [26], což dokáže zvolený rozměr překážky pokrýt alespoň ze 49,76 %.

Očekávaný výsledek se dostavil, což potvrzuje Obrázek 13. Zde je vidět, že i ty překážky, které jsou menší, dokázaly zakrýt dostatečně velkou část F.Z. na to, aby se jejich útlum projevil.

Obrázek 13 - graf výsledků měření RSSI s překážkou na 2 m



Z výsledků tedy vyplývá že jednoznačně největší vliv má hliníková folie , která měla reprezentovat vodivé kovy obecně. Dá se tedy říct, že pokud je překážka alespoň z části tvořená kovem (jako například železobetonový panel) , tak bude pro Bluetooth (nebo obecně všechny technologie operující na 2,4 GHz) představovat velký problém.

Pozn.: grafy na obrázcích: Obrázek 12 a Obrázek 13 vycházejí z hodnot, jejichž úplná tabulková podoba je k nahlédnutí v třetí a čtvrté příloze této práce.

5.3.3. Překážky pouze ve Fresnelově zóně

Vzhledem k výsledkům předchozích měření nebude tato část měření realizována, protože by s použitým typem antény nebyla dostatečně přesná. Aby se docílilo uspokojivé přesnosti, tak by musela být použita úzce směrová anténa a ta se v běžné uživatelské elektronice nevyskytuje, tudíž toto měření nemá pro zvolenou tematiku dostatečnou vypovídací hodnotu.

5.4. Vyhodnocení a závěr praktické části

Z provedených měření vyplývá, že materiální podstata překážky není jejím jediným podstatným rysem, který ovlivňuje Bluetooth přenos. Mezi další velice podstatné se řadí poměr velikosti mezi překážkou a Fresnelovou zónou přenosu a míra odrazů

v okolí. Typ antény se také nedá zanedbat. Ačkoliv jsou některé materiály podstatně rušivější, než ostatní (např. hliníková folie), tak všechny materiály prokázaly nezanedbatelnou míru útlumu, z toho důvodu je vždy nutné brát překážky v potaz nezávisle na jejich materiální podstatě.

Na základě srovnání výsledků jednotlivých materiálů se dá tvrdit, že dřevostavby jsou příznivější pro fungování Bluetooth systémů než cihlové. Nicméně ani cihlové na tom nejsou z daleka tak špatně jako železobetonové, jelikož ty obsahují vodivý kov a jak naznačuje měření, ten je pro signál nejvíce problematický. Toto tvrzení ovšem nemusí být absolutním pravidlem, protože je nutné brát v potaz i hustotu stěn a jejich tloušťku. Pokud by se srovnávalo šíření signálu v plechové hale bez vnitřních stěn a v dřevostavbě s četnými vnitřními stěnami, tak je pravděpodobné, že výsledky budou právě opačné tomu, co by se z výsledků tohoto pokusu dalo usuzovat.

Dalším nezanedbatelným prvkem bude také množství lidí, kteří se v objektu pohybují. Měření naznačuje, že lidské tělo je přibližně stejně tlumivé jako cihlová zeď, a proto pokud by se zvažovalo použití Bluetooth systému v hustě zalidněných prostorách, jako jsou například obchodní centra, tak je vhodné brát v potaz kudy se lidé pohybují a přizpůsobit tomu umístění systémových zařízení.

6. Závěr

Z teoretické části práce vyplývá, že Bluetooth skutečně má několik vlastností, které by se k lokalizaci daly využít, nebo jsou na ni přímo cíleny. Jasným příkladem ze strany softwaru a logiky, na které by byla lokalizace založená, je kombinace direction sensing (AoA a AoD), non-connectable advertising a vhodného GATT profilu.

Hardwarově má Bluetooth také velice dobré postavení, především díky LE zařízením, kterými je schopné docílit relativně efektivní bezdrátové instalace pomocí topologie mesh, která značně rozšiřuje možnosti celého systému stran modularity, rozsahu, jednoduchosti údržby a instalace.

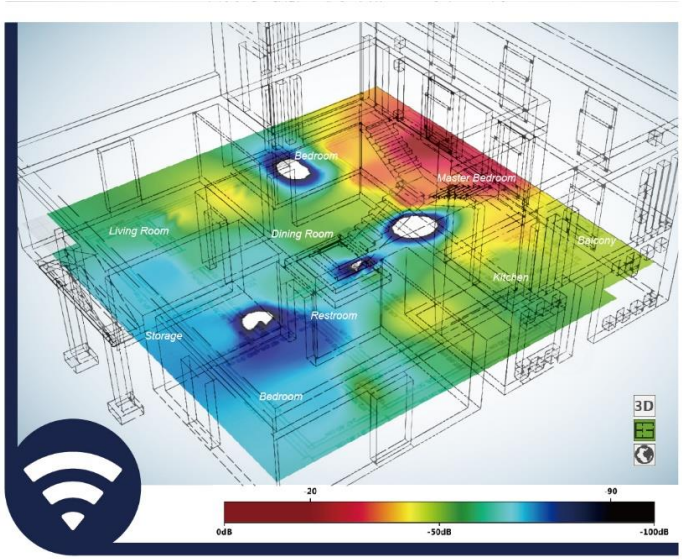
Při použití bezdrátové varianty se ovšem musí docílit optimálního kompromisu mezi hustotou sítě systémových vysílačů a jejich dosahem. Příliš hustá síť, která při lokalizaci spoléhá z většiny na proximitu, by byla zbytečně náročná na počet jednotlivých zařízení. Opačný extrém spoléhající hlavně na dopočet podle síly signálu také není žádoucí, jelikož by vysílače musely vyzařovat příliš velký výkon na to, aby mohly na baterii vydržet dostatečně dlouho. V tomto případě by také mohl nastat problém s přesností, protože jak ukazuje měření v praktické části práce, tak radiový signál a jeho síla jsou v přirozeném prostředí velmi nekonzistentní, zvlášť pokud jde o zařízení s všesměrovou anténou operující na větší vzdálenosti, kde se dá předpokládat větší množství překážek a odrazových ploch. Řešením je hybridní systém, který se pokusí využít předností obou z řešení a vzájemně potlačit jejich nevýhody.

Jeho reálnou podobou by mohla být varianta, která by využívala LE beacony operující na baterii k lokalizaci primárně pomocí proximity. Tímto prvním krokem by systém získal základní informace o poloze jako například: ve které části budovy se sledované zařízení nachází, v kolikátém je patře a které z vysílačů na tomto poschodí ho aktuálně vidí.

Tímto postupem získané určení polohy je ovšem stále dost nekonkrétní, nicméně další zpřesnění při používání samotné proximity se již stává nevýhodným, jak bylo popsáno dříve. Od tohoto bodu dále je výhodnější využít sílu signálu a z ní vycházející trilateraci, ale i ta má svá již popsaná úskalí, kterým je nutné nějakým způsobem předcházet.

Aby se dalo brát sílu signálu jako validní zdroj informací, tak je nutné provést pro každý objekt, kde se má systém provozovat, potřebná měření síly signálu. Z jejich výsledků

pak lze vytvořit tzv. heat mapu, ze které jde vyčíst přesnou polohu vysílačů a sílu signálu mezi nimi. Ilustračním příkladem takové mapy je Obrázek 14.



Obrázek 14 - Příklad heat mapy [28]

Teprve až po takovém přizpůsobení se nekonzistencím, které specifické prostředí do systému vnáší, lze použít RSSI k odhadu vzdálenosti mezi vysílačem a sledovaným zařízením. Je nutné podotknout, že ani to nemusí být vždy postačující, pokud se vezmou v úvahu prostory s výskytem velkého množství lidí jakožto proměnlivého zdroje útlumu, ale tomu již systém příliš přizpůsobit nelze.

Kombinací dvou právě popsaných zdrojů informací vzniká dobrý základ pro efektivní určení polohy. Proces vyhodnocování by nejprve postupoval přes proximitu pro zjištění obecné informace o poloze, kterou by následně aplikoval na heat mapu. Na ní by touto informací vybral subsystém vysílačů, mezi kterými se sledované zařízení zhruba nachází. Následnou trilaterací podle získaného RSSI s přihlédnutím k datům z heat mapy by byla zjištěna relativní poloha vůči vybraným vysílačům. Tím, že je pozice vysílačů předem známá, se dá poloha určit absolutně.

Pokud by se i tento systém prokázal jako nedostatečně přesný, pak by se dalo uvažovat o využití jedné z nejzajímavějších vlastností Bluetooth, která byla zmiňována v průběhu celé práce, a to je direction sensing. Ten umožňuje vysílačům zjišťovat relativní úhel sevřený mezi anténní soustavou vysílače a osou přenosu. Dosazením těchto dat do triangulačních výpočtů by se dalo dosáhnout určité míry zvýšení přesnosti. Definitivní míra přínosu by ovšem musela být zjištěna experimentálně. Bylo by také nutné vzít

v úvahu, zda takové řešení neklade příliš velké nároky na spotřebu energie, nebo finančních prostředků při pořizování systému.

V poslední fázi by se všechny dosud zmíněné informace daly sjednotit do báze dat, která by dokázala ze svého obsahu vytvořit unikátní sadu informací popisující zvolená klíčová místa v objektu. Na základě podobnosti těchto dat se pak dá odvodit u kterého z bodů se zařízení nachází. Tento princip se v současné době často využívá a nazývá se fingerprinting. V tomto případě by mohl sloužit k další minimalizaci chybné lokalizace a ke zvýšení efektivity systému.

Je také nutné vzít v potaz, že navrhované řešení není úplně vhodné pro kritické (například bezpečnostní) systémy, jelikož je velice snadno sabotovatelné jednoduchou rušičkou signálu. Je tedy na místě navrhnout i variantu, která bude takovému účelu přizpůsobená. Zde by se dala čerpat inspirace z již existujících bezdrátových systémů PZTS, které musí integritu systému detektorů a zarušení pásma kontrolovat pravidelně, aby je vůbec šlo považovat za validní bezpečnostní systém.

Závěrem se dá hodnotit, že Bluetooth skutečně má dobré předpoklady pro to se stát lokalizačním systémem ve vnitřních prostorách. Má tedy smysl se touto problematikou dále zabývat a najít její nejefektivnější podobu.

Seznam zdrojů

[1] Garmin international Ltd. *About GPS* [online] © 1996-2020 Garmin Ltd. [Cit. 23. 2. 2020] Dostupné z: https://www.garmin.com/cs-CZ/AboutGPS/

[2] GARLÍK, Bohumír. *Inteligentní Budovy (1. část): Definice, koncepce a struktura. Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2012, 3-5 [cit. 23. 2. 2020] Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Specialy/21/KnowHow//index.html#p=3

[3] TOWNSEND, K., DAVIDSON, R., CUFÍ, A., CUFÍ, C. *Getting started with Bluetooth low energy: tools and techniques for low-power networking*. Druhé vydání 2015. Sebastopol, CA. O'Reilly, 2014. ISBN 978-149-1949-511.

[4] Bluetooth SIG. *Specification of the Bluetooth system version 2.1 + EDR: Wireless connections made easy* [online]. Specification volume 0. 2007 [cit. 8. 3. 2020]. Dostupné z: https://www.bluetooth.com/specifications/archived-specifications/

[5] Bluetooth SIG. *Specification of the Bluetooth system version 3.0 + HS: Wireless connections made easy* [online]. Specification volume 0. 2009 [cit. 22. 3. 2020]. Dostupné z: https://www.bluetooth.com/specifications/archived-specifications/

[6] Bluetooth SIG. *Specification of the Bluetooth system version 4.0: Experience More* [online]. Specification volume 0. 2010 [cit. 22. 3. 2020]. Dostupné z: https://www.bluetooth.com/specifications/archived-specifications/

[7] Bluetooth SIG. *Specification of the Bluetooth system version 4.1* [online]. Specification volume 0. 2013 [cit. 22. 3. 2020]. Dostupné z: https://www.bluetooth.com/specifications/archived-specifications/

[8] Bluetooth SIG. *Specification of the Bluetooth system version 4.2* [online]. Specification volume 0. 2014 [cit. 30. 3. 2020]. Dostupné z: https://www.bluetooth.com/specifications/archived-specifications/

[9] Bluetooth SIG. *Bluetooth core specification, version 5.0* [online]. Specification volume 0. 2016 [cit. 30. 3. 2020]. Dostupné z: https://www.bluetooth.com/specifications/archived-specifications/

[10] Bluetooth SIG. *Bluetooth core specification, version 5.1* [online]. Specification volume 0. leden 2019 [cit. 12. 4. 2020]. Dostupné z: https://www.bluetooth.com/specifications/archived-specifications/

[11] Bluetooth SIG. *Bluetooth core specification, version 5.2* [online]. Specification volume 0. prosinec 2019 [cit. 12. 4. 2020]. Dostupné z: https://www.bluetooth.com/specifications/archived-specifications/

[12] REN, Kai. *10 frequently asked questions on LE isochronous channels* [online] 2.3.2020 [cit. 12. 4. 2020] Dostupné z: https://www.bluetooth.com/blog/10-frequently-asked-questions-on-le-isochronous-channels/

[13] REN, Kai. *6 Important Things to Know About LE Power Control* [online] 11.2.2020 [cit. 12. 4. 2020] Dostupné z: https://www.bluetooth.com/blog/6-important-things-to-know-about-le-power-control/

[14] VYČÍTAL, Jaroslav. *Šíření signálu bezdrátových komunikačních systémů IEEE 802.11* [online]. Brno: VUTB, 2018 [cit. 8. 6. 2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=171378.

Zdroje použité autorem [14] v citovaných částech práce:

[14.1] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., RAIDA, Z. Elektromagnetické vlny a vedení. 2. rozšířené a přepracované vydání. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 1999. ISBN 80-214–1261-5.

[14.2] MAZÁNEK,M.,PECHAČ, P., Šíření elektromagnetických vln a antény, PRAHA: Vydavatelství ČVUT, 2004

[14.3] PARSON,J.D., The Mobile Propagation Radio Channel, LONDON: John Wiley and Sons, 2000

[14.4] PECHAČ, Pavel. Šíření vln v zástavbě: modely pro plánování mobilních rádiových systémů. 2005. Praha: BEN-technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-186-1.

[15] ALLAN, A., COLEMAN, D., MISTRY, S. *Make: Bluetooth: Bluetooth: LE projects for Arduino, Raspberry Pi, and Smartphones*. První vydání. San Francisco, CA: Maker Media, 2015. ISBN 978-1-4571-8709-4.

[16] LINDH, Joakim. *Bluetooth® low energy Beacons* [online]. 2016 [cit. 27. 7. 2020]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/swra475a/swra475a.pdf?ts=1595851941375&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

[17] HERNANDEZ, D., FERNÁNDEZ-CARAMÉS, T. M., FRAGA-LAMAS, P., ESCUDERO, C. J. *Design and Practical Evaluation of a Family of Lightweight Protocols for Heterogeneous Sensing through BLE Beacons in IoT Telemetry Applications – Scientific Figure on ResearchGate* [online] 2017 [cit. 27. 7. 2020] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322092785_Design_and_Practical_Evaluation_of_a_Family_of_Lightweight_Protocols_for_Heterogeneous_Sensing_through_BLE_Beacons_in_IoT_Telemetry_Applications

[18] Texas instruments. *The Effects of Adjacent Channel Rejection and Adjacent Channel Interference on 802.11 WLAN Performance* [online]. 2003 [cit. 24. 10. 2020]. Dostupné z: https://www.ti.com/pdfs/bcg/80211_acr_wp.pdf

[19] Bluetooth SIG, *Learn about Bluetooth, Bluetooth mesh networking FAQs* [online] [2020?] [cit. 2. 9. 2020] Dostupné z: https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/topology-options/le-mesh/mesh-faq/

[20] AFANEH, Mohammad. *The Ultimate Guide to What's New in Bluetooth version 5.2* [online] 2020 [cit. 15. 9. 2020] Dostupné z: https://www.novelbits.io/bluetooth-version-5-2-le-audio/

[21] National Instruments, *Introduction to Bluetooth Device Testing, From Theory To Transmitter and Receiver Measurements* [online] 2016 [cit. 19. 10. 2020] Dostupné z: http://download.ni.com/evaluation/rf/intro_to_bluetooth_test.pdf

[22] PATTNAYAK, Tapan. *Antenna Design Guide*. Cypress Semiconductor Corporation [online] 2014-2015 [cit. 24. 10. 2020] Dostupné z: https://www.cypress.com/file/190311/download

[23] WETZKER, U., SPLITT, I., ZIMMERLING, M., RÖMER, K., BOANO, C. A. *Troubleshooting Wireless Coexistence Problems in the Industrial Internet of Things* [online] srpen 2016 [cit. 24. 10. 2020] DOI: 10.1109/CSE-EUC-DCABES.2016.167, dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/316674860_Troubleshooting_Wireless_Coexistence_Problems_in_the_Industrial_Internet_of_Things

[24] BOUCHET, Olivier. *Wireless Optical Communications, Appendix 2 The Decibel Unit (dB)* [online] 7. května 2012 [cit. 25. 10. 2020] dostupné z: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118562635.app2

[25] LINDA, Tomáš. *Elektromagnetické záření, pozitivní a negativní působení na zdraví, možnosti ochrany* [online] Praha: Univerzita Karlova, 3. lékařská fakulta, 28.11.2006 [cit. 26. 10. 2020] dostupné z: https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/5657

[26] ČTÚ, *Výpočty, fresnelova zóna* [online] [2021?] [použito 14. 1. 2021] dostupné z: http://spektrum.ctu.cz/vypocty/fresnelova-zona

[27] RANDÝSEK, Vojtěch. *Lokalizace osob v budově* [online]. Brno: VUTB, 2019 [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=197751.

[28] Allion Labs. *Wireless Heat Map Analysis* [online]. [2021?] [cit. 7. 4. 2021]. Dostupné z: https://www.allion.com/aiot/heat-map-analysis/

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Hierarchie protokolů u BLE [3]
Obrázek 2 - princip měření dopadového úhlu (AoA) [10]
Obrázek 3 - princip měření vysílacího úhlu (AoD) [10]
Obrázek 4 - Princip FSK modulace [21]
Obrázek 5 - Vizualizace nároků na přesnost modulace [11]
Obrázek 6 – příklad tvaru vyzářeného pole [22]
Obrázek 7 – vizualizace ACI [18]
Obrázek 8 - struktura BLE paketu [16]
Obrázek 9 - struktura payloadu v závislosti na profilu [17]
Obrázek 10 - graf výsledků měření na 15-0 m v dBm
Obrázek 11 - graf výsledků měření na 15-0 m v mW
Obrázek 12 – graf výsledků měření RSSI s překážkou na 5 m
Obrázek 13 - graf výsledků měření RSSI s překážkou na 2 m
Obrázek 14 - Příklad heat mapy [28]

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hodnoty měření a výpočtů pro zjištění míry vlivu FSL

Seznam rovnic

Rovnice 1 – Výpočet fázového rozdílu v signálu při přepnutí antény v průběhu přenosu
Rovnice 2 – Výpočet úhlu dopadu signálu na anténní soustavu
Rovnice 3 – Vztah pro vyjádření středních frekvencí kanálů BLE
Rovnice 4 – Výpočet ztráty odrazem v logaritmických jednotkách dB
Rovnice 5 – Výpočet zisku antény v logaritmických jednotkách dBi relativních zisku izotropní antény
Rovnice 6 – Výpočet síly signálu v logaritmických jednotkách dBm relativních 1 mW
Rovnice 7 – Výpočet odhadu ztráty výkonu při propagaci signálu volným prostorem
Rovnice 8 – Vztah vyjadřující ztrátu výkonu signálu v relativní logaritmické jednotce dB

Seznam zkratek

8DPSK – 8 differential phase shift keying

ACI – adjacent channel interference

AM – amplitudová modulace

AMP – alternate MAC/PHY

AoA – angle of arrival

AoD – angle of departure

ATT – attribute protocol

BD_ADDR – Bluetooth device address

BLE – Bluetooth low energy

BR – basic rate

CCI – co-channel interference

CPU – central processing unit

CRC – cyclic redundancy check

D/A převodník – digitál/analog převodník

dB

- dB – decibel
- dBi – decibel isotropic
- dBd – decibel dipole
- dBm – decibel miliwatt

EATT – enhanced attribute protocol

ECC – error correction coding

EDR – enhanced data rate

EM – elektro magnetické

FM – frekvenční modulace

FSK – frequency shift keying

FSL – free space loss

F.Z. – Fresnelova zóna

GAP – generic access profile

GATT – generic attribute profile

GFSK – gaussian frequency shift keying

HCI – host controller interface

HS – high speed

HW – hardware

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT – internet of things, internet věcí

IQ sample – in-phase and quadrature-phase sample

IT – informační technologie

L2CAP – Logical Link Control and Adaptation Protocol

LAP – lower address part

LE – low energy

LE PHY – low energy physical layer

- LE 2M PHY – low energy 2 megasymbol physical layer
- LE 1M PHY – low energy 1 megasymbol physical layer

LL – link layer

LMP – link manager protocol

LOS – line of sight

LTE – long term evolution

MAC – medium access control

Msym – megasymbol

NAP – non-significant address part

OUI – organizationally unique identifier

PHY – physical layer

RFCOMM – radio frequency communication

RSSI – relative signal strength indication

SAM – slot availability mask

SDP – service discovery protocol

SIG – special interest group (kontext: Bluetooth SIG)

SMP – security manager protocol

UAP – upper address part

UI – umělá inteligence

π/4DQPSK – pi/4 rotated differential quaternary phase shift keying

Seznam příloh:

1 – skript použitý k měření se stručným popisem jeho fungování

2 – úplná tabulka výsledků měření FSL

3 – tabulka výsledků měření vlivu materiálu na 5 m

4 – tabulka výsledků měření vlivu materiálu na 2 m

Přílohy

Příloha 1 - Skript použitý k měření se stručným popisem fungování

```
#!/bin/bash
sudo timeout 10s hcitool lescan
echo "done scanning"
while read -r line ; do
    #teplate RSSI: -xx dBm
    echo "$line" | grep "RSSI:" | cut -b 7-9
    echo "$line" | grep "RSSI:" | cut -b 7-9 >> $1_ble_mon_log.csv
done < <(sudo btmon | grep "LE Address: E0:D0:83:FA:80:8A" -A 1)
```

Tento skript bere na vstup záznamy tvořené nástrojem btmon (zkrácený název pro Bluetooth monitor), který vypisuje veškeré úkony, které Bluetooth jádro v daném zařízení provádí. Z těchto záznamů jsou vyfiltrovány ty, které obsahují string "LE Address: E0:D0:83:FA:80:8A", čímž se vyberou ty, které popisují LE komunikaci s konkrétním zařízením identifikovaným příslušnou adresou. Z těchto záznamů se vybere část, která je o řádek níže než dříve uvedený charakteristický string. Tento konkrétní řádek vždy obsahuje část, která se dá charakterizovat takto: „RSSI: -xx dBm“. V této reprezentaci písmena x představují čísla tvořící hodnotu RSSI. Z takto získaného řádku se dále vyřízne pouze hodnota RSSI, která se uloží do tabulkového souboru a zároveň vypíše do příkazového řádku, aby bylo vidět, že jsou hodnoty aktuálně získávány. Toto vše probíhá v nekonečném cyklu, který je nutný ukončit ručně.

Aby to vše mohlo fungovat, tak je nutné aktivovat LE jádro, čehož se dosahuje druhým řádkem skriptu, který na 10 vteřin spustí sken okolí explicitně pomocí LE jádra. Díky tomu se pak ve výpisu nástroje btmon začnou objevovat výpisy i z LE jádra, a ne pouze z klasického Bluetooth. Po spuštění tohoto skriptu na jednom z propojených zařízení je také nutné na tom druhém spustit vyhledávání zařízení v okolí, aby vysílalo LE advertising pakety, které pak btmon zachytí a vypíše.

Příloha 2 - Úplná tabulka výsledků měření FSL

vzdálenost [m]	počet vzorků	průměrné RSSI [dBm]	maximum [dBm]	minimum [dBm]	průměrná abs. odchylka [dBm]	rozptyl [dBm^2]	Přijatý výkon signálu [mW]	FSL [dB]	součet teoretického FSL a RSSI [dBm]
0	40	-72,90	-66,00	-80,00	4,00	18,59	5,13E-08	-	-
1	40	-77,10	-73,00	-81,00	2,38	7,69	1,95E-08	40,04599702	-37,05400298
2	40	-77,65	-75,00	-84,00	1,42	4,03	1,72E-08	46,06659693	-31,58340307
3	40	-86,40	-77,00	-92,00	4,46	24,04	2,29E-09	49,58842211	-36,81157789
4	40	-82,70	-80,00	-89,00	1,95	6,61	5,37E-09	52,08719685	-30,61280315
5	40	-84,35	-79,00	-88,00	1,69	4,63	3,67E-09	54,02539711	-30,32460289
6	40	-86,05	-83,00	-94,00	1,38	5,35	2,48E-09	55,60902203	-30,44097797
7	40	-86,15	-81,00	-95,00	3,57	18,13	2,43E-09	56,94795782	-29,20204218
8	40	-87,00	-81,00	-93,00	2,50	12,50	2,00E-09	58,10779676	-28,89220324
9	40	-89,40	-86,00	-94,00	1,52	3,74	1,15E-09	59,13084721	-30,26915279
10	40	-93,40	-90,00	-96,00	1,18	2,24	4,57E-10	60,04599702	-33,35400298
11	40	-95,50	-92,00	-99,00	1,50	3,45	2,82E-10	60,87385072	-34,62614928
12	40	-94,40	-91,00	-97,00	1,76	3,94	3,63E-10	61,62962194	-32,77037806
13	40	-91,35	-86,00	-97,00	3,09	11,43	7,33E-10	62,32486407	-29,02513593
14	40	-89,60	-85,00	-93,00	2,08	5,84	1,10E-09	62,96855773	-26,63144227
15	40	-91,40	-87,00	-97,00	3,40	13,24	7,24E-10	63,5678222	-27,8321778

Příloha 3 - Tabulka výsledků měření vlivu materiálu na 5 m

materiál	vzdálenost [m]	počet vzorků	průměrné RSSI [dBm]	maximum [dBm]	minimum [dBm]	průměrná abs. odchylka [dBm]	rozptyl [dBm^2]
Bez překážky	5	40	-84,35	-79	-88	1,69	4,63
Dřevo	5	81	-87,72	-77	-98	4,60	31,04
Cihlová zeď	5	40	-92,35	-81	-98	2,72	13,03
Lidské tělo	5	162	-84,01	-77	-96	3,63	20,38
Voda	5	122	-84,11	-76	-94	3,15	14,60
Hliníková folie	5	162	-84,25	-74	-93	2,02	7,20

Příloha 4 - Tabulka výsledků měření vlivu materiálu na 2 m

materiál	vzdálenost [m]	počet vzorků	průměrné RSSI [dBm]	maximum [dBm]	minimum [dBm]	průměrná abs. odchylka [dBm]	rozptyl [dBm^2]
Bez překážky	2	40	-77,15	-70	-93	3,89	27,38
Dřevo	2	40	-78,65	-68	-96	4,65	36,33
Cihlová zeď	2	40	-81,25	-73	-92	4,6	29,29
Lidské tělo	2	40	-81,35	-74	-94	3,65	23,63
Voda	2	40	-82,8	-74	-89	3,78	21,36
Hliníková folie	2	40	-89,3	-77	-98	3,8	24,71