



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

LOKALIZAČNÍ SYSTÉM

LOCALIZATION SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miloslav Chlad

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Miloslav Chlad

ID: 145422

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Lokalizační systém

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace funkčního systému lokalizace osob nebo věcí pomocí mobilní aplikace a lokalizační jednotky. Programové a obvodové řešení bude provedeno s ohledem na minimální spotřebu energie a také minimální rozměry. Lokalizační jednotka bude napájena z baterie a ostatní komponenty budou napájeny z elektrorozvodné sítě. V rámci diplomové práce budou provedena a zpracována měření provozních parametrů a bude proveden test provozu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Levek

Konzultant:

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

ABSTRAKT

Záměrem diplomové práce je najít nejlepší řešení k nalezení ztracených drobností. Popsané řešení je založeno na technologii GPS pro lokalizaci vně budov a Bluetooth Low Energy pro vnitřní prostory. Uživatel navrženého systému bude schopen pomocí mobilní aplikace nalézt své ztracené předměty.

KLÍČOVÁ SLOVA

GPS, lokalizace, Bluetooth Low Energy, RSSI

ABSTRACT

The intent of this master's thesis is to look for the best solution of finding lost items of everyday use. Described solution is based on GPS for outdoor and Bluetooth Low Energy for indoor localization. User of this system will be able to find his/her lost items using smartphone application.

KEY WORDS

GPS, localization, Bluetooth Low Energy, RSSI

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHLAD, M. *Lokalizační systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 64s. Vedoucí diplomové práce byl Ing. Vladimír Levek

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „**Lokalizační systém**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 22.května 2017

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimírovi Levkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 22.května 2017

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

Úvod.....	8
1 Principy lokalizačních technik	9
1.1 Nejbližší přijímač (<i>Cell of origin</i>)	9
1.2 Techniky založené na vzdálenosti	10
1.2.1 Čas přijetí (<i>Time of Arrival</i>).....	10
1.2.2 Rozdíl času přijetí (<i>Time difference of Arrival</i>).....	11
1.2.3 Síla přijatého signálu (<i>RSSI</i>)	12
1.3 Techniky založené na úhlu příchozího signálu.....	13
1.3.1 Úhel přijetí (<i>Angle of Arrival</i>).....	13
2 Lokalizace vně budov	15
2.1 GPS	15
2.1.1 Architektura GPS	15
2.1.2 GPS signály.....	17
2.1.3 Navigační zpráva.....	17
2.2 GLONASS	18
2.3 Galileo	19
2.4 Celulární systém.....	20
2.4.1 Technika CI (<i>Cell Identity</i>)	20
2.4.2 Technika TA (<i>Timing Advance</i>).....	21
3 Lokalizace uvnitř budov	22
3.1 Světlo	22
3.2 MEMS v chytrém telefonu.....	22
3.3 Magnetické pole	22
3.4 RFID	23
3.5 Wi-Fi	23
3.6 UWB	24
3.7 Bluetooth.....	24
3.7.1 Architektura Bluetooth.....	25
3.7.2 Topologie BLE.....	25
4 Návrh a realizace systému	28
4.1 Koncept lokalizace uvnitř budov	28

4.2 Koncept lokalizace vně budov	29
4.3 nRF51822.....	29
4.4 Tag	30
4.4.1 ADXL362	31
4.4.2 Layout	32
4.4.3 Firmware	32
4.4.4 Mechanické provedení	34
4.5 Anchor.....	34
4.5.1 RN1723.....	35
4.5.2 Layout	36
4.5.3 Firmware	36
4.5.4 Mechanické provedení	37
4.6 Monitor	38
4.6.1 Grafické rozhraní	40
4.7 See(K)	42
4.7.1 Grafické rozhraní	43
5 Testování.....	46
Závěr	49
Literatura.....	50
Seznam zkratk	52
Seznam obrázků	53
Seznam tabulek	54
Seznam příloh	55

Úvod

Cílem diplomové práce je návrh a realizace lokalizačního systému složeného z lokalizační jednotky a uživatelské aplikace založené na mobilní platformě. Existuje celá řada lokalizačních systémů. Některé z nich budou v následujících kapitolách popsány. Dělí se na dvě hlavní skupiny a to systémy pro lokalizace uvnitř a vně budov, v některých případech se tyto dvě skupiny překrývají.

Úvodní kapitola se věnuje základním principům užívaným ve všech lokalizačních systémech k určení přesné polohy lokalizovaného zařízení. Následuje popis několika praktických technologií použitelných pro řešení diplomové práce. V další kapitole je navržen koncept lokalizačního systému funkčního jak vně, tak uvnitř budov využívajícího kombinace technologií GPS a Bluetooth Low Energy. Celý systém je složen ze čtyř samostatných částí, jsou jimi: lokalizační jednotka, stacionární přijímač, TCP server a uživatelská aplikace pro chytré telefony nebo tablety. Následuje popis návrhu, realizace a oživení všech dílčích bloků systému.

Lokalizační jednotka je mobilní zařízení minimálních rozměrů. Je bateriově napájena, proto při jejím návrhu musí být kladen co největší důraz na energetickou nenáročnost. Stacionární přijímač slouží k zpřesnění lokalizace v uživatelem často obývaných prostorech. Uživatelská aplikace je navržena k snadnému nalezení lokalizační jednotky.

Systém lze použít například i pro sledování toku materiálu v továrnách. Ale primárně je navržen pro hledání ztracených drobností, jako jsou klíče, peněženka nebo batoh.

1 Principy lokalizačních technik

Kapitola popisuje základní principy založené na rádiových vlnách, které jsou použity ve velké většině lokalizačních zařízení. Jednotlivé techniky se liší přístupem k řešení problému zjištění pozice mobilního zařízení v cílové sledované oblasti.

Základní techniky určují polohu v závislosti na:

- určení nejbližšího přijímače (*Cell of origin*),
- vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem,
- úhlu příchozího signálu.

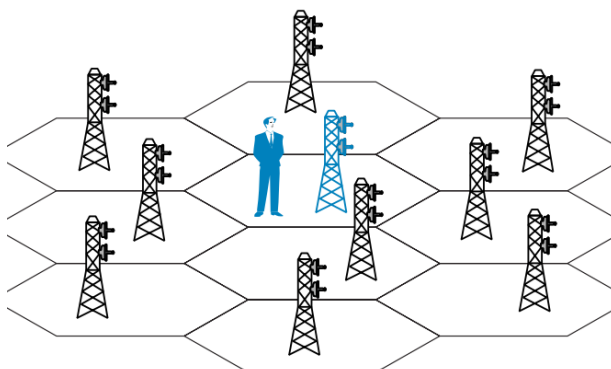
Konstruktor má možnost vybrat jednu z možností vhodnou pro danou situaci nebo použít jejich kombinaci pro případ užití lokalizačního zařízení v různých podmínkách s velice odlišnou charakteristikou šíření elektromagnetického signálu [1].

1.1 Nejbližší přijímač (*Cell of origin*)

Je to jeden z nejjednodušších mechanismů pro určení přibližné polohy daného zařízení. Ve své nejjednodušší formě se nepokouší přesně určit polohu lokalizačního zařízení. Pouze indikuje přijímač, ke kterému je, či byla lokalizační jednotka naposled připojena.

Největší výhodou nejbližšího přijímače je jeho nenáročnost, protože nevyžaduje aplikování komplikovaných algoritmů a i díky tomu je lokalizace velice rychlá. Je poměrně snadno aplikovatelná na většinu již zavedených sítí. Nevýhodou je její nepřesnost. Obzvláště uvnitř budov v nehomogenním prostředí se kvůli rušení a odrazům často stává, že se lokalizační jednotka nepřihlásí k fyzicky nejbližšímu přijímači.

Výrazné zpřesnění přináší zavedení techniky nejvyššího indikátoru síly přijatého signálu tzv. RSSI (*received signal strength indicator*). V tomto případě je poloha zařízení určena podle přijímače, který získá s lokalizační jednotkou nejvyšší hodnotu RSSI. Díky tomu se výrazně zvyšuje pravděpodobnost určení fyzicky nejbližšího přijímače. I přesto nepatří technika nejbližšího přijímače mezi nejpřesnější a je vhodná jen pro nekritické situace [1].



Obr. 1: Nejbližší přijímač [1]

1.2 Techniky založené na vzdálenosti

Spočívají v určení vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem. Každá z nich využívá jiný princip. Je-li známá vzdálenost mezi lokalizační jednotkou a několika přijímači je možné určit její polohu.

1.2.1 Čas příjetí (*Time of Arrival*)

První technika této kapitoly je založena na celkem jednoduchém principu. Je-li určen čas, kdy lokalizační zařízení vyslalo zprávu stacionárnímu přijímači a zároveň čas, kdy přijímač zprávu od lokalizačního zařízení přijal, lze snadno spočítat vzdálenost mezi těmito body. Vyžaduje velice přesné časování. Pro její správné použití je třeba zajistit co nejpřesnější časovou synchronizaci, jak přijímačů, tak lokalizačních jednotek.

Díky znalosti rychlosti šíření signálu a přesnému měření času vyslání a přijetí zprávy je možné spočítat vzdálenost mezi lokalizační jednotkou a přijímačem.

$$D = c * \Delta t \quad (1)$$

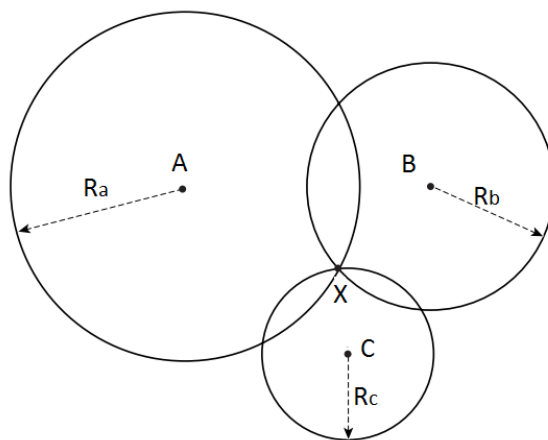
Kde:

D = vzdálenost mezi lokalizační jednotkou a stacionárním přijímačem,

c = rychlost šíření elektromagnetického signálu,

Δt = časový rozdíl mezi vyslání a přijetím signálu.

Po vykreslení kružnic se středy v jednotlivých přijímačích a poloměry spočítaných vzdáleností je určena množina bodů s pravděpodobnou polohou lokalizační jednotky. Při přijetí informací o jednom lokalizačním zařízení ze dvou přijímačů jsou získány dva průsečíky kružnic. V jednom z nich se lokalizační jednotka s pravděpodobností 50 % nachází. V případě informací ze tří přijímačů dochází k jednoznačnému určení polohy. Kružnice se protnou v jediném bodě. Zde se nachází hledaná lokalizační jednotka.



Obr. 2: Trilaterace [1]

Na obr. 2 je naznačen princip popisované techniky trilaterace. Při použití přijímačů A, B, C je změřen čas přijetí zprávy od lokalizační jednotky. Pomocí získaného času a známé rychlosti šíření elektromagnetického signálu lze spočítat vzdálenost lokalizační jednotky od jednotlivých přijímačů (R_a , R_b , R_c). Kružnice s poloměrem spočítané vzdálenosti se protnou v bodě X. V nejbližším okolí tohoto bodu se nachází lokalizační jednotka. Některé situace nabízejí více jak jedno řešení hledaného bodu X, pak je nutné do systému připojit další přijímače.

Technika času přijetí se využívá jak pro rovinné prostory, tak pro trojrozměrné určování polohy. Pro trojrozměrnou lokalizaci jsou nezbytné kulové modely namísto kružnicových.

Největší nevýhodou času přijetí je nutnost přesné časové synchronizace. Při vysokých rychlostech šíření elektromagnetického signálu může i malá časová odchylka vyústit v obrovskou nepřesnost lokalizace. Např.: Časový rozdíl 100 ns znamená změnu vzdálenosti o 30 m. Velký problém nastává v různorodém prostředí, kde díky odrazům, interferencím a šumu může být naměřen pokaždé jiný čas.

Nejznámějším zástupcem času přijetí je systém GPS, který používá pro časovou synchronizaci přesné atomové hodiny [1].

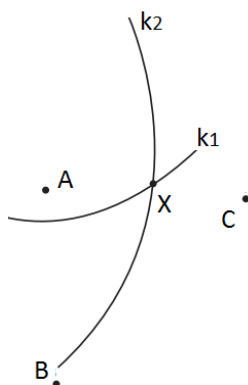
1.2.2 Rozdíl času přijetí (*Time difference of Arrival*)

Při použití rozdílu času přijetí vyšle lokalizační jednotka v neznámém čase zprávu, kterou stacionární přijímače přijmou v různých časech. Díky tomu není nutná časová synchronizace na straně lokalizační jednotky, ale stále přetrvává přesné časování přijímačů.

Je založena na matematickém konceptu hyperbolické laterace. Chceme-li ji použít, je zapotřebí minimálně třech časově synchronizovaných přijímačů.

$$TD_{oA_{B-A}} = |T_B - T_A| = k_1 \quad (2)$$

$$TD_{oA_{C-A}} = |T_C - T_A| = k_2 \quad (3)$$



Obr. 3: Hyperbolická laterace [1]

Bod X na obr. 3 vyšle zprávu, která dorazí k bodu A v čase T_A a k bodu B v čase T_B . Rozdíl času přijetí zprávy je spočítán mezi přijímači A a B jako pozitivní konstanta k .

Pomocí konstanty k je možné mezi body A a B zkonstruovat hyperbolu. Tato hyperbola představuje množinu bodů, kde by se mohla nacházet hledaná lokalizační jednotka. Stejný postup je zopakován pro body A a C . Určením průsečíku hyperbol polohu jednoznačně stanovíme. Vyskytne-li se případ, ve kterém se hyperboly neprotínou, je třeba použít více přijímačů.

Největší nevýhodou rozdílu času přijetí je podobně jako u předešlé techniky časová synchronizace. Často se používá referenční zdroj hodin, který všem přijímačům v určitých intervalech zasílá přesný čas, podle kterého se přijímače synchronizují. Referenční zdroj hodin ovšem zanáší do systému další zařízení představující možný zdroj chyb. Tento problém lze obejít v případě, že přijímače mají i schopnost data vysílat. Pak může být využita periodická výměna paketů s časovou informací mezi jednotlivými přijímači. Díky informacím z časového paketu se přijímače synchronizují i bez referenčního zdroje času.

Mezi technikami rozdílu času přijetí a času přijetí není moc rozdílů i proto jsou jejich výsledky velmi podobné. Jsou vhodné zejména do otevřených venkovních oblastí s minimem rušení, šumu a odrazů. I když prokázaly své uplatnění i na stadionech nebo ve velkých budovách s vysokými stropy [1].

1.2.3 Síla přijatého signálu (RSSI)

Předcházející techniky získávají přesnou polohu z časové informace. Kromě časového měření lze ovšem použít i indikátor síly přijatého signálu. Tento přístup vyžaduje měření síly přijatého signálu lokalizační jednotkou nebo stacionárními přijímači. Při znalosti určitých parametrů systému lze spočítat vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem.

$$PL = PL_{1METER} + 10\log(d^n) + s \quad (4)$$

Kde:

PL = celkový útlum mezi přijímačem a vysílačem v dB,

PL_{1METER} = útlum signálu na jeden metr,

d = vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem v metrech,

n = exponent útlumu, konstanta daného prostředí,

s = standartní odchylka způsobená šumem v okolním prostředí.

Ze známého útlumu lze za pomoci několika dalších parametrů spočítat vzdálenost d mezi přijímačem a vysílačem. Jak demonstruje následující rovnice.

$$d = 10 * \frac{TX_{PWR} - RX_{PWR} - LOSS_{TX} + Gain_{TX} - PL_{1meter} + s + Gain_{RX} - LOSS_{RX}}{10n} \quad (5)$$

Kde:

RX_{PWR} = síla přijatého signálu v dB,

TX_{PWR} = výstupní výkon vysílače v dB,

$LOSS_{TX}$ = součet všech ztrát na straně vysílače v dB,

$Gain_{TX}$ = zisk antény vysílače v dBi,

$Loss_{RX}$ = součet všech ztrát na straně přijímače v dB,

$Gain_{RX}$ = zisk antény přijímače v dBi.

Všechny proměnné nabývají kladných hodnot. Po vyřešení rovnice je možné použít parametr d jako poloměr kružnice se středem v přijímači. Kružnice představuje množinu všech bodů, kde by se mohl nacházet vysílač. Při použití minimálně tří přijímačů je určena přesná poloha vysílače.

Sílu přijatého signálu lze získávat ze dvou zdrojů. Ze stacionárního přijímače nebo z vysílače. Rádiové přijímače odlišných výrobců mohou používat různý způsob pro získávání indikátoru síly přijatého signálu, to vnáší do systému nežádoucí snížení přesnosti určení polohy lokalizační jednotky. Kvůli tomu je vhodné získat hodnotu síly přijatého signálu na straně přijímačů, protože to bývají zařízení s konzistentními parametry.

Výhodou této metody je jednoduchost a nízká cena. Pro její zavedení není potřeba žádný speciální hardware na straně přijímače ani na straně vysílače. Právě to dělá tuto techniku velice populární.

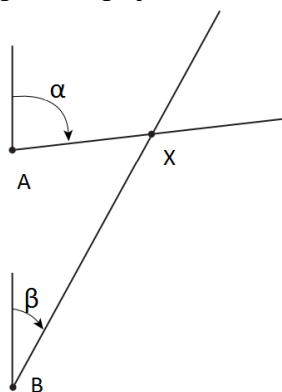
Největším problémem je její přesnost, která se vlivem nehomogenity šíření signálu v anizotropním prostředí výrazně snižuje. Kvůli tomu není vždy možné spoléhat se na kružnicové modely, až na speciální případy, kdy je zajištěn mezi přijímačem a vysílačem vždy přímý spoj bez překážek. K dosažení vyšší přesnosti mezi sebou lze techniky kombinovat nebo brát v potaz různorodost prostředí a odrazů. To ovšem jinak cenově výhodný systém prodražuje [1].

1.3 Techniky založené na úhlu příchozího signálu

Techniky založené na úhlu příchozího signálu spočívají v určení směru, ze kterého přichází nejsilnější signál. K jejich realizaci je zapotřebí směrových antén.

1.3.1 Úhel přijetí (*Angle of Arrival*)

Úhel přijetí určuje polohu lokalizační jednotky pomocí úhlu, ze kterého stacionární přijímač přijme data od vysílače. K získání přesné polohy lokalizační jednotky je zapotřebí minimálně dvou přijímačů. S vyšším počtem přijímačů stoupá i přesnost lokalizace.



Obr. 4: Úhel přijetí [1]

Na obr. 4 jsou zobrazeny stacionární přijímače A a B , které pomocí úhlu přijetí signálu (α, β) určují polohu lokalizační jednotky v bodě X . V ideálním případě jsou na přijímačích použity mechanicky pohyblivé směrové antény. Antény se natáčejí do různých směrů a definují úhel, pod kterým je síla přijatého signálu nejsilnější. Pro komerční užití je vyvinut systém bez pohyblivých antén, který není tak náročný na údržbu. Tvoří ho pole směrových antén, které jsou jednotlivě elektronicky připojovány k určení směru s nejvyšší silou přijatého signálu.

Úhel přijetí je přesný v otevřených prostorách. I proto se používá k navigaci letadel. Pro zarušená prostředí s mnoha odrazy, jako jsou hustě zabydlené oblasti, je téměř nepoužitelný [1].

2 Lokalizace vně budov

Tato kapitola se zabývá systémy schopnými určit polohu zařízení umístěných v otevřeném prostoru. Některé z těchto systémů jsou schopny i lokalizace uvnitř budov.

2.1 GPS

Systém GPS (*Global Positioning System*) je zřejmě nejznámější a nejpoužívanější lokalizační systém používaný v otevřených prostranstvích. Poskytuje spolehlivou lokalizaci, navigaci a časování jak civilním tak vojenským uživatelům po celém světě. GPS byl vybudován a je spravován vládou Spojených Států Amerických a je volně dostupný všem uživatelům s GPS přijímačem.

GPS přijímač počítá svou pozici za použití satelitní technologie a trilaterálního principu. Přijímač měří vzdálenost od 3 známých pozic. Jsou jimi 3 satelitní družice obíhající na oběžné dráze. Trilaterace hledá průsečík 3 koulí se středem v každém z viditelných satelitů. V tomto bodě se s nejvyšší pravděpodobností nachází GPS přijímač.

V roce 1978 byl vypuštěn první satelit. Až v prosinci roku 1993 bylo ohlášeno spuštění funkčního systému v úvodním režimu s 24 satelity na oběžné dráze. Plná funkčnost systému byla ohlášena v červnu 1995.

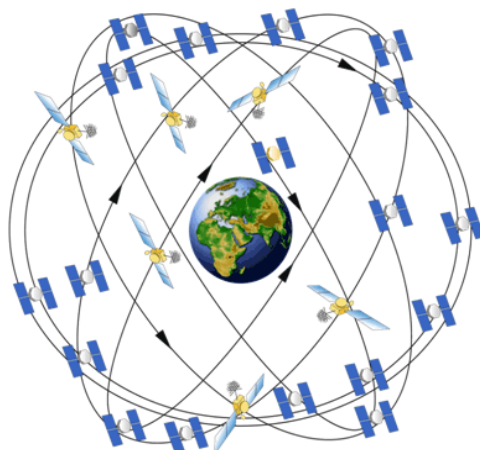
Během devadesátých let minulého století fungoval systém GPS ve dvou možných režimech. Standartní lokalizační služba (SPS) a přesná lokalizační služba (PPS). První režim byl dostupný veřejnosti, ale pro použití precizní lokalizační služby bylo zapotřebí povolení od vlády Spojených Států Amerických. Pro běžné uživatele bez povolení byla přesná lokalizační služba zašifrována a přesnost standartní lokalizační služby byla uměle snižována. Ale tento rozdíl byl 1. Května 2000 zrušen. Díky tomu mají i běžní uživatelé standartní lokalizační služby přístup k přesné lokalizaci. V případě války nebo jiných okolností má vláda Spojených Států Amerických možnost opět uměle snížit přesnost standartní lokalizační služby [3].

2.1.1 Architektura GPS

Architektura GPS se dělí na tři základní segmenty. Těmi jsou: vesmírný segment, pozemní segment a uživatelský segment.

Hlavní funkcí vesmírného segmentu je vysílat rádiové navigační signály, ukládat a přeposílat navigační zprávu od kontrolního segmentu. Tyto přenosy jsou kontrolovány vysoce stabilními atomovými hodinami v satelitech. Vesmírný segment je budován dostatkem satelitů v takové konstelaci, která zajišťuje příjem nejméně 4 dostupných satelitů, v jakýkoli čas na jakémkoli místě planety země, s elevační maskou alespoň 15°. V 6 orbitálních rovinách se sklonem 55° stupňů ve vztahu k rovníku obíhá 24 satelitů GPS zeměkouli. Satelity obíhají ve výšce zhruba 20200 km nad zemským povrchem. Perioda oběhu Země satelitem GPS je 11 hodin a 58 minut, takže se bude nacházet na stejném místě nad povrchem Země přesně za 23 hodin a 56 minut díky rotaci Země. V každé

z orbitálních rovin obíhají 4 satelity a je v ní připravené místo pro jeden další. Díky tomu je systém GPS schopný pracovat až se 30 satelity na oběžné dráze.



Obr. 5: *Konstelace GPS satelitů [3]*

Pozemní segment je často nazýván také kontrolním segmentem, protože je zodpovědný za správnou funkčnost GPS systému. Hlavními úkoly kontrolního segmentu je monitorování a kontrola stavu satelitů a parametrů jejich oběžné dráhy, vyhodnocení problémů satelitů a případné uvedení do provozu záložních satelitů. Tento segment se skládá ze sítě kontrolních stanic, pozemních antén, hlavní kontrolní stanice a její záloh. Hlavní kontrolní stanice zpracovává data přijatá kontrolními stanicemi. Z těchto dat mimo jiné počítá trajektorii satelitu na orbitu, chybu jeho časování a vytváří navigační zprávu. Tyto korekce a navigační zprávy jsou pak odeslány do satelitů z pozemních antén, které jsou umístěny ve 4 monitorovacích stanicích.

Hlavní kontrolní stanice je umístěna v Colorado Springs. Je to centrální uzel systému konstelace GPS satelitů, za kterou je odpovědná. Kontrolních stanic bylo původně jen 5, ale v zájmu zpřesňování systému se jejich počet zvýšil na aktuálních 17. Ve stávajícím rozpoložení může každý satelit komunikovat alespoň se 3 kontrolními stanicemi. Všechny tyto stanice jsou vybaveny atomovými hodinami a GPS přijímači, které neustále sbírají data ze všech satelitů, které jsou momentálně na dohled. Tato data jsou pak přeposlána do hlavní kontrolní stanice. Pozemní antény umístěné ve 4 kontrolních stanicích posílají korekční data jednotlivým satelitům. Je možné poslat až 3 zprávy každému satelitu denně.

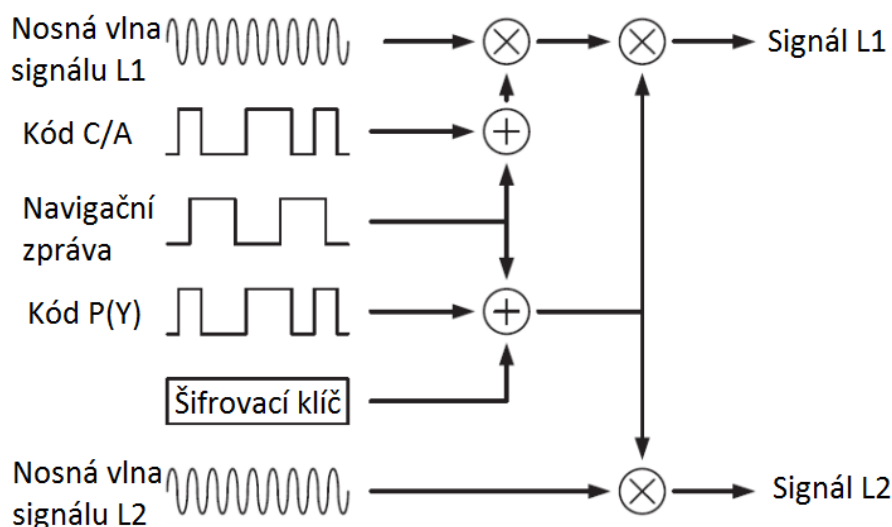
Uživatelský segment je tvořen GPS přijímačem, který řeší navigační rovnice. Pomocí nich určuje souřadnice a velice přesný čas. Lokalizace pomocí systému GPS je řešena odečítáním vzdálenosti přijímače od satelitů. GPS přijímač dekóduje navigační zprávu a pomocí ní určí pozici uživatele. Navigační zpráva obsahuje: efemeridy (potřebné k spočítání polohy satelitu), časové parametry, ionosférický model. Ionosféra může mít zásadní vliv na přesnost lokalizace kvůli své rotaci a zpoždění.

Uživatelské aplikace jsou rozšířeny téměř do všech sektorů. V zemědělství mohou navádět traktory nebo mapovat pole. Určují přesnou polohu letadel po celou dobu jejich letu. Předchází nehodám a zlepšují dopravní tok na železnicích [3,4].

2.1.2 GPS signály

Původně existovaly jen dva signály. Signál C/A pro standartní lokalizační službu a signál P(Y) pro přesnou lokalizační službu. Jsou vysílány na frekvencích $L1 = 1475,42 \text{ MHz}$ a $L2 = 1227,6 \text{ MHz}$. Obě tyto frekvence jsou násobkem standardu atomových hodin, jehož frekvence je $f = 10,23 \text{ MHz}$.

Satelity vysílají na stejné frekvenci, takže je možné je identifikovat pouze podle unikátního kódu satelitu. Civilní signál C/A moduluje pouze nosnou složku $L1$, kdežto vojenský signál P(Y) moduluje jak $L1$, tak $L2$. Navigační data jsou přičtena pomocí logické funkce exkluzivního součtu.



Obr. 6: Modulační schéma GPS[5]

Kód C/A má délku 1023 bitů, je vysílán na frekvenci 1,023 Mb/s, a jeho perioda je přesně 1ms. Je z rodiny takzvaných zlatých kódů. To znamená, že má vynikající korelační vlastnosti.

Pro přesné polohovací systémy mohou uživatelé, kteří mají oprávnění od vlády Spojených Států Amerických použít i zašifrovaný P(Y) kód. Vhodná délka a komplexnost P kódu zajišťuje jeho výborné korelační vlastnosti a výrazně zvyšuje přesnost určení polohy. Na druhou stranu se kvůli jeho komplexnosti s P(Y) kódem těžko synchronizuje. Potřebná synchronizace může být dosažena díky použití C/A kódu, který vysílá informace o začátku P(Y) kódu. Samozřejmě jsou tyto informace dostupné jen pro autorizované uživatele. Signály C/A a P(Y) byly dostupné už od počátků GPS systému. Modernizace celého systému zahrnuje i představování nových signálů, jak pro civilní užití, tak pro vojenské. Pro civilní užití jsou vyvíjeny signály L1C, L2C a L5. Pro vojenské potřeby je to nový signál se jménem M [3].

2.1.3 Navigační zpráva

Každý satelit přijímá z pozemních antén navigační data, která jsou poslána zpět uživateli pomocí navigační zprávy. Tato zpráva nese nezbytné informace k lokalizaci.

Obsahuje efemeridy (k získání polohy satelitu s dostatečnou přesností), časové parametry, stav satelitu, ionosférický parametrický model a almanach (potřebný k zjištění polohy ostatních satelitů v konstelaci). Efemeridy a časové parametry jsou většinou obnovovány každé dvě hodiny, almanach je obnovován alespoň každých 6 dní.

Kromě původní navigační zprávy L1 C/A byli představeny i další modernizované zprávy, a to: L2-CNAV, CNAV-2, L5-CNAV a MNAV. Modernizované navigační zprávy vysílají stejný obsah jako původní navigační zpráva ale jsou robustnější. Všechny navigační zprávy mimo MNAV jsou stvořeny pro civilní užití. MNAV byla navržena pro armádu, díky tomu obsahuje vylepšení bezpečnosti i robustnosti.

Navigační zpráva L1 C/A je modulována na obou nosných frekvencích a vysílána bitovou rychlostí 50 bit/s. Zpráva je rozdělena do 25 rámců. Rámec je složen z 10 podrámců a podrámeček z 10 slov dlouhých 30 bitů. Odeslání kompletní navigační zprávy touto rychlostí trvá 12,5 minut. Každý podrámeček začíná slovem TLM, které je potřebné pro synchronizaci. Dalším vyslaným slovem je HOW, je nezbytné pro časové informace. První podrámeček obsahuje informace o časování a korekci hodin satelitu. Zároveň obsahuje data o aktuálním stavu satelitu. Druhý a třetí podrámeček je složen z efemerid satelitu. Čtvrtý podrámeček poskytuje parametry ionosférického modelu a část almanachu. Pátý podrámeček obsahuje data almanachu a současnou konstelaci. To umožňuje rychle identifikovat satelit, ze kterého signál přichází. Podrámečky 1, 2 a 3 jsou vysílány v každém rámci a jsou opakovány každých 30 sekund. Obsah podrámeček 4 a 5 je společný pro všechny satelity, proto je možné získat data almanachu z jakéhokoli dostupného satelitu na oběžné dráze [3].

2.2 GLONASS

GLONASS je ruská verze globálního satelitního navigačního systému, který poskytuje spolehlivé lokalizační, navigační a časové služby volně dostupné všem uživatelům. Příjímáče GLONASS počítají svou polohu v referenčním systému pomocí satelitních technologií a trilaterace. Je alternativou globálního satelitního navigačního systému jako americké GPS, čínské BeiDou nebo plánovaný systém Galileo Evropské Unie.

První sovětský navigační systém Cicada vypustil svůj první satelit na oběžnou dráhu v roce 1967. Byl to začátek sovětského nízkoorbitového navigačního systému. Čtyři satelity umístěné na kruhových orbitech v nadmořské výšce 1000 km, s inklinací 83°. Tento navigační systém poskytoval přesnost určení polohy s odchylkou několika stovek metrů. Nicméně nároky na satelitní navigační systém se stále zvyšovaly a s rostoucími požadavky potencionálních uživatelů bylo jasné, že nízkoorbitová navigace nebude stačit požadavkům.

Roku 1982 byly provedeny první letové testy navigačního systému GLONASS ve výšce 20 000 km. Po rozpadu Sovětského Svazu v roce 1991 ve vývoji satelitního navigačního systému pokračovala Ruská Federace, která systém GLONASS uvedla do provozu v roce 1995. Ihned po dokončení se systém bohužel dostal do havarijního stavu, kvůli problémům ruské ekonomiky a nedostatku peněz na vesmírný průmysl. Po provedení obnovy systému byl následně v roce 2007 navigační systém GLONASS zpřístupněn pro

širokou veřejnost jak v Rusku, tak mimo něj. A to bez poplatků a omezení. Systém nabízí dvě služby. Standartní lokalizační služba je otevřena všem a to bez poplatků. Precizní lokalizační služba s vysokou přesností určení polohy byla původně pouze pro armádu a autorizované uživatele ale od roku 2007 je také přístupna zdarma všem uživatelům.

Architektura systému GLONASS se skládá ze tří segmentů, jsou jimi vesmírný segment, pozemní segment a uživatelský segment. Vesmírný segment je tvořen 24 satelity na třech orbitálních rovinách. Osm satelitů je rovnoměrně rozmístěno na každé z rovin pod úhlem 45° . Satelity obíhají ve výšce přibližně 19100 km s inklinací $64,8^\circ$, každý z nich uskuteční jeden oběh zeměkoule za 11 hodin a 15 minut. Rozmístění satelitů umožňuje kontinuální pokrytí celé planety Země.

V roce 2006, když Ruská federace uvolnila jeden z GLONASS signálů veřejnosti, byla jeho přesnost okolo třiceti metrů. Nicméně existoval ještě další šifrovaný signál pro vojenské účely, který poskytoval vyšší přesnost. Tento signál byl zpřístupněn široké veřejnosti roku 2007. Tím se přesnost systému zvýšila zhruba na 10 metrů, což bylo v porovnání s GPS pořád poměrně špatné. Od té doby bylo provedeno několik opatření a zpřesnění systému GLONASS, díky tomu poskytuje dnes srovnatelné výsledky jako systém GPS [3].

2.3 Galileo

Galileo je globální satelitní navigační systém vyvíjený Evropskou Unií pod civilním vedením. Systém Galileo dokáže spolupracovat s ostatními globálními satelitními navigačními systémy jako je GPS nebo GLONASS. Všechny ostatní globální satelitní navigační systémy jsou vojenské aplikace pod vojenskou kontrolou. I když momentálně poskytují i civilní navigační službu tak této službě může být uměle snížena přesnost nebo může být úplně zrušena v případě vojenského konfliktu nebo jiných okolností. Svět se stal natolik závislým na navigačních službách, že při jejich výpadku by docházelo k obrovským problémům v obchodu, dopravě, letectví nebo komunikaci.

Kombinací systémů Galileo a GPS v duálních přijímačích by se otvírala nová brána globálních navigačních systémů, které vyžadují velice vysokou přesnost a dostupnost. Z většiny míst bude dostupných šest až osm satelitů Galileo, což v kombinaci s GPS satelity umožní velice přesnou lokalizaci v řádu centimetrů. Příkladem takových aplikací by mohla být navigace pro slepce nebo zvýšení úspěšnosti záchranných operací. Systém Galileo zvýší celkové pokrytí globálními satelitními navigačními systémy zvýšením počtu satelitů a jejich umístěním na vyšších oběžných drahách. Tím se zpřesní navigace ve městech s vysokými budovami, které momentálně výrazně zhoršují přesnost.

V roce 2011 byly vypuštěny první satelity systému pro ověření správnosti konceptu Galileo. Plně funkční systém Galileo se bude skládat z 24 satelitů a 6 záložních satelitů na oběžné dráze ve výšce zhruba 23 220 km. Satelity budou rozmístěny v 6 rovinách s inklinací 56° k rovníku. Počáteční služby by měly být spuštěny koncem roku 2016, plně funkční systém by měl být v provozu v roce 2020.

Systém Galileo bude nabízet několik služeb. Otevřená služba je zaměřená na široký trh. Nabízí precizní lokalizaci s přesností do jednoho metru. Je určena zejména pro navigaci vozidel a lokalizaci mobilních zařízení. Další je zpoplatněná komerční služba, která umožní lokalizaci s přesností na centimetry. Bude sloužit zejména pro vývoj profesionálních aplikací. Díky své vysoké přesnosti otevírá nové možnosti využití globálních satelitních navigačních systémů. Veřejně regulovaná služba je dostupná pouze organizacím s vládním povolením. Je navržena velmi robustně se zaměřením na bezpečnost. Měla by udržovat bezpečnost strategické infrastruktury. Poslední služba pro spolupráci a integritu monitorování je navržena tak aby vyhovovala mezinárodním standardům. Jde o kooperaci mezi různými globálními satelitními navigačními systémy v případech ohrožení života [3].

2.4 Celulární systém

GSM (*Global system for mobile communication*) je nejpoužívanější protokol v telekomunikacích. Je určen pro přenos hlasu a dat s rychlostí až 9,6 Kbps. Pracuje ve dvou frekvenčních pásmech, v Evropě je to 900 MHz a 1,8 GHz. Použití harmonizovaného spektra po celém světě spolu s mezinárodními službami roaming umožňuje uživateli využívat stejné služby jak doma tak v zahraničí.

V sedmdesátých letech dvacátého století byl vyvinut první koncept celulární mobilní sítě v Bellových laboratořích. Ten vedl k prvnímu standardu celulární mobilní sítě využívanému v Severní Americe a některých evropských zemích. V Evropě si jednotlivé státy nebo menší skupiny, jako například Skandinávie vyvíjely vlastní celulární sítě. To vedlo k vysoké diversifikaci trhu, značným nákladům na vývoj a vysokým cenám služeb. Navíc neexistoval žádný systém mezinárodního celoevropského roamingu. I proto v roce 1993 používalo analogovou celulární síť pouze 7 milionů uživatelů v celé Evropě. Pro zlepšení situace byla roku 1982 vytvořena skupina GSM (*Groupe Speciale Mobile*). V roce 1988 byla vytvořena první sada specifikací pro infrastrukturu celulární sítě a postupem času se stala nejpoužívanějším standardem v telekomunikacích.

Potřeba služby, která by pomocí GSM dokázala lokalizovat uživatele, vzrostla během devadesátých let. Důvodem bylo umožnění lokalizace volajícího v případě tísňového volání. Bylo proto vyvinuto několik technik, které budou popsány v následujících kapitolách. Jejich přesnost bohužel není příliš vysoká a značně kolísá s velikostí buňky základové stanice. Pro zvýšení efektivity přenosu dat bylo GSM doplněno technologií GPRS. Kvůli tomu musela být síť GSM rozšířena přidáním prvků jako PCU (*Packet controller unit*) nebo SGSN (*Serving GPRS Support Node*) do infrastruktury sítě. Systém GSM je označován jako 2G síť, zatímco systém GPRS, který obsahuje jak prvky 2G tak 3G je označován jako 2,5G [6].

2.4.1 Technika CI (*Cell Identity*)

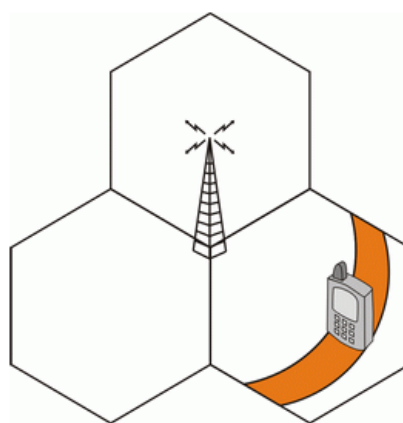
Nejzákladnějším lokalizačním principem v síti GSM je technika zvaná CI. Vyžaduje drobné změny v infrastruktuře sítě GSM ale pouze v jednom bloku.

Využívá buňkové struktury sítě GSM. Zároveň je nutná jedinečná identita každé základové stanice. Pokud je známá základová stanice, ke které je mobilní zařízení připojeno, lze s jistotou tvrdit, že se nachází v jeho obslužné buňce.

Přesnost techniky CI je silně závislá na velikosti buňky. Poloměr buňky je ve městech zhruba 100 - 500 m ale na vesnicích až 35 km. V praxi mobilní zařízení přijímá signál od více základových stanic. Díky tomu se po vytvoření průniku těchto buněk zvýší přesnost lokalizace [7].

2.4.2 Technika TA (*Timing Advance*)

Technika TA přináší další zpřesnění lokalizace v celulárních sítích. Při znalosti rychlosti šíření signálu je možné pouze měřit dobu šíření signálu od základové stanice k mobilnímu zařízení. Neurčuje již oblast celé buňky, jako technika CI, ale pouze mezikruží v buňce.



Obr. 7: Technika TA [8]

3 Lokalizace uvnitř budov

Pro přesnou lokalizaci uvnitř budov se satelitní navigační systém ani celulární systém nedá použít. Celulární systém nemá dostatečnou přesnost ani ve městech s hustou sítí malých buněk. Satelitní navigační systém nemá pro použití uvnitř budov dostatečnou sílu signálu kvůli útlumu ve zdech, zkreslení a odrazům od okolních budov.

Proto se pro lokalizaci uvnitř budov používají jiné techniky, některé pro určení polohy používají rádiovou komunikaci, jiné například světlo, ultrazvuk nebo magnetické pole. Některé z nich budou popsány v následujících kapitolách.

3.1 Světlo

Při užití světla pro lokalizační účely je třeba speciální osvětlení. Vhodné jsou led diody, které kromě poskytování světla zároveň blikají na vysoké frekvenci, která je pro lidské oko nepostřehnutelná. Každé světlo bliká svou unikátní sekvencí, kterou je možné rozpoznat. Je-li budova zmapována a ke každému místu přiřazena správná sekvence, lze přesně určit polohu lokalizačního zařízení.

Výhodou je, že rozpoznat danou sekvenci lze i za použití moderních chytrých telefonů s fotoaparáty, takže není třeba žádných speciálních zařízení. Nevýhodou pak nutnost použití speciálního osvětlení, mapování budovy a nutnost mít odkrytou čočku fotoaparátu na mobilním telefonu [9].

3.2 MEMS v chytrém telefonu

Další možností je použití pohybově citlivých součástek v chytrých telefonech. Jsou to akcelerometry, gyroskopy a kompasy. Pomocí těchto MEMS prvků je možné monitorovat chůzi, její vzdálenost a směr ve třech osách. Pro svou funkci nepotřebuje žádný další hardware ani infrastrukturu pokud je pevně určeno místo, ze kterého se s monitorováním pohybu začíná.

Bohužel v praxi nevykazuje přesné výsledky. Stává se, že ve skutečnosti stojící objekt se pomalu pohybuje kvůli driftu senzorů. I přes tuto výraznou překážku výzkum v této oblasti stále pokračuje. Díky snaze o vytvoření lokalizačního systému, který nepotřebuje napájení z elektrické sítě budovy. Tato aplikace je vhodná zejména pro záchranné akce a v armádě [9].

3.3 Magnetické pole

Další z technik využívá k určení polohy měření magnetického pole. Bylo zjištěno, že elektronické kompasy se uvnitř budov chovají chaoticky. Je to kvůli železobetonu, který ovlivňuje geomagnetické pole. Každé místo v budově má svůj unikátní geomagnetický údaj. Po zmapování budovy a uložení všech údajů do referenční databáze je možné určit polohu pomocí zařízení určujícího přesný geomagnetický údaj, který je následně porovnán

s databází. Nevýhodou této techniky je nutnost speciálního zařízení schopného přesně měřit geomagnetické pole a zdlouhavé vytváření referenční databáze [10].

3.4 RFID

RFID (*Radio Frequency Identification*) se dělí na dva základní proudy. Jsou jimi pasivní RFID, kdy štítek tzv. tag není napájen a aktivní RFID.



Obr. 8: RFID tag [11]

Pasivní tag je třeba přiložit k RFID čtečce, která zjistí jeho unikátní jméno a pošle ho dál ke zpracování. Tag se skládá z antény, řídicího obvodu a paměti. Některé RFID čtečky dokáží rozpoznat tag i na několik desítek centimetrů. Jsou-li tyto čtečky umístěny ve dveřích nebo jiných úzkých koridorech, kterými musí každý projít lze určit oblast, ve které se nositel tagu pohybuje. Tím je ale zjištěna pouze místnost nebo oblast v budově, tato technologie není použitelná pro přesnou lokalizaci. Musí být stanovena pevná síť RFID čteček, které jsou zafixovány na svém místě. Ze znalosti pozic RFID čteček lze určit polohu jednotlivých tagů.

Aktivní RFID je založena na podobném principu jako pasivní, ale aktivní RFID tag má vlastní zdroj napájení. Takže je schopen pravidelně vysílat pakety a komunikovat s RFID čtečkami. Použitím aktivní RFID technologie je výrazně zvýšena přesnost lokalizace, protože lze použít trilateraci nebo jiný lokalizační princip. Ale kvůli bateriově napájenému tagu dojde k nárůstu jak pořizovacích nákladů, tak nákladů na údržbu systému [2].

3.5 Wi-Fi

Wi-Fi je jedna z nejpoužívanějších technik lokalizace uvnitř budov. Na různých místech je měřena síla přijatého signálu a vytvářena databáze těchto míst a jejich úrovně síly přijatého signálu. Používání databáze přináší několik výhod. Hlavní předností je její jednoduchost, není třeba žádný zvláštní hardware ani složitý algoritmus.

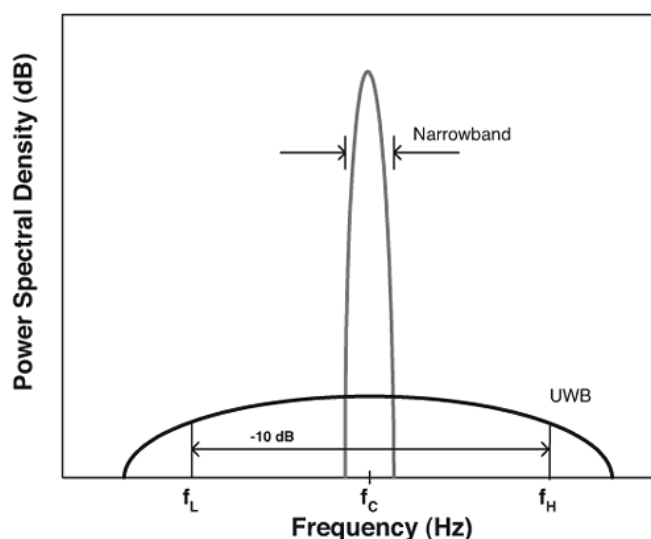
Největší výhodou lokalizačního systému založeného na Wi-Fi je snadnost jeho implementace. Wi-Fi signál je v dnešní době téměř všudypřítomný, proto není třeba

žádných speciálních zařízení. Pouhým měřením síly přijatého signálu mezi přístupovými body Wi-Fi sítě a lokalizovaným zařízením (v tomto případě často chytrý telefon) lze za předpokladu znalosti polohy přístupových bodů pomocí trilaterace určit polohu zařízení.

Nevýhodou je závislost na okolním prostředí. Pokud jsou podmínky měření jiné než podmínky, kdy byla měřena databáze poloh a úrovní signálu, jsou získány nepřesné lokalizační výsledky [2].

3.6 UWB

Technologie UWB (Ultra Wide Band) je založena na standardu IEEE 802.15.4a. Signál je oproti ostatním rádiovým standardům rozšířen přes širokou oblast spektra. Podle definice musí být šířka pásma alespoň 500 MHz nebo víc jak 20 % z centrální nosné frekvence. Díky tomu je velice odolný proti rušení a jen těžko může být zjištěn pomocí spektrálního analyzátoru. Používá velmi krátké a úzké impulsy, díky tomu lze přesně určit časový úsek mezi odesláním a přijetím signálu. Pomocí této technologie je možné dosáhnout velice přesné lokalizace [2].



Obr. 9: Spektrum UWB [12]

3.7 Bluetooth

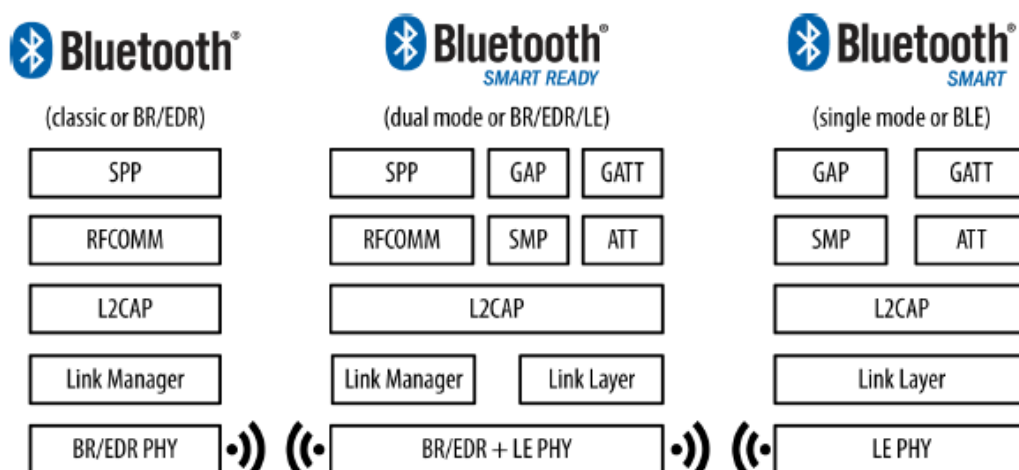
Technologie Bluetooth je globální standard pro bezdrátovou komunikaci vytvořený v roce 1994. Verze 4.0 a novější jsou nazývána BLE (*Bluetooth low energy*) nebo Bluetooth Smart. Přechodem z Bluetooth na BLE se zásadně změnilo spoustu parametrů, protože BLE původně navrhla firma Nokia za účelem co nejnižší spotřeby energie a ceny. V roce 2010 tento standard koupila a představila skupina SIG (*Bluetooth Special Interest Group*). BLE byl stvořen s ohledem na nízkou energetickou náročnost pro rozvíjející se odvětví IoT (*Internet of Things*). Díky tomu vykazují zařízení komunikující pomocí BLE dlouhou životnost i s omezenými zdroji energie. Důležitou součástí úspěchu BLE je jeho podpora mobilními platformami Android i iOS.

Klíčové prvky BLE, které vedli k jeho úspěchu:

- průmyslově standardizovaný protokol, umožňující kompatibilitu mezi jednotlivými výrobci,
- extrémně nízká spotřeba energie, umožňující funkčnost několik měsíců na běžnou knoflíkovou baterii,
- standardizovaný vývoj aplikací, který vede ke snížení nákladů,
- možnost vysokého zabezpečení, díky 128 bitovému šifrování AES [13].

3.7.1 Architektura Bluetooth

Kvůli velkému zásahu do architektury Bluetooth, který přinesl přechod na BLE nejsou tato zařízení běžně kompatibilní. Proto byla vyvinuta i verze Bluetooth Smart Ready, která dokáže komunikovat jak s Bluetooth zařízeními tak s Bluetooth Low Energy.



Obr. 10: Architektura verzí Bluetooth[13]

Na obr. 10 vlevo je zobrazena architektura původního standardu Bluetooth od verze 1.0. Vpravo je nový standard BLE, který nedokáže s původním Bluetooth komunikovat. Uprostřed je přechodná verze, která dokáže spolupracovat s jakýmkoli Bluetooth standardem [13].

3.7.2 Topologie BLE

BLE podporuje dvě základní topologie. První z nich je tzv. spojení (*connection*), které představuje pevný komunikační kanál mezi dvěma zařízeními. Druhým je všesměrové vysílání.

Je-li použito všesměrové vysílání, je možné poslat data všem zařízením v dosahu. Nevýhodou je jednosměrnost datového toku. K všesměrovému vysílání jsou zapotřebí dva typy zařízení, všesměrový vysílač (*broadcaster*) a přijímač (*observer*). Zařízení, které pouze všesměrově vysílá data (tzv. *advertising* pakety) a nemá zájem o spojení (*connectionless broadcaster*), nemůže data přijímat. Výhodou naopak je, že jedině v tomto topologickém uspořádání je možné z jednoho vysílače posílat data více různým přijímačům. Standardní všesměrový paket obsahuje až 31 bajtů. Je to rychlé a jednoduché

topologické uspořádání, které je vhodné v případech kdy se posílá omezený objem dat více zařízením. Nevýhodou oproti běžnému spojení je, že naprosto chybí zabezpečení. Všechna všesměrově vysílaná data mohou být kýmkoli odposlouchávána. Proto tato topologie není vhodná pro přenos citlivých informací.

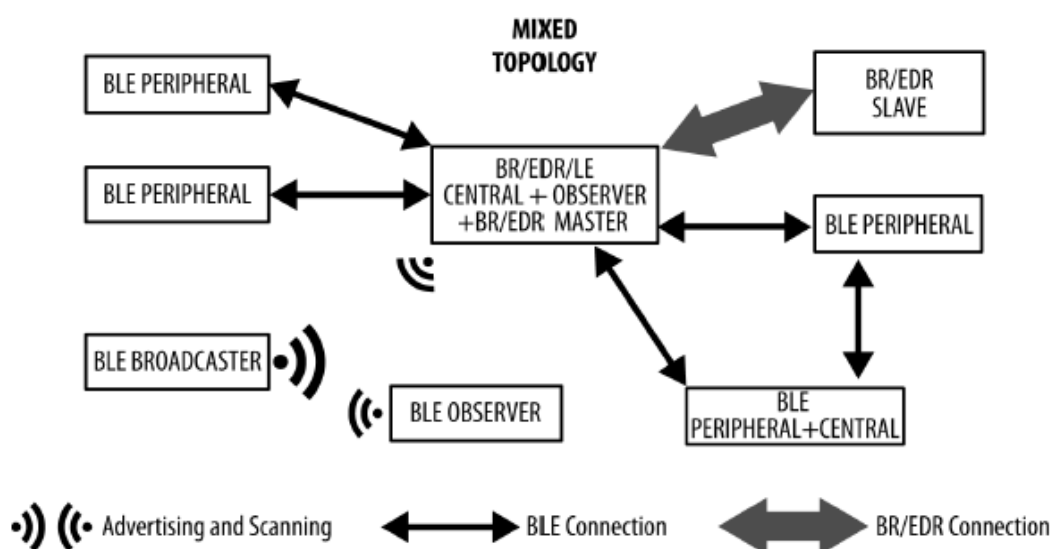
Spojení (*connection*) je druhé topologické uspořádání používané standardem BLE. Používá se v případech, kdy je nutná obousměrná komunikace mezi uzly nebo když 31 bajtový všesměrový (*advertising*) paket není svým objemem dostačující. Spojení znamená stálou periodickou výměnu datových paketů mezi dvěma uzly sítě. Pro spojení je zapotřebí, aby každý z uzlů zastával jednu z následujících rolí.

Centrála (**Master**) opakovaně skenuje předem nastavené frekvence a hledá všesměrový (*advertising*) paket. Pokud takový najde, pokusí se navázat spojení. Jakmile je spojení navázáno centrála řídí časování a iniciuje periodickou výměnu dat.

Periferie (**Slave**) je zařízení, které periodicky všesměrově vysílá (*advertising*) paket, který dává najevo, že hledá spojení. Jakmile dostane od centrály nabídku ke spojení, kterou přijme, naslouchá časování a pravidelně si s centrálou vyměňuje data. Po ustanovení spojení přestane periferie vysílat všesměrový (*advertising*) paket a už komunikuje pouze s centrálou.

Výhodou spojení oproti všesměrovému vysílání je možnost přehledné organizace a struktury dat pomocí dalších vrstev protokolu. Pro udržení spojení je nutné, aby si centrála vyměňovala datové pakety s periferií v určitých intervalech. Tento interval se pohybuje v rozmezí 7,5 ms až 4 s.

Verze BLE 4.1 přinesla některé změny v možnostech topologie. Jedno zařízení se může současně chovat jako centrála i periferie. Centrála může navazovat spojení s více periferiemi najednou. Periferie může být současně spojena s několika centrálami. Tyto změny ve specifikaci BLE přinesly možnost i komplikovanějších topologií, jak je vidět na obr. 11.



Obr. 11: BLE topologie[13]

Realistický maximální odhad toku dat mezi dvěma uzly BLE je 5 až 10 kB/s. Toto číslo záleží na specifikaci obou uzlů a na množství periferií, které obsluhuje jedno zařízení typu centrála. Co se týče dosahu, je možné zkonstruovat i BLE zařízení s dosahem až 30 m. To ovšem ztrácí svou největší výhodu, kterou je nízká spotřeba energie. Běžný dosah BLE zařízení je od 5 do 15 metrů.

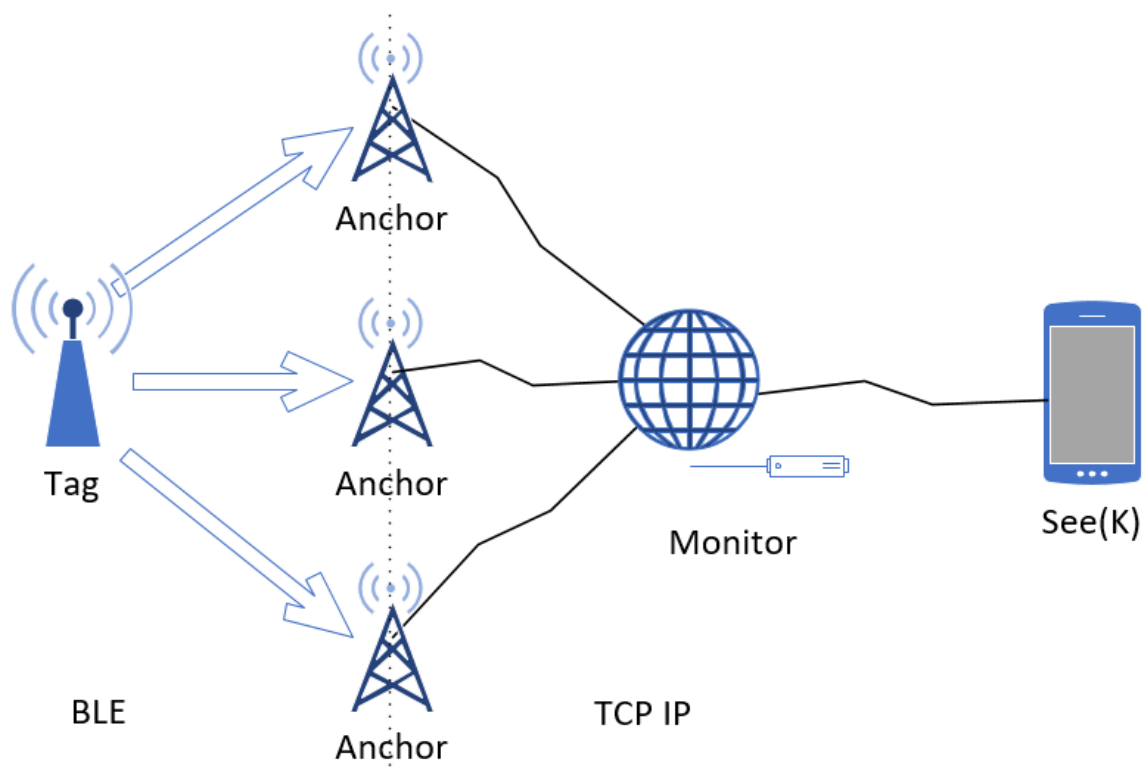
Vzhledem k lokalizaci pomocí BLE se nejčastěji používá metoda tzv. iBeacon, která využívá síť všesměrově vysílajících zařízení (iBeacon) s pevně určenými souřadnicemi. Zařízení, které od iBeaconu přijme všesměrový (advertising) paket dokáže ze síly přijatého signálu a znalosti souřadnic jednotlivých iBeaconů určit svou polohu. Toto ovšem není jediná topologie, která lze pro lokalizaci pomocí BLE použít. Nevýhodou je další hardware a poměrně malý dosah. Mezi výhody lze započítat nízkou spotřebu energie, nízká cena nutného vybavení a kompatibilita s mobilními zařízeními Android i iOS [13].

4 Návrh a realizace systému

Pro realizaci diplomové práce byla vybrána právě technologie BLE pro svou nízkou spotřebu a kompatibilitu s moderními chytrými telefony používajícími operační systém Android i iOS. K přesné lokalizaci uvnitř i vně budov je zapotřebí kombinace více technologií. V tomto případě je uvnitř budov využita technologie BLE a vně budov spolupráce BLE s GPS.

4.1 Koncept lokalizace uvnitř budov

Na obr. 12 je naznačen koncept řešení pro vnitřní prostory. Tag představuje hledané zařízení. Jedná se o malou, přenosnou, bateriově napájenou lokalizační jednotku. Je navržena s ohledem na nízkou energetickou náročnost, minimální rozměry a praktický tvar. Mělo by být možné ho umístit na klíče, obojek domácího mazlíčka, do tašky či do peněženky a pak pomocí něj daný objekt lokalizovat. S okolním světem komunikuje pomocí všesměrového BLE (*advertising*) vysílání. Data pouze vysílá. Nemá možnost je také přijímat.



Obr. 12: Blokové schéma pro lokalizaci uvnitř budov

Vysílaná data je možné přijmout a zpracovat pomocí jakéhokoli zařízení vybaveného technologií BLE. Anchor je statické zařízení, které má pevně určenou svou polohu a musí být připojeno do lokální Wi-Fi sítě, ideálně s přístupem k internetu. Konstantně skenuje všechny tři kanály určené BLE protokolem k všesměrovému (*advertising*) vysílání. Přijíme-

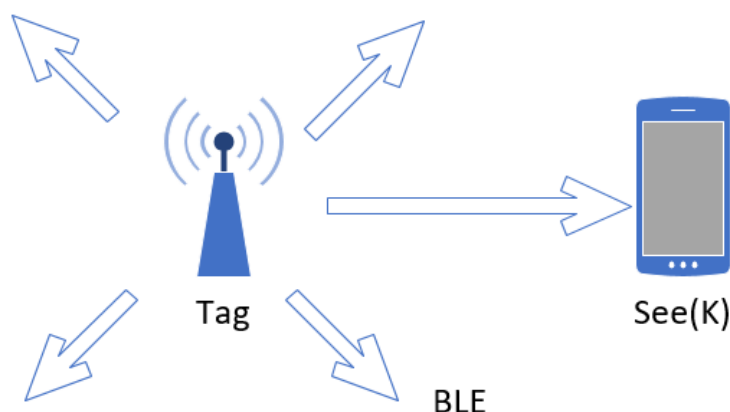
li předem definovaný paket dat od Tagu, získá z něj unikátní jméno Tagu a zjistí sílu přijatého signálu (RSSI). Tyto informace okamžitě po přijetí pošle pomocí TCP/IP protokolu na TCP server Monitor.

Monitor data přijme a uloží je do interní paměti spolu s aktuálním časem. Jako Monitor lze použít starší počítač, ideálně s veřejnou IP adresou. Mimo funkce serveru, může Monitor představovat i aplikaci zobrazující polohu jednotlivých Tagů.

See(K) je uživatelská aplikace, která získává data z Monitoru pomocí TCP/IP protokolu. Může fungovat jak na osobním počítači s operačním systémem Microsoft, tak na zařízení s operačním systémem Android. Díky informacím jako jsou síla přijatého signálu, čas přijetí paketu a známá poloha Anchorů je možné Tag lokalizovat. Tyto data jsou použita k uživatelsky přívětivému zobrazení polohy Tagu a jeho nalezení.

4.2 Koncept lokalizace vně budov

K lokalizaci uvnitř budov je zapotřebí krom Tagu další zařízení a to Anchor. Ten musí být systematicky rozmístěn v lokalitě, kterou chceme pro lokalizaci pokrýt. Tuto techniku je možné použít pouze v oblastech omezených rozlohou. Všude jinde je zapotřebí zvolit jiný přístup.



Obr. 13: Blokové schéma pro lokalizaci vně budov

Tag ve stanovených intervalech vysílá všesměrové BLE (*advertising*) pakety. V případě, že mobilní telefon/tablet vybavený aplikací See(K) přijme tento paket, uloží si pomocí GPS svou polohu. Díky tomu je možné v případě ztráty Tagu určit poslední místo, kde byl v dosahu a kde ho pravděpodobně uživatel zapomněl. Tento přístup k lokalizaci vně budov bohužel neumožňuje sledování Tagu v reálném čase, pokud zařízení s aplikací See(K) není v dosahu jeho BLE paketů.

4.3 nRF51822

Při výběru součástkové základny je kladen důraz na parametry, jako je spotřeba energie, dostupnost v dostatečně malém pouzdru a možnost připojení potřebných periférií. Jak Tag, tak Anchor potřebují řídicí mikrokontroler a komunikační rozhraní BLE.

Těmto požadavkům odpovídá SoC (*System on Chip*) nRF51822 vyráběný společností Nordic Semiconductors. Je to flexibilní SoC ideální pro užití BLE v aplikacích zaměřených na nízkou spotřebu. Integrovaný obvod nRF51822 je založen na 32 bitovém řídicím procesoru ARM Cortex M0 s 256 kB nebo 128 kB flash pamětí spolu s 32 kB nebo 16kB RAM pamětí. Spolu s procesorem je v čipu zabudován 2,4 GHz rádio podporující BLE a zároveň Nordic Gazell protokol.[14]

Integrovaný obvod nabízí širokou škálu analogových i digitálních periférií, které mezi sebou mohou interagovat i bez zásahu procesoru. Flexibilní mapování vstupně výstupních bran GPIO umožňuje využít téměř jakoukoli funkci na různých pinech integrovaného obvodu podle potřeb konkrétní desky plošných spojů. Integrovaný obvod nRF51822 v sobě má zabudovaný lineární regulátor, díky kterému je možné použít jediný zdroj napětí v rozpětí 1,8 – 3,6 V. Je dostupný ve více pouzdrech, QFN o rozměrech 6 x 6 mm nebo WL-CSP (*Wafer level chip scale package*) o rozměrech 3,83 x 3,83 mm s výškou 0,35 mm.

SoC nRF51822 je díky svým parametrům jako je nízká spotřeba a vysoká univerzálnost vhodný pro spoustu aplikací. Patří mezi ně: nositelná elektronika, příslušenství k mobilním telefonům, sportovní a fitness senzory, průmyslové a komerční senzorové aplikace a spoustu dalších.

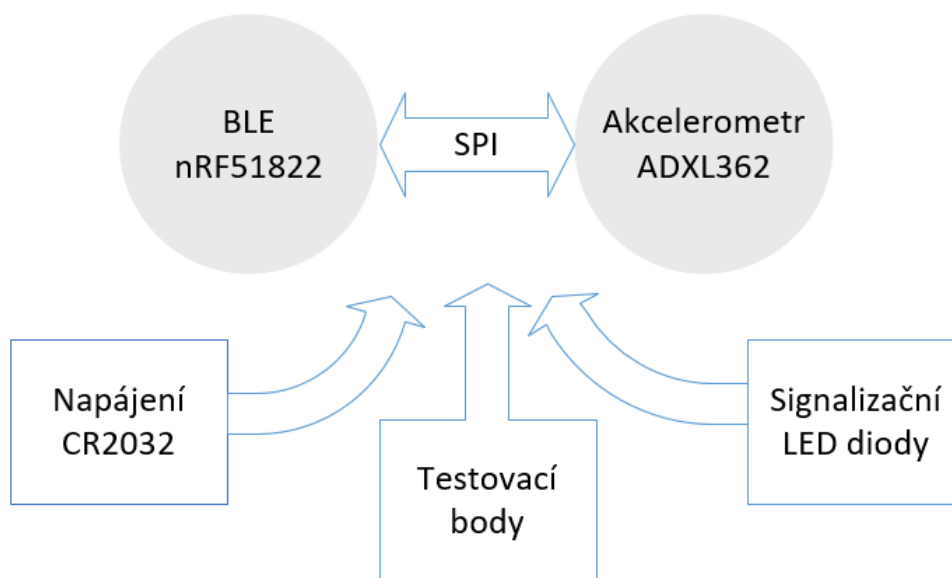
Mezi nejvýraznější přednosti integrovaného obvodu nRF51822 patří:

- podpora protokolu BLE bez nutnosti použít další součástku,
- dostatečně výkonný procesor Cortex M0,
- široký rozsah napájecího napětí (1,8 – 3,6 V),
- energetická nenáročnost,
- spotřeba 2,6 μA v úsporném režimu,
- spotřeba 0,6 μA v režimu spánku, ze kterého lze probudit pouze externím přerušením [14].

4.4 Tag

Tag je přenosná lokalizační jednotka s požadavky na minimální rozměry a maximální výdrž baterie. Na obr. 14 jsou naznačeny základní bloky a jejich vzájemné interakce. Jeho základní součástí je SoC nRF51822, který celý Tag řídí. V paměti je nahrán protokol podporující BLE zvaný SoftDevice vytvořený firmou Nordic Semiconductors. SoC je programován a lze i ladit pomocí rozhraní SWD (*serial wire debug*), které se skládá z dvou vodičů, je to CLK a DATA. Krom programovacích plošek jsou k dispozici i testovací body a signalizační led dioda. Tyto prvky najdou své využití při ožiování a ladění Tagu. Signalizační led dioda pak může být využita i při běžném provozu. Pomocí rozhraní SPI je k SoC nRF51822 připojen MEMS akcelerometr ADXL362 vyráběný firmou Analog Devices. Pomocí akcelerometru lze regulovat frekvenci vysílání všesměrových (*advertising*) BLE paketů v závislosti na pohybu. Díky akcelerometru Tag sníží frekvenci

vysílání v případech, kdy není v pohybu. To výrazně sníží energetickou náročnost zařízení, jelikož bude většinu času v klidu.



Obr. 14: Tag – blokový diagramu

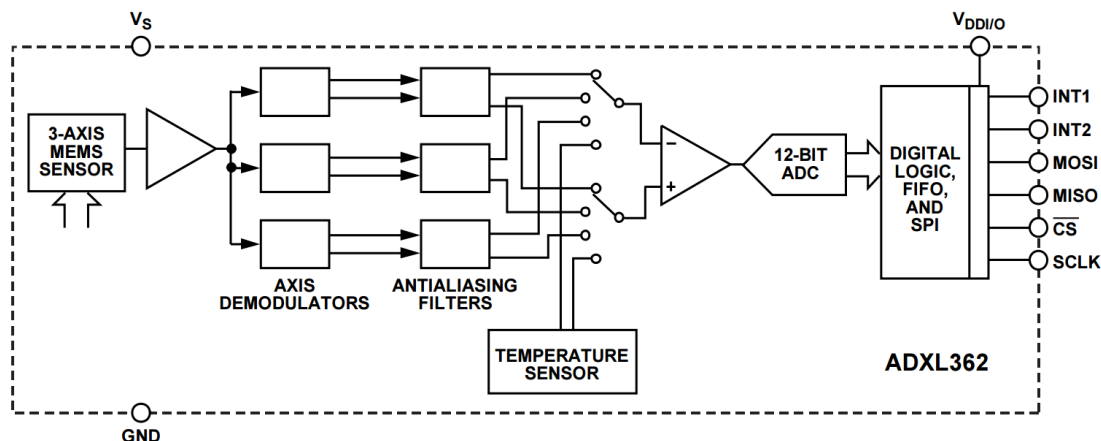
Schematický návrh byl vytvořen v programu Eagle. Díky referenčním zapojením a vývojovým kitům od společnosti Nordic Semiconductors nebyl problém se zapojením SoC nRF51822 a impedančním přizpůsobením antény, na které byl použit speciální balun. Schematický návrh je pro svou velikost umístěn v přílohách.

4.4.1 ADXL362

Integrovaný obvod ADXL362 je tříosový MEMS akcelerometr s velice nízkou spotřebou elektrického proudu. Při frekvenci výstupních dat 100 Hz spotřebovává 2 μA . Jeho spotřeba v utlumeném režimu, kdy čeká na pohyb překračující prahovou hodnotu, činí 270 nA. Vždy poskytuje 12 bitové rozlišení výstupních dat. Je možné použít i 8 bitové rozlišení pro snazší přenos pouze jednoho bajtu v případech, kdy je nižší rozlišení postačující. ADXL362 nabízí rozsah měření ± 2 g, ± 4 g a ± 8 g s rozlišením 1mg/LSB (*Least significant bit*) při rozlišení ± 2 g. Pro aplikace, kde je množství šumu nižší než pro ADXL362 standardních 550 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, lze použít režim s nižším šumem až k 175 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ při minimálním zvýšení spotřeby elektrického proudu. Nabízí široký rozsah napájecího napětí 1,6 - 3,5 V. Je prodáván v pouzdru o rozměrech 3 x 3 x 1,06 mm.

Nejvýraznějšími přednostmi integrovaného obvodu ADXL362 pro Tag jsou:

- velice nízká spotřeba, 270 nA v utlumeném režimu, kdy čeká na překročení nastavitelné prahové hodnoty pohybu,
- možnost použití výstupního pinu INT (*interrupt*) pro probuzení SoC nRF51822 z režimu spánku v případě zvýšené pohybové aktivity,
- komunikační rozhraní SPI,
- široký rozsah napájecího napětí 1,6 V – 3,5 V.



Obr. 15: Blokové schéma ADXL362 [15]

Integrovaný obvod ADXL362 je zapojen podle doporučení výrobce s blokovacími kondenzátory u napájení. Komunikační rozhraní SPI je opatřeno testovacími body pro snazší ožívování. Signál INT je připojen na GPIO SoC nRF51822. Slouží k probuzení procesoru z úsporného režimu v případě zvýšené pohybové aktivity. Je na něm také umístěn testovací bod [15].

4.4.2 Layout

Návrh desky plošných spojů byl proveden v programu Eagle. Jedná se o dvouvrstvou desku. Jak schématický návrh, tak layout je umístěn v přílohách. Tag je deska kruhového obrysu s průměrem 24,89 mm. Velikostí kopíruje baterii CR2032 i s jejím držák, který je umístěn na spodní straně desky. Na vrchní straně jsou osazeny všechny zbylé součástky.

Impedanční přizpůsobení cesty k anténě bylo provedeno v programu AppCAD. Program ze zadaných vstupních parametrů jako: použitý základní materiál desky plošných spojů a jeho tloušťka, tloušťka stínění tvořeného vylitou mědí, pracovní frekvence antény a délka signálové cesty k anténě spočítá výslednou impedanci signálové cesty. Některé technologické parametry lze ovlivnit jen těžko, ale tloušťku desky a zejména šířku signálové cesty a hodnotu izolační vzdálenosti není problém změnit. Pomocí těchto parametrů lze impedanci signálové cesty k anténě upravit na požadovaných 50 Ω.

Krom testovacích bodů jsou na desce umístěny i pájecí plošky pro připojení programovacího rozhraní SWD. Jsou to signály DATA a CLOCK spolu s ploškami pro připojení napájení a země. Vrchní i spodní strana desky plošných spojů je v maximální možné míře vylita mědí připojenou k zemi. Tato vrstva slouží jako stínění. Stínící vrstvy jsou spojeny dostatečným množstvím prokůvů. Stínící vrstva mědi se nenachází jen v okolí antény.

4.4.3 Firmware

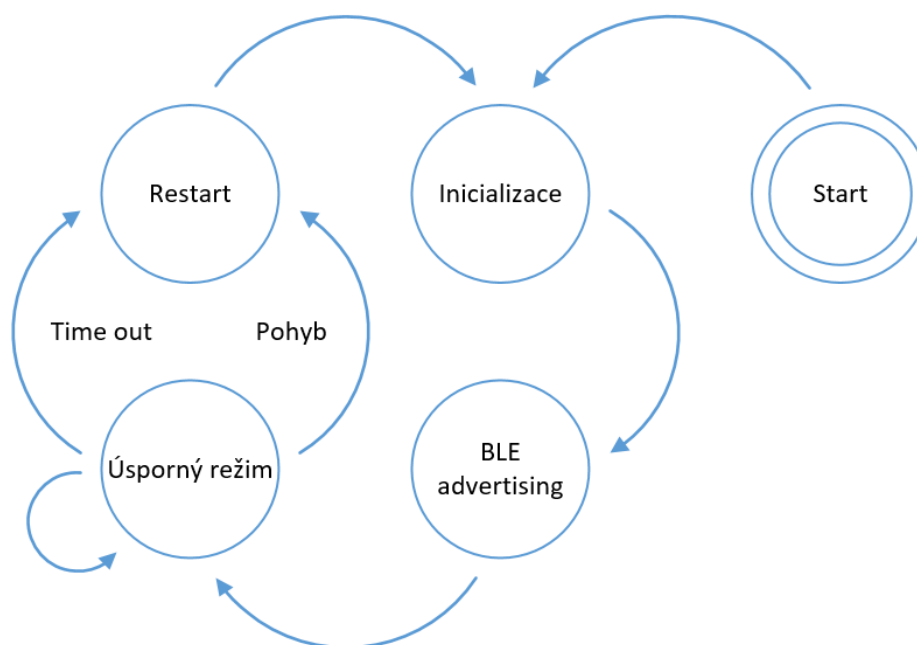
Pro práci na firmwaru byl použit vývojový kit pro SoC nRF51822. Díky tomu bylo možné vyvíjet firmware souběžně s návrhem desky plošných spojů. To vedlo k výrazné úspoře času. Protože se vývojový kit skládá ze dvou desek plošných spojů, lze pomocí něj

vyvíjet BLE komunikaci. Kdy jedna z desek představuje Tag a druhá Anchor. To umožnilo zpracovat a otestovat celý systém bezdrátové komunikace ještě před výrobou vlastních desek plošných spojů.

Vývojový kit poskytuje přístup ke všem GPIO skrze pinové lišty. Je vybaven dvěma led diodami, dvěma tlačítky, piny pro měření spotřeby elektrického proudu, komunikačním rozhraním UART přes USB konektor a čipem Segger J-link, díky kterému je kit programován bez externího J-link programátoru [16].

Samotný vývoj firmwarového vybavení probíhal v prostředí Keil μ Vision IDE podporujícím širokou škálu mikrokontrolérů, je mezi nimi i SoC nRF51822. Prostředí se intuitivně ovládá a napomáhá rychlému vývoji vestavěného firmwaru [17].

Na obr. 16 je zobrazen stavový automat zařízení Tag. Po restartu dojde k inicializaci BLE protokolu a všech periférií nutných pro jeho správnou funkčnost. Po inicializaci následuje krok BLE advertising. Tag po definovanou dobu 1 s všesměrově vysílá na všech třech kanálech určených pro všesměrové BLE (*advertising*) informace nutné k jeho rozpoznání zařízením Anchor, případně mobilní aplikací See(K).



Obr. 16: Tag – stavový automat

Všesměrový (*advertising*) paket může obsahovat až 31 bajtů. V aplikaci Tag je ovšem snaha toto číslo snížit kvůli snížení spotřeby a prodloužení životnosti zařízení, proto je obsah paketu minimalizován na 17 bajtů.

Tabulka 1 zobrazuje část paketu určenou pro specifická data výrobce, je rozdělena na identifikátor společnosti (*COMPANY-ID* nabývající hodnoty 0x0059) a data (*TAG-ID*). *TAG-ID* nabývá hodnot 0x00 – 0x02, rozsah hodnot je omezen počtem dostupných Tagů. Podle identifikátoru se určí, že se jedná o Tag a z dat jeho unikátní jméno. Paket pak už obsahuje pouze svou délku, typ a MAC adresu unikátní pro každé BLE zařízení.

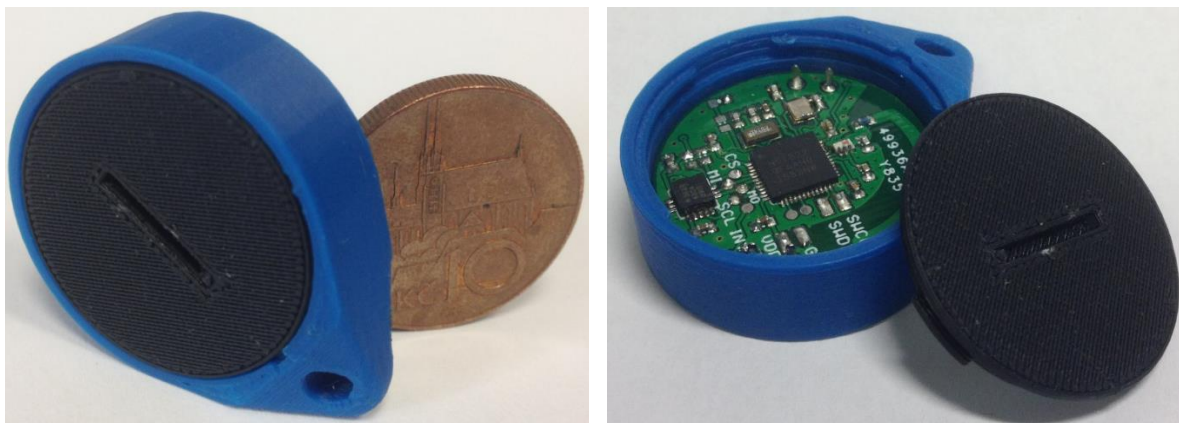
Tabulka 1: *Specifická data výrobce*

Specifická data výrobce	
0-2	3
COMPANY-ID	TAG-ID

Po vypršení časového limitu pro BLE advertising dojde k přepnutí do úsporného režimu. Ještě před tím je ale nutné inicializovat časovač i s jeho přerušením a přerušení akcelerometru. V úsporném režimu Tag zůstane, dokud nevypřší časovač nebo nedojde k pohybu překračujícímu prahovou hodnotu. Potom dochází k restartu a celá smyčka se opakuje. Pomocí akcelerometru je tedy regulován časový interval, po který je Tag v úsporném režimu. Tento interval je v rozmezí 5 až 30 s. Je-li zařízení v pohybu, je nutné vysílat častěji pro zvýšení přesnosti lokalizace.

4.4.4 Mechanické provedení

Návrh krabičky byl proveden v programu Autodesk Inventor, její výroba na 3D tiskárně Zortrax M-200. Její rozměry jsou 36 x 29 x 10 mm. Kopíruje obrys desky plošných spojů Tagu s mírným protažením a dírou pro upevnění například na kroužek od klíčů. Pomocí víčka s bajonetovým uzávěrem se krabička pevně zavře.



Obr. 17: *Tag - mechanické provedení*

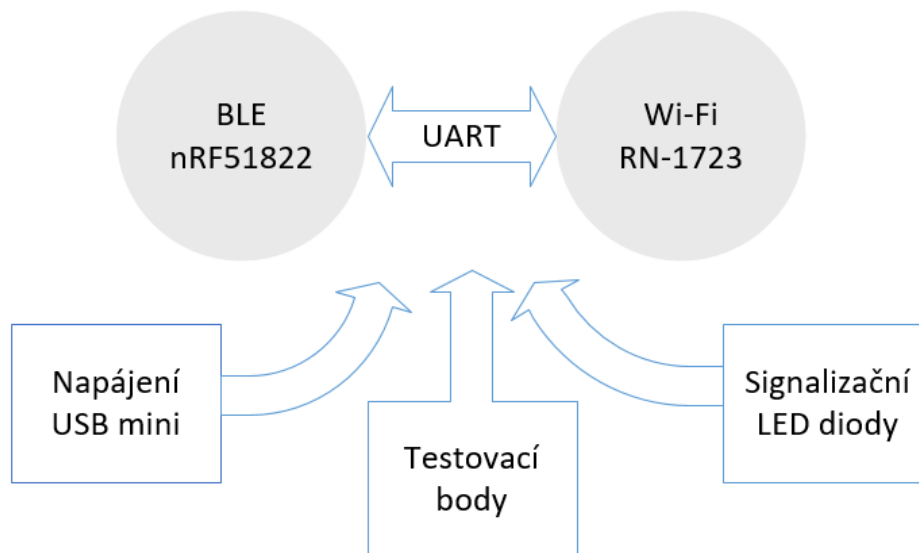
4.5 Anchor

Anchor je stacionární BLE přijímač se známou, pevně určenou pozicí, funguje jako převodník BLE na Wi-Fi. Neustále skenuje všechny BLE kanály určené pro všesměrové vysílání (*advertising*) a pokud přijme paket Tagu, zpracuje ho a pomocí Wi-Fi přepošle na server, se kterým komunikuje v roli TCP klienta. Na server se dostane jméno Anchoru, jméno Tagu a RSSI. Za předpokladu znalosti pozic Anchorů lze dopočítat polohu Tagu, jsou-li získány informace o jednom Tagu od tří či více Anchorů.

Skenování BLE frekvencí zajišťuje SoC nRF51822, který zároveň řídí celé zařízení. Jsou k němu připojeni signalizační led diody a testovací body k snazšímu ožívování a

odladování. Napájení je řešeno pomocí konektoru USB mini. Pro tuto aplikaci není vhodné používat bateriové napájení, kvůli velkému proudovému odběru Wi-Fi modulu a neustálému skenování BLE kanálů. SoC nRF51822 je spojen pomocí komunikačního rozhraní UART s Wi-Fi modulem RN1723, který zajišťuje komunikaci se serverem.

Schematický návrh byl proveden pomocí programu Eagle. Pro svou velikost je kompletní schematický návrh umístěn v příloze a.1, obr. 18 naznačuje základní bloky systému a jejich vzájemnou interakce [18].



Obr. 18: Anchor – blokový diagram

4.5.1 RN1723

RN1723 je malý Wi-Fi modul s nízkou spotřebou podporující TCP, IP nebo UDP protokol. Jeho rozměry jsou pouze 27 x 18 x 3,1 mm. V režimu spánku klesá jeho spotřeba na 4 μ A, díky tomuto faktu a dalším úsporným režimům je vhodný i pro bateriově napájené aplikace s výdrží několik let. Při vysílání spotřebovává 120 mA, při přijímání 40 mA. Je konfigurován pomocí jednoduchých ASCII příkazů posílaných přes UART. Poskytuje GPIO a AD převodníky, díky kterým lze využít i bez externího MCU například jako řídicí obvod pro měřicí jednotku senzorové sítě. Na modulu je umístěn RF pad pro připojení externí antény umožňující zmenšení desky plošných spojů a zároveň díky tomu odpadá problém s impedančním přizpůsobováním cesty k anténě.

Schematické zapojení modulu je provedeno podle doporučení výrobce. Jsou k němu připojeny dvě signalizační led diody a několik testovacích bodů například pro hardwarové resetování nebo konfigurace do továrního nastavení. Modul je propojen několika piny s SoC nRF51822. Kromě komunikační sběrnice UART je to i několik dalších pinů vhodných k řízení modulu.

Nejvýraznější parametry modulu RN1723:

- výstupní síla signálu až 12 dBm přispívá k zvýšení dosahu Anchoru,
- vestavěný protokol TCP, IP, UDP, který nepotřebuje žádné externí ovladače,
- ovládání a konfigurace pomocí jednoduchých ASCII příkazů přes komunikační rozhraní UART,

- vhodné napájecí napětí 3,3 V, které je podporováno zároveň SoC nRF51822 [18].

4.5.2 Layout

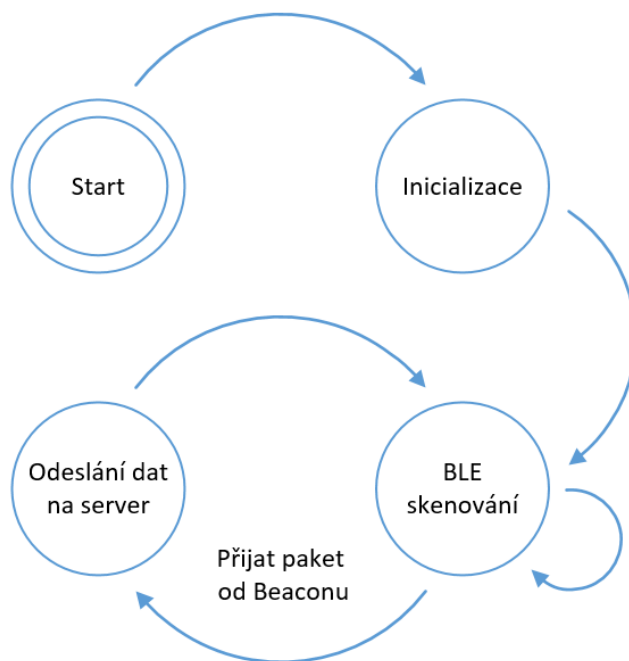
Návrh desky plošných spojů byl proveden v programu Eagle. Byla navržena dvouvrstvá deska s obdélníkovým obrysem o rozměrech 29 x 55 mm. V protilehlých rozích jsou umístěny montážní díry umožňující stabilní ukotvení.

Schématický návrh i layout je umístěn v přílohách. Většina součástek je osazena na vrchní straně desky. V impedančně přizpůsobené cestě k BLE anténě je osazen RF konektor, který umožňuje připojení externí antény pro zvýšení dosahu. Pomocí RF konektoru a spektrálního analyzátoru lze také kontrolovat impedanční přizpůsobení cesty k anténě. Signalizační led diody mohou být řízeny jak pomocí nRF51822 tak RN1723. Připojením se na piny UART lze sledovat komunikaci mezi SoC nRF51822 a modulem RN1723 nebo přímo s jednou ze součástek komunikovat přes terminál počítače.

Deska je opatřena četnými prokvy, zejména okolo impedančně přizpůsobených signálových cest k anténám. Zde se šíří vysokofrekvenční signály, kterým prokvy brání v šíření do nežádoucích oblastí desky plošných spojů.

4.5.3 Firmware

K vývoji firmwaru pro Anchor byl použit stejný vývojový kit i vývojové prostředí jako v případě Tagu.



Obr. 19: Anchor - stavový automat

Před spuštěním Anchoru do běžného režimu popsaného na obr. 19 je nutné konfigurovat Wi-Fi modul RN1723. S výhodou k tomu lze použít testovací piny UART, ke kterým se připojí sériový terminál počítače přes převodník USB - UART. Pak jsou pomocí ASCII příkazů Wi-Fi modulu nastaveny nutné parametry jako:

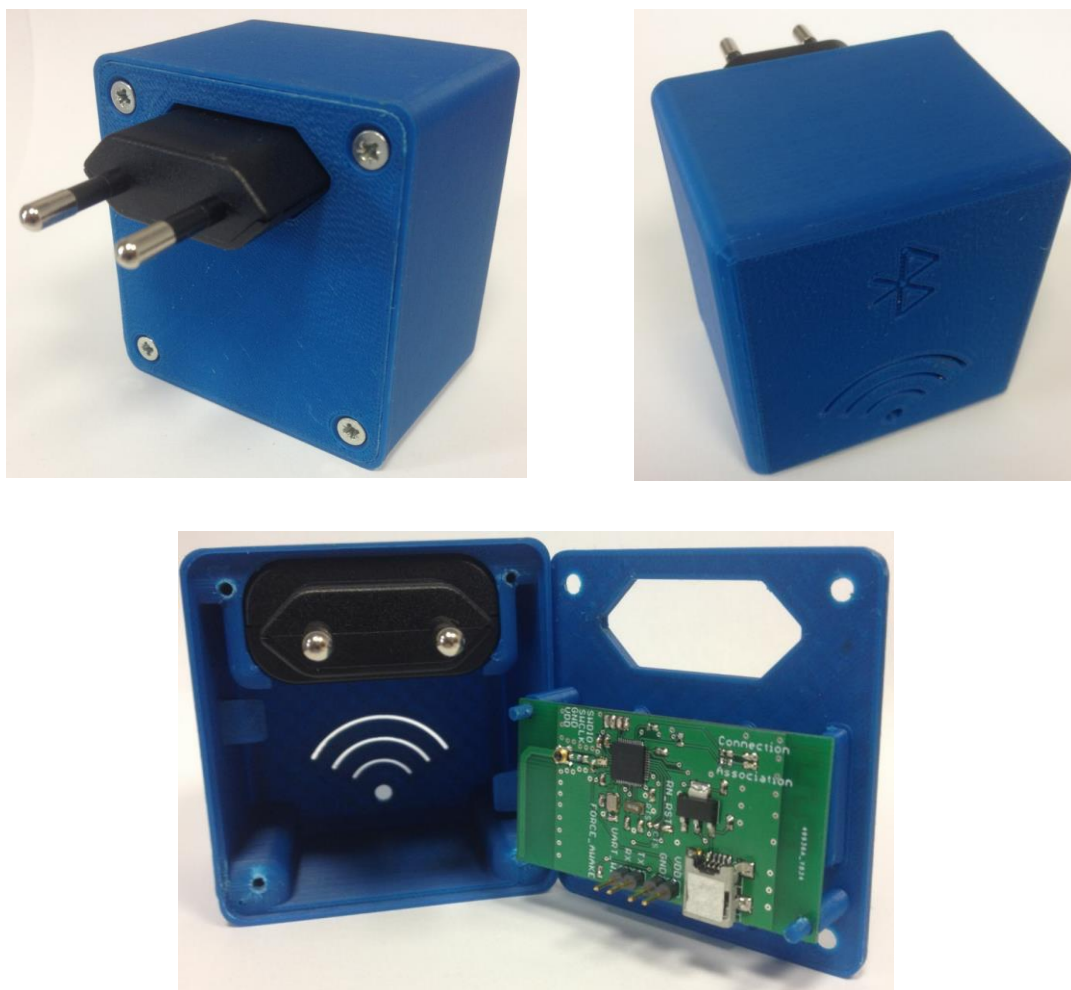
- jméno Wi-Fi sítě, do které se má připojit,
- typ zabezpečení sítě,
- heslo (pokud síť není otevřená),
- režim, ve kterém má modul pracovat (TCP klient),
- IP adresu serveru, na který odesílá data.

Tato konfigurace se uloží do paměti modulu a ten se pak automaticky do zvolené sítě připojuje. Díky signalizačním led diodám lze sledovat, v jakém režimu se modul nachází a zda se připojení do sítě podařilo.

Po restartu zařízení dojde k inicializaci periférií nutných pro start protokolu BLE. Pak začne skenování všech třech BLE kanálů určených pro všesměrové vysílání (*advertising*). Přijme-li paket od Tagu, pošle své jméno, jméno Tagu a RSSI po sběrnici UART do Wi-Fi modulu, který tyto data přepośle na server.

4.5.4 Mechanické provedení

Stejně jako v případě krabičky pro Tag byl návrh proveden v programu Autodesk Inventor a výroba na 3D tiskárně Zortrax M-200. Rozměry krabičky jsou 65 x 60,5 x 46 mm. Skládá se ze dvou částí sešroubovaných čtyřmi vruty.



Obr. 20: Anchor – mechanické provedení

V krabičce je zasunut adaptér s USB konektorem. Pomocí kabelu USB - mini USB je deska plošných spojů napájena. Montážní díry v desce plošných spojů jsou použity k jejímu upevnění na sloupky víka krabičky. Zarážky uvnitř krabičky zajišťují stabilitu desky na sloupcích a zabráňují jejímu volnému pohybu.

Díky USB adaptéru a vhodnému tvaru krabičky je možné ji zasunout do jakékoli síťové zásuvky, která umožňuje napájení.

4.6 Monitor

Aplikace Monitor slouží jako TCP/IP server pracující s protokolem TCP na operačním systému Windows 10. Protokol TCP byl vybrán pro svou spolehlivost, která je pro danou aplikaci klíčová. Pro vývoj aplikace monitor bylo použito prostředí Qt pro svoje výhody jako:

- open-source licence,
- multiplatformní vývoj s podporou široké škály operačních systémů,
- kvalitně zpracovaná dokumentace,
- možnost tvorby grafického uživatelského prostředí,
- systém signálů a slotů[19].

Monitor kromě funkce serveru nabízí i možnosti uživatelské aplikace, kde je možné v grafickém rozhraní nastavit polohu jednotlivých Anchorů, sledovat přijatá data nebo pozorovat polohu jednotlivých Tagů. Pro přehledné naznačení základní funkcionality aplikace Monitor jsou použity diagramy aktivit, obr. 21 zobrazuje posloupnost akcí potřebných pro zápis dat do aplikace Monitor. Po odeslání dat na server z Anchoru nebo z jakéhokoli jiného zařízení pracujícího v režimu TCP klient, je ověřena platnost příkazu k zápisu dat. Pokud není vyhovující, aktivita je ukončena. Následuje ověření platnosti hodnoty Anchoru a Tagu. Pokud je některá z hodnot nevyhovující, aktivita je ukončena. Při splnění všech podmínek dochází k uložení hodnoty RSSI spolu s datem a časem přijetí dat. Po uložení jsou data zobrazena v grafickém rozhraní.

Tabulka 2: Datový rámec pro zápis dat na server

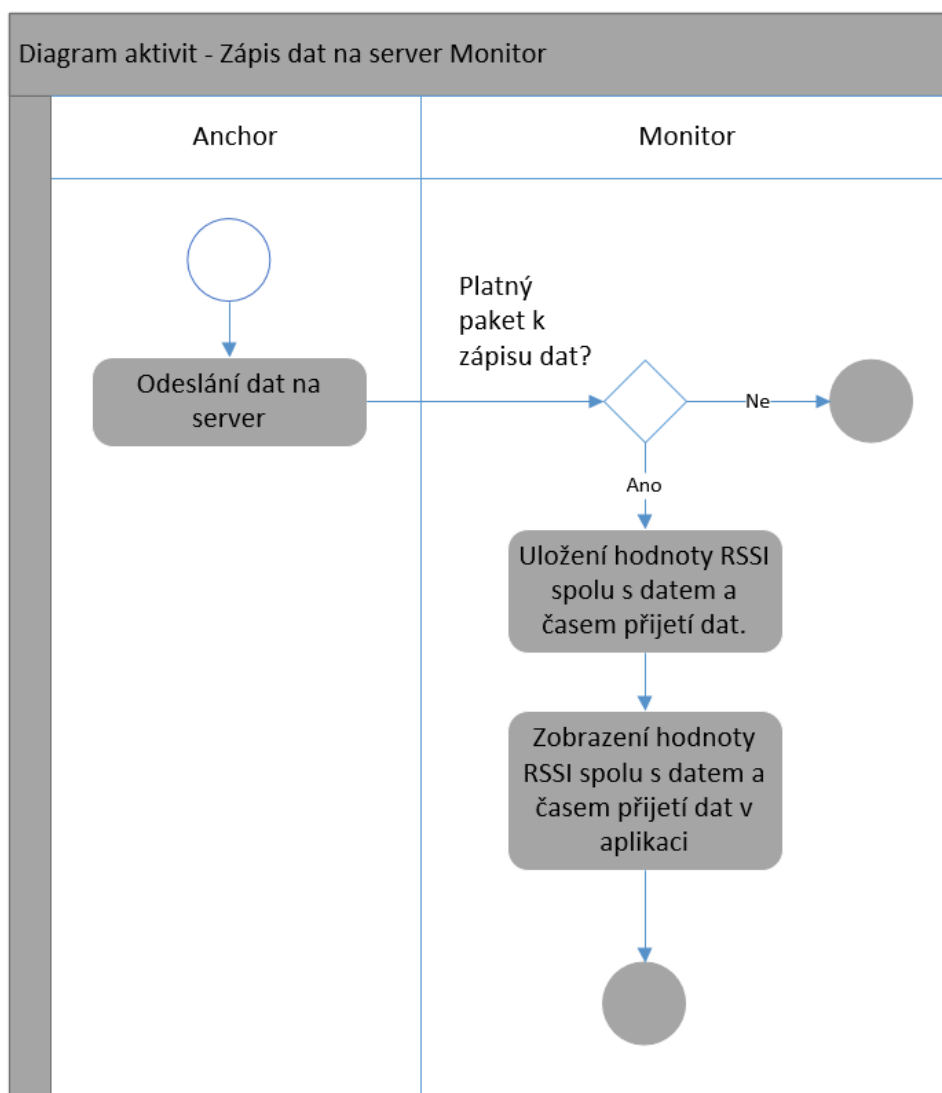
Zápis dat na server			
0	1	2	3
<i>CMD</i>	<i>ANCHOR</i>	<i>TAG</i>	<i>RSSI</i>

Tabulka 2 zobrazuje datový rámec pro zápis dat na server, kde *CMD* (s hodnotou: 0x53) označuje příkaz pro zápis, *ANCHOR* (nabývající hodnot: 0x00 - 0x04) číslo Anchoru, *TAG* (nabývající hodnot: 0x00 - 0x02) číslo Tagu a *RSSI* hodnotu RSSI v dB. Hodnoty *ANCHOR* a *TAG* jsou omezeny počtem dostupných zařízení. Celý rámec má délku čtyř bajtů.

Tabulka 3: Datový rámec pro vyžádání dat ze serveru

Vyžádání dat ze serveru		
0	1	2
CMD	ANCHOR	TAG

Tabulka 3 zobrazuje datový rámec pro vyžádání dat ze serveru, je zkrácenou verzí datového rámce pro zápis dat na server. Položka *CMD* v tomto případě nabývá hodnotu 0x47.



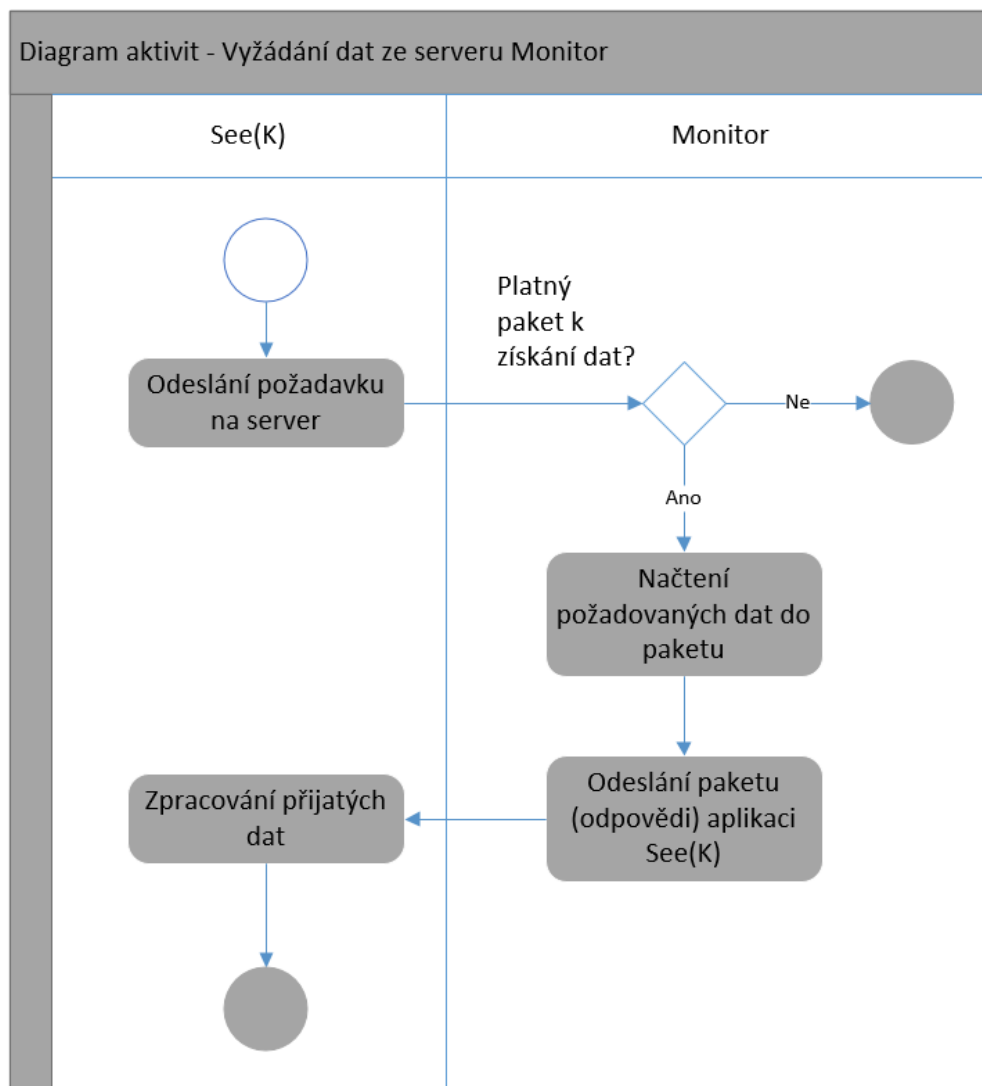
Obr. 21: Monitor – diagram aktivit (zápis dat)

Diagram aktivit popisující vyžádání dat ze serveru Monitor je zobrazen na obr. 22. Ve velké míře se shoduje s diagramem aktivit pro zápis dat na server. Komunikace v tomto případě standardně probíhá mezi serverem Monitor a uživatelskou aplikací See(K) pracující v mobilu nebo tabletu s operačním systémem Android. Po přijetí požadavku serverem je ověřena platnost příkazu, Anchoru a Tagu. V případě, že alespoň jedno ověření není vyhovující, je aktivita ukončena. Při splnění všech podmínek je sestavena a odeslána odpověď s požadovanými informacemi. Tabulka 4 zobrazuje její datový rámec.

Tabulka 4: Datový rámec odpovědi aplikaci See(K)

Odpověď aplikaci See(K)				
0	1	2 - 20	21 - 22	23 - 25
ANCHOR	TAG	DATE AND TIME	RSSI	LATEST

Stejně jako v předchozích datových rámcích *ANCHOR* označuje číslo Anchoru, *TAG* označuje číslo Tagu a *RSSI* hodnotu RSSI v dB. Položka *DATE AND TIME* udává přesný čas přijetí informací od Anchoru. Poslední položka *LATEST* je určena k označení tří Anchorů s nejaktuálnějšími daty, která jsou následně použita při vykreslování pozice hledaného Tagu.

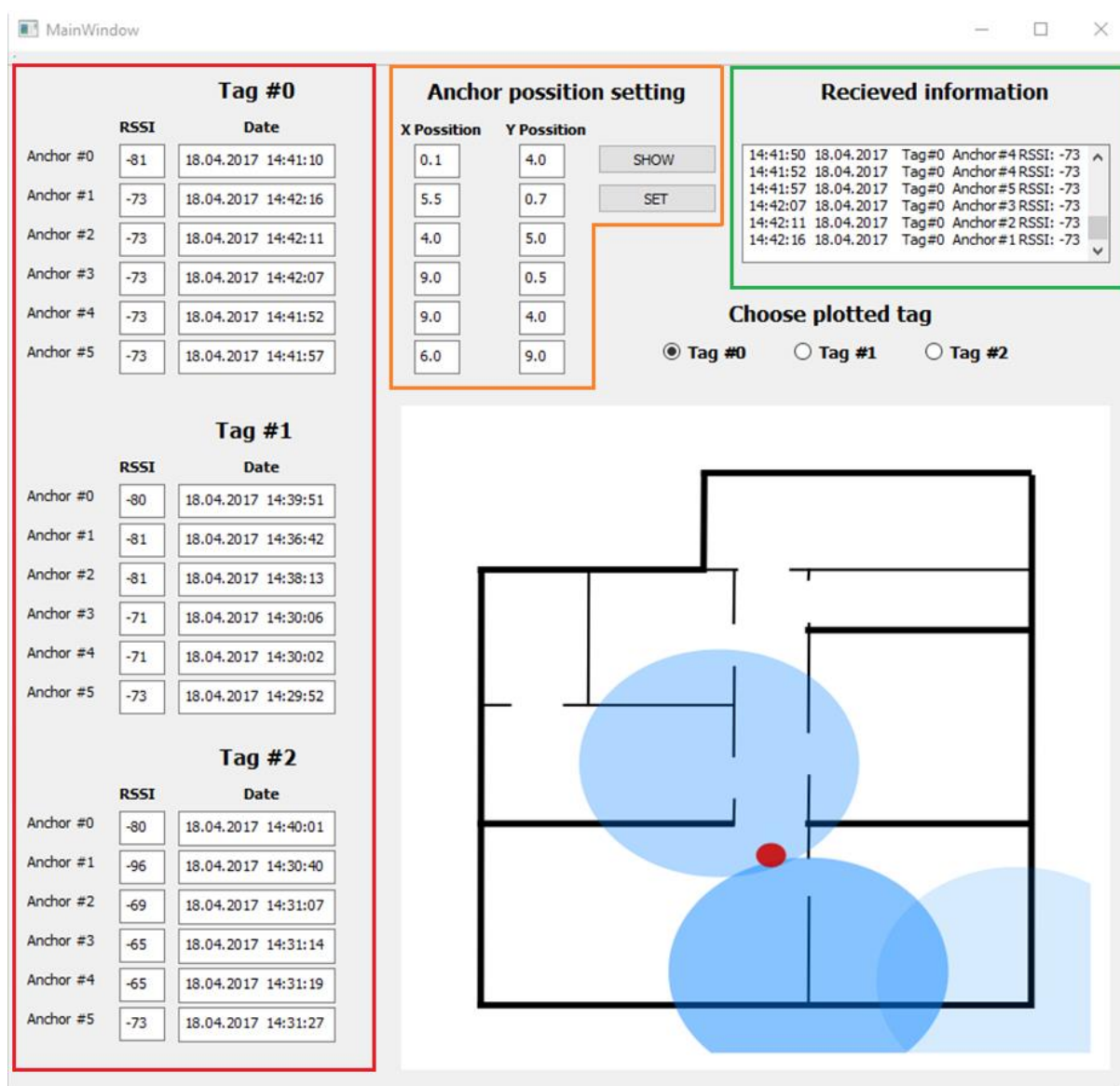


Obr. 22: Monitor – diagram aktivit (vyžádání dat)

4.6.1 Grafické rozhraní

Grafické rozhraní slouží k přehlednému a uživatelsky přívětivému zobrazení informací nutných k nalezení hledaného Tagu. Na obr. 23 je zobrazeno grafické rozhraní rozdělené do čtyř částí pomocí barevného ohraničení. Červeně označená oblast zobrazuje

informace z Anchorů o jednotlivých Tagech. Konkrétně se jedná o indikátor síly přijatého signálu spolu s datem a časem přijetí dat Monitorem. V zeleném rámečku se postupně zobrazují informace o aktuálně přijatých paketech (detailní výpis času, data, Tagu, Anchoru a hodnoty RSSI). Neohraničená oblast slouží k výběru Tagu, který má být v danou chvíli zobrazen v lokalizačním grafu. Samotný lokalizační graf představuje půdorys budovy, ve které je prováděna lokalizace. Tři nejaktuálnější pakety od vybraného Tagu jsou znázorněny v lokalizačním grafu pomocí kruhů se středy v jednotlivých Anchorrech. Nejsytější barvou je zobrazen nejaktuálnější paket a naopak nejsvětlejší barvou je zobrazen třetí nejaktuálnější paket. Pomocí trilaterace těchto tří kruhů je spočítána pravděpodobná poloha hledaného Tagu, která je v grafu označena červeným kruhem. Oranžově ohraničená oblast slouží k nastavení pozic jednotlivých Anchorů v půdorysu budovy při využití jejich souřadnic v metrech na ose x a y .

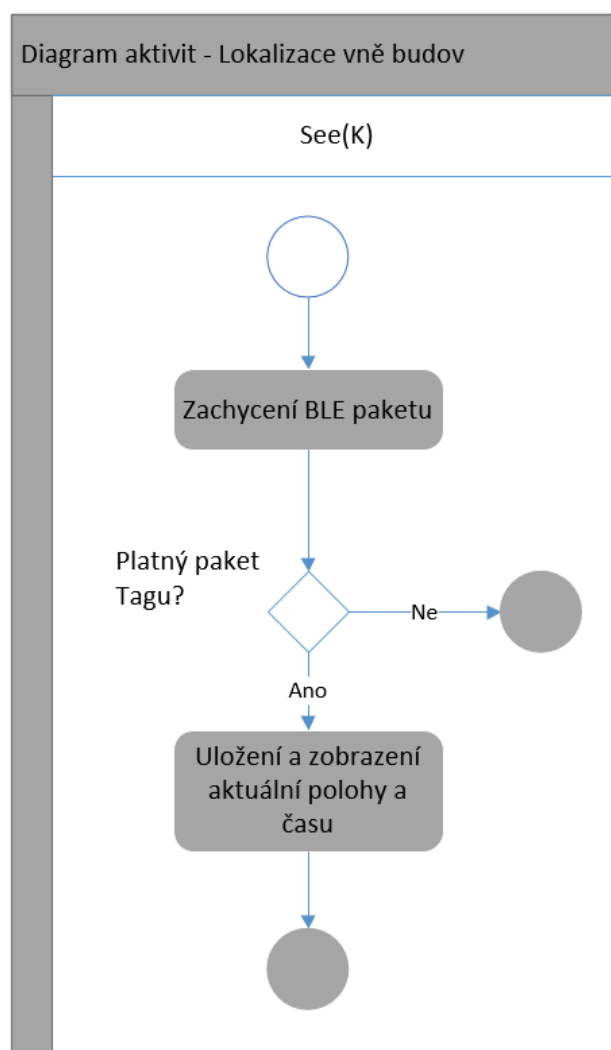


Obr. 23: Monitor – Grafické rozhraní

4.7 See(K)

Mobilní aplikace See(K) pracující na operačním systému Android byla vytvořena ve vývojovém prostředí Qt stejně jako aplikace Monitor. Operační systém Android byl vybrán pro svou rozšířenost a vyšší podporu vývojářů oproti operačnímu systému iOS. Aby aplikace splnila všechny uživatelské požadavky, zastává několik rolí:

- TCP klient komunikující se serverem Monitor,
- skenování Bluetooth Low Energy,
- GPS lokátor.



Obr. 24: See(K) – diagram aktivit (lokalizace vně budov)

Pro přehledné naznačení nejdůležitější funkce aplikace See(K), což je krom snadného přístupu k datům na serveru, lokalizace vně budov, je použit diagram aktivit zobrazený na obr. 24. Aplikace See(K) konstantně skenuje všechny frekvence určené Bluetooth Low Energy protokolem k vysílání všesměrových (*advertising*) paketů. Jakmile je přijat jakýkoli Bluetooth Low Energy paket dojde k ověření platnosti paketu. Pokud není vyhovující, aktivita je ukončena. Shoduje-li se s jedním ze tří definovaných Tagů, je

spuštěn GPS modul, který určí aktuální GPS polohu mobilního telefonu nebo tabletu s aplikací See(K). Tato poloha je spolu s aktuálním časem uložena a zobrazena na jedné ze záložek aplikace.

4.7.1 Grafické rozhraní

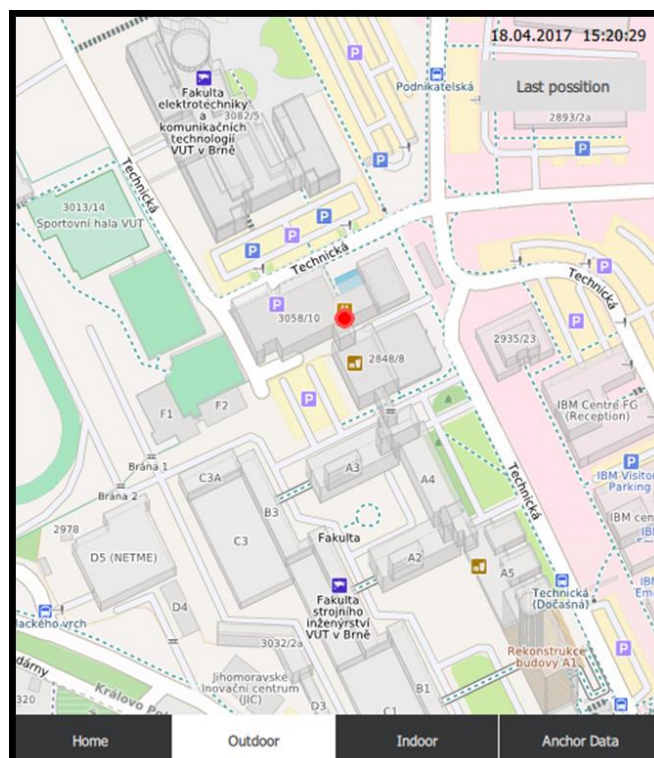
Při tvorbě grafického rozhraní bylo využito nejen knihoven Qt postavených na jazyku C++ ale zároveň i QML. QML je deklarativní jazyk popisující uživatelské rozhraní, které rozděljuje do menších elementů. QML popisuje vzhled, funkčnost a interakce mezi jednotlivými elementy. K tomuto popisu může být přidán i JavaScript, který uživatelské rozhraní obohacuje o komplexnější logiku. Použitím jazyka QML lze oddělit výpočetní část od grafického rozhraní programu [20].

Grafické rozhraní aplikace se skládá ze čtyř obrazovek. Na obr. 25 je zobrazena úvodní obrazovka zvaná *Home*. Uživatel má možnost vybrat jeden z Tagů, který hodlá sledovat. Ve spodní části obrazovky se nachází 4 tlačítka (*Home*, *Outdoor*, *Indoor* a *Anchor Data*) pomocí kterých je možné přepínat mezi jednotlivými obrazovkami.



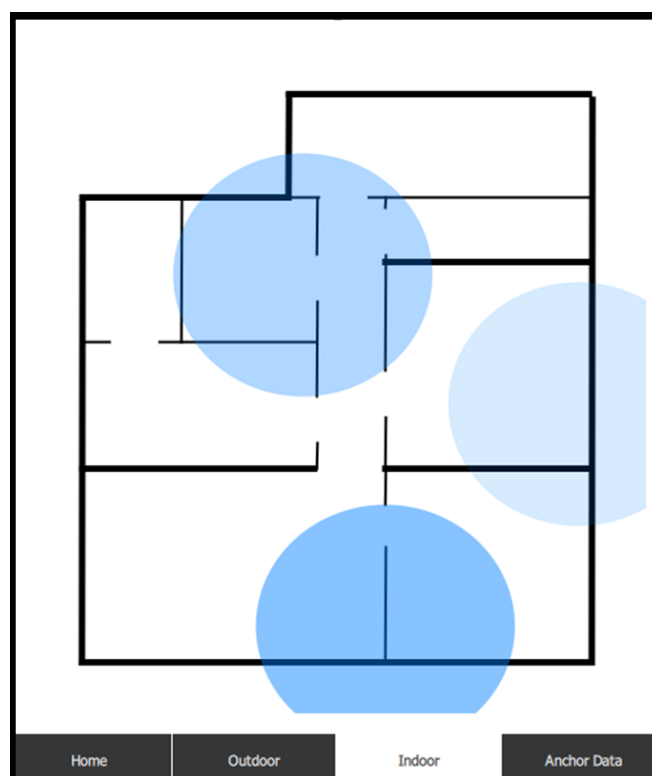
Obr. 25: See(K) – grafické rozhraní (*Home*)

Obr. 26 zobrazuje druhou obrazovku zvanou *Outdoor*. Ta slouží k zobrazení posledního místa, kde byl mobilní telefon nebo tablet s aplikací See(K) v dosahu paketů vybraného Tagu. Zobrazuje na mapě toto místo červeným kruhem, spolu s datem časem uložení této pozice. Mapu lze libovolně přibližovat, oddalovat nebo se po ní pohybovat, pomocí tlačítka *Last Possition* se mapa opět vycentruje na uloženou pozici.



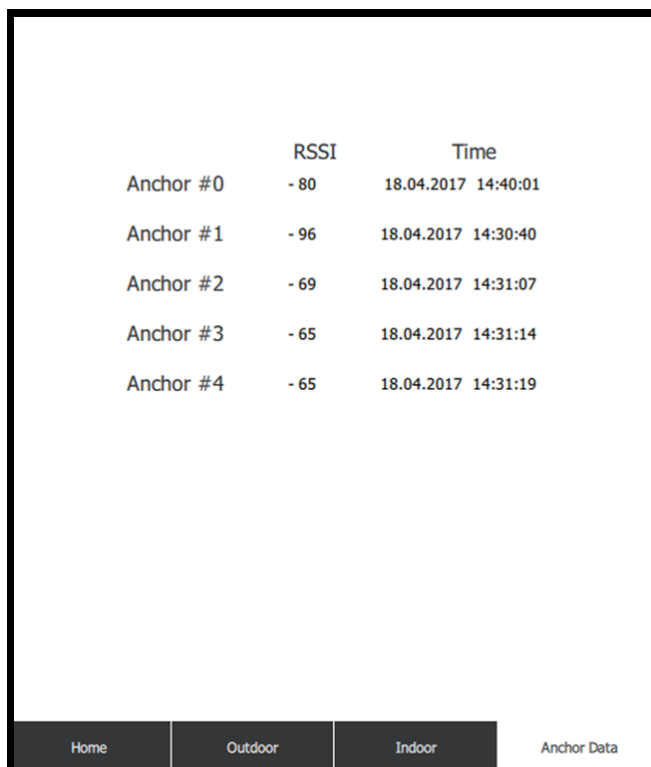
Obr. 26: See(K) – grafické rozhraní (Outdoor)

Třetí obrazovka zvaná *Indoor* je zobrazena na obr. 27. Zastává stejnou roli jako neoznačená část aplikace Monitor. V grafu je vyznačen půdorys kontrolované oblasti, do kterého jsou vynášeny kruhy se středy v jednotlivých Anchorech. Jejich poloměr je počítán v závislosti na indikátoru síly přijatého signálu.



Obr. 27: See(K) – grafické rozhraní (Indoor)

Obr. 28 ukazuje náhled obrazovky *Anchor Data*. Zobrazuje konkrétní informace získané o vybraném Tagu ze serveru Monitor. Jsou to hodnoty indikátoru síly přijatého signálu v dB, spolu s datem a časem přijetí paketu od Anchoru.



The screenshot displays a web interface for 'Anchor Data'. It features a table with three columns: 'Anchor #', 'RSSI', and 'Time'. The table lists data for five anchors. At the bottom, there is a navigation bar with four tabs: 'Home', 'Outdoor', 'Indoor', and 'Anchor Data', with 'Anchor Data' being the active tab.

Anchor #	RSSI	Time
Anchor #0	- 80	18.04.2017 14:40:01
Anchor #1	- 96	18.04.2017 14:30:40
Anchor #2	- 69	18.04.2017 14:31:07
Anchor #3	- 65	18.04.2017 14:31:14
Anchor #4	- 65	18.04.2017 14:31:19

Home Outdoor Indoor Anchor Data

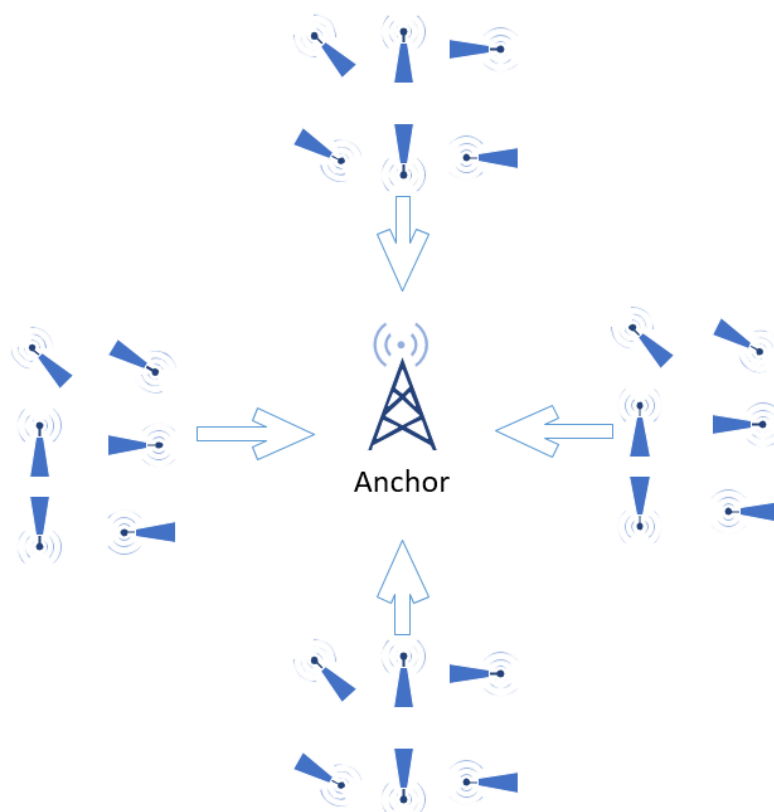
Obr. 28: *See(K)* – grafické rozhraní (*Anchor Data*)

5 Testování

Po osazení a oživení desky plošných spojů Tagu byla provedena implementace firmwaru vhodného k otestování dosahu Bluetooth Low Energy paketů mezi Tagem a mobilním telefonem. Pro testování byl využit mobilní telefon LG L50 s nainstalovanou aplikací nRF Connect, umožňující skenování Bluetooth Low Energy zařízení. Po nastavení maximálního výstupního výkonu Tagu na +4dBm bylo ve volném prostředí dosaženo vzdálenosti 50 m pro udržení spolehlivé bezdrátové komunikace.

Po oživení desky plošných spojů Anchoru byl implementován firmware k otestování dosahu Bluetooth Low Energy paketů mezi Anchorem a Tagem. V otevřeném prostředí bez překážek a rušení bylo dosaženo 12 m pro udržení spolehlivé bezdrátové komunikace.

K ověření všesměrového vysílání planárních antén použitých jak na Tagu tak na Anchoru bylo provedeno měření znázorněné na obr. 29. Anchor byl umístěn do středu testovacího prostoru. Měření bylo prováděno v otevřeném prostranství bez rušení a překážek. Na čtyři místa posunutá o 90° na pomyslné kružnici se středem v Anchoru a poloměrem 3 m byl postupně umisťován Tag. V každém z těchto míst bylo naměřeno Anchorem 10 hodnot RSSI pro 6 různých orientací vrchní vrstvy Tagu, kde je umístěna planární anténa. Tabulka 5 přehledně zobrazuje průměrné hodnoty RSSI v dB pro všech 24 měření.



Obr. 29: Ověření všesměrového vysílání antén

Tabulka 5: Výsledky měření všesměrového vysílání antén

	umístění Tagu oproti Anchoru			
	naproti	v pozadí	vlevo	vpravo
orientace antény	RSSI [dB]	RSSI [dB]	RSSI [dB]	RSSI [dB]
k Anchoru	-68	-69,7	-88,6	-73,7
od Anchoru	-74,5	-71	-76	-76,1
vlevo	-71,5	-71,3	-80,1	-77
vpravo	-68,2	-78	-78	-83
nahoru	-70,2	-70,5	-87,1	-74,8
dolů	-71,3	-68,9	-85,5	-74,5

Další z testů byl proveden k ověření závislosti hodnoty RSSI na vzdálenosti Tagu od Anchoru. Při provádění měření byl Anchor opět umístěn do otevřeného prostředí bez překážek a rušení. Tag umístěný naproti Anchoru byl postupně od Anchoru oddalován. V každé vzdálenosti bylo naměřeno 5 hodnot RSSI pro každou z 6 orientací antény Tagu. Tabulka 6 zobrazuje zprůměrované výsledky. Z naměřených hodnot vychází funkce k získání vzdálenosti Tagu od Anchoru na základě získané hodnoty RSSI.

Tabulka 6: Závislost hodnoty RSSI na vzdálenosti

Závislost RSSI na vzdálenosti	
vzdálenost [m]	RSSI [dB]
1	-61,7
2	-67,3
3	-67,5
4	-69
5	-70,5
6	-71
7	-73,8
8	-75
9	-77,3
10	-78
12	-83

Pro měření odběru elektrického proudu Tagem byl vytvořen testovací firmware umožňující kontinuální všesměrové vysílání (*advertising*) a kontinuální režim spánku. Pomocí multimetru byly proměřeny obě (z hlediska odběru elektrického proudu) mezní situace. Naměřené hodnoty 4,5 μ A v režimu spánku a 16,5 mA při vysílání odpovídají údajům z katalogového listu MCU spolu se spotřebou akcelerometru ADXL362. Ve finálním firmwaru dochází k častým skokovým změnám odběru elektrického proudu vlivem spínání, přechodné úspory a vypínání rádia. Tyto průběhy lze těžko změřit i pomocí sledování úbytku napětí na přesném rezistoru osciloskopem. Proto byl po prověření

mezních hodnot proudového odběru v režimu spánku a kontinuálního vysílání využít dokument poskytovaný firmou Nordic Semiconductors pro spočítání přesného proudového odběru nRF51822 [21]. Tabulka 7 zobrazuje spočítané hodnoty spolu se zahrnutou spotřebou akcelerometru ADXL362.

Tabulka 7: Výdrž baterie CR2032 v Tagu

výdrž baterie Tagu		
perioda vysílání [s]	průměrná spotřeba [μ A]	životnost baterie [roky]
5	7,7	3,2
30	5	5,1

Pro otestování lokalizace uvnitř budov byla síť Anchorů rozmístěna po sledované oblasti uvnitř zděné stavby. Maximální vzdálenost mezi Tagem a Anchorem v otevřeném prostředí je 12 m, tento dosah uvnitř budov klesá zhruba na polovinu v závislosti na rušení a počtu zdí oddělujících Tag a Anchor. V testovacím prostředí rodinného domu o rozloze 90 m², kde bylo rozmístěno v jednom patře 5 Anchorů, byla naměřena přesnost ± 25 cm až ± 150 cm. Přesnost výrazně kolísá s počtem osob v místnosti, počtem Bluetooth Low Energy zařízení nebo možným stíněním nábytkem. Přesnost lokalizace lze zvýšit vyšší hustotou rozmístěných Anchorů.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo prostudovat teoretické možnosti lokalizace a navrhnout vhodné řešení pro lokalizaci osob nebo věcí.

V úvodní části jsou popsány teoretické principy lokalizace, následují praktické možnosti lokalizace, jak uvnitř, tak vně budov. Další kapitola diplomové práce popisuje navržený koncept řešení spolu s realizací a oživením nezbytného hardwaru. Pomocí blokových diagramů a stavových automatů je přehledně popsána funkčnost celého systému. Mechanické provedení bylo navrženo s ohledem na funkčnost a praktičnost.

Jako nejvhodnější pro danou aplikaci byla vybrána kombinace technologií Bluetooth Low Energy a GPS. Samotná lokalizace je pak prováděna pomocí indikátoru síly přijatého signálu a následné trilaterace. Pro lokalizaci uvnitř budov je použita síť stacionárních přijímačů (Anchorů) skenujících BLE frekvence. Po přijetí paketu od lokalizačních jednotek (Tagů) jsou nezbytné informace poslány na server Monitor, kde je pomocí trilaterace spočítána pozice Tagů. K lokalizaci vně budov nelze z ekonomických důvodů použít síť stacionárních přijímačů. Proto byla vyvinuta mobilní aplikace See(K), pracující na operačním systému Android. Aplikace v případě přijetí paketu od Tagu zjistí, uloží a zobrazí svou aktuální polohu pomocí systému GPS. Krom své důležité funkce při lokalizaci vně budov, aplikace See(K) uživateli zobrazuje i rozmístění jednotlivých Tagů uvnitř budov.

Závěrečná kapitola popisuje komplexní testování systému. Pro stabilní komunikaci mezi mobilním telefonem LG L50 a Tagem bylo v otevřeném prostředí bez překážek a rušení dosaženo maximální vzdálenosti 50 m. Přesnost lokalizace uvnitř budov je silně závislá na počtu osob v místnosti, stínění nábytkem a rušení. Proto kolísá z rozmezí ± 25 cm až ± 150 cm při pokrytí 90 m² pěti Anchory.

V diplomové práci byl navržen komplexní systém pro lokalizaci uvnitř i vně budov, od konceptu, přes hardware, firmware i software. Uplatnění nalezne zejména při hledání ztracených drobností, jako jsou klíče, batoh nebo peněženka. Nejvýraznější předností systému je vysoká životnost baterie Tagu, která se pohybuje v rozmezí 3 až 5 let. Bylo jí dosaženo ze dvou hlavních důvodů. Prvním z nich je vhodně zvolená Bluetooth Low Energy topologie všesměrového vysílače (*broadcaster*) a přijímače (*observer*). Druhým důvodem je využití akcelerometru k indikaci pohybu a regulaci periody vysílání paketů.

Literatura

- [1] Cisco Systems, Inc.. Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide [online]. 20. 5. 2008 [cit. 2016-10-14]. Dostupné z: <http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/WiFiLBS-DG.pdf>
- [2] MALIK A. RTLS for dummies. Hoboken, N.J: For Dummies, 2009. ISBN 978- 047-0398-685.
- [3] *Navipedia: The reference for Global Navigation Satellite Systems* [online]. [cit. 2016-10-16]. Dostupné z: http://www.navipedia.net/index.php/Main_Page
- [4] ŠEBESTA, Jiří. Globální navigační systémy. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012, 132 s. 978-80-214-4500-0.
- [5] HORT, M. Konstrukce GPS přístroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
- [6] HILLEBRAND, Friedhelm. The creation of standards for global mobile communication: GSM and UMTS standardization from 1982 to 2000. *IEEE*. 2013, 20(5), 24-33. DOI: 10.1109/MWC.2013.6664470.
- [7] HALONEN, Timo, Javier ROMERO and Juan MELERO. GSM, GPRS, and EDGE performance: evolution towards 3G/UMTS. 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: J. Wiley, c2003, xxxvii, 615 p. ISBN 0470866942.
- [8] *Základní lokalizační metody v GSM* [online]. 2006 [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?nazevclanku=zakladni-lokalizacni-metody-v-gsm&cislocclanku=2006022801>
- [9] *The Economist: Finding the way inside* [online]. [cit. 2016-10-26]. Dostupné z: <http://www.economist.com/news/technology-quarterly/21567197-navigation-technology-using-satellites-determine-your-position-only-works>
- [10] CHUNG Jaewoo, DONAHOE Matt, SCHMANDT, KIM Ig-Jae, RAZAVAI Pedram, WISEMAN Micaela. Indoor Location Sensing Using Geo-Magnetism [online]. MIT Media Laboratory, 2011 [cit. 2016-10-26]. Dostupné z: <https://www.media.mit.edu/speech/papers/2011/positioning.systems.pdf>
- [11] *RFID* [online]. 2014 [cit. 2016-10-26]. Dostupné z: <http://rfidforlife.blogspot.cz/>

- [12]] *InformIT: Introduction to Ultra Wideband Communication Systems* [online]. [cit. 2016-10-26]. Dostupné z: <http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=384461>
- [13] TOWNSEND, Kevin, Carles CUFÍ, Robert DAVIDSON a AKIBA. *Getting Started with Bluetooth Low Energy*. O'Reilly Media, 2014. ISBN 978-1-4919-4951-1.
- [14] Nordic Semiconductor. *NRF51822* [online]. [cit. 2016-11-06]. Dostupné z: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-low-energy/nRF51822>
- [15] ADXL362. *Analog Devices* [online]. [cit. 2016-11-07]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/products/mems/accelerometers/adxl362.html#product-overview>
- [16] Nordic semiconductor: *nRF51822 Evaluation Kit* [online]. [cit. 2016-11-08]. Dostupné z: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-low-energy/nRF51822-Evaluation-Kit>
- [17] *ARMKeil microcontroller tools* [online]. [cit. 2016-11-08]. Dostupné z: <https://www.keil.com/>
- [18] RN1723. *Microchip* [online]. [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN1723>
- [19] *Qt Documentation* [online]. 2017 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://doc.qt.io/>
- [20] *A Book about Qt5* [online]. 2016 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://qmlbook.github.io/>
- [21] Excel sheet for power consumption. Nordic Developer Zone [online]. 2015 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://devzone.nordicsemi.com/question/36110/excel-sheet-for-power-consumption/>

Seznam zkratek

GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communication
RSSI	Received Signal Strength Indicator
PCU	Packet Controller Unit
GPRS	General Packet Radio Service,
SGSN	Serving GPRS Support Node
CI	Cell Identity
TA	Timing Advance
RFID	Radio Frequency Identification
UWB	Ultra Wide Band
BLE	Bluetooth Low Energy
AES	Advanced Encryption Standard
SoC	System on Chip
RAM	Random Access Memory
QFN	Quad Flat No-leads
WL-CSP	Wafer Level Chip Scale Package
SWD	Serial Wire Debug
SPI	Serial Peripheral Interface
GPIO	General Purpose Input Output
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
AD	Analog/Digital
MCU	MicroController Unit

Seznam obrázků

Obr. 1: Nejbližší přijímač [1].....	9
Obr. 2: Trilaterace [1].....	10
Obr. 3: Hyperbolická laterace [1]	11
Obr. 4: Úhel přijetí [1].....	13
Obr. 5: Konstelace GPS satelitů [3]	16
Obr. 6: Modulační schéma GPS[5]	17
Obr. 7: Technika TA [8].....	21
Obr. 8: RFID tag [11]	23
Obr. 9: Spektrum UWB [12]	24
Obr. 10: Architektura verzí Bluetooth[13]	25
Obr. 11: BLE topologie[13]	26
Obr. 12: Blokové schéma pro lokalizaci uvnitř budov	28
Obr. 13: Blokové schéma pro lokalizaci vně budov.....	29
Obr. 14: Tag – blokový diagramu	31
Obr. 15: Blokové schéma ADXL362 [15]	32
Obr. 16: Tag – stavový automat	33
Obr. 17: Tag - mechanické provedení	34
Obr. 18: Anchor – blokový diagram	35
Obr. 19: Anchor - stavový automat	36
Obr. 20: Anchor – mechanické provedení.....	37
Obr. 21: Monitor – diagram aktivit (zápis dat).....	39
Obr. 22: Monitor – diagram aktivit (vyžádání dat)	40
Obr. 23: Monitor – Grafické rozhraní	41
Obr. 24: See(K) – diagram aktivit (lokalizace vně budov)	42
Obr. 25: See(K) – grafické rozhraní (Home)	43
Obr. 26: See(K) – grafické rozhraní (Outdoor).....	44
Obr. 27: See(K) – grafické rozhraní (Indoor).....	44
Obr. 28: See(K) – grafické rozhraní (Anchor Data).....	45
Obr. 29: Ověření všesměrového vysílání antén.....	46

Seznam tabulek

Tabulka 1: Specifická data výrobce	34
Tabulka 2: Datový rámec pro zápis dat na server	38
Tabulka 3: Datový rámec pro vyžádání dat ze serveru	39
Tabulka 4: Datový rámec odpovědi aplikaci See(K)	40
Tabulka 5: Výsledky měření všesměrového vysílání antén	47
Tabulka 6: Závislost hodnoty RSSI na vzdálenosti	47
Tabulka 7: Výdrž baterie CR2032 v Tagu	48

Seznam příloh

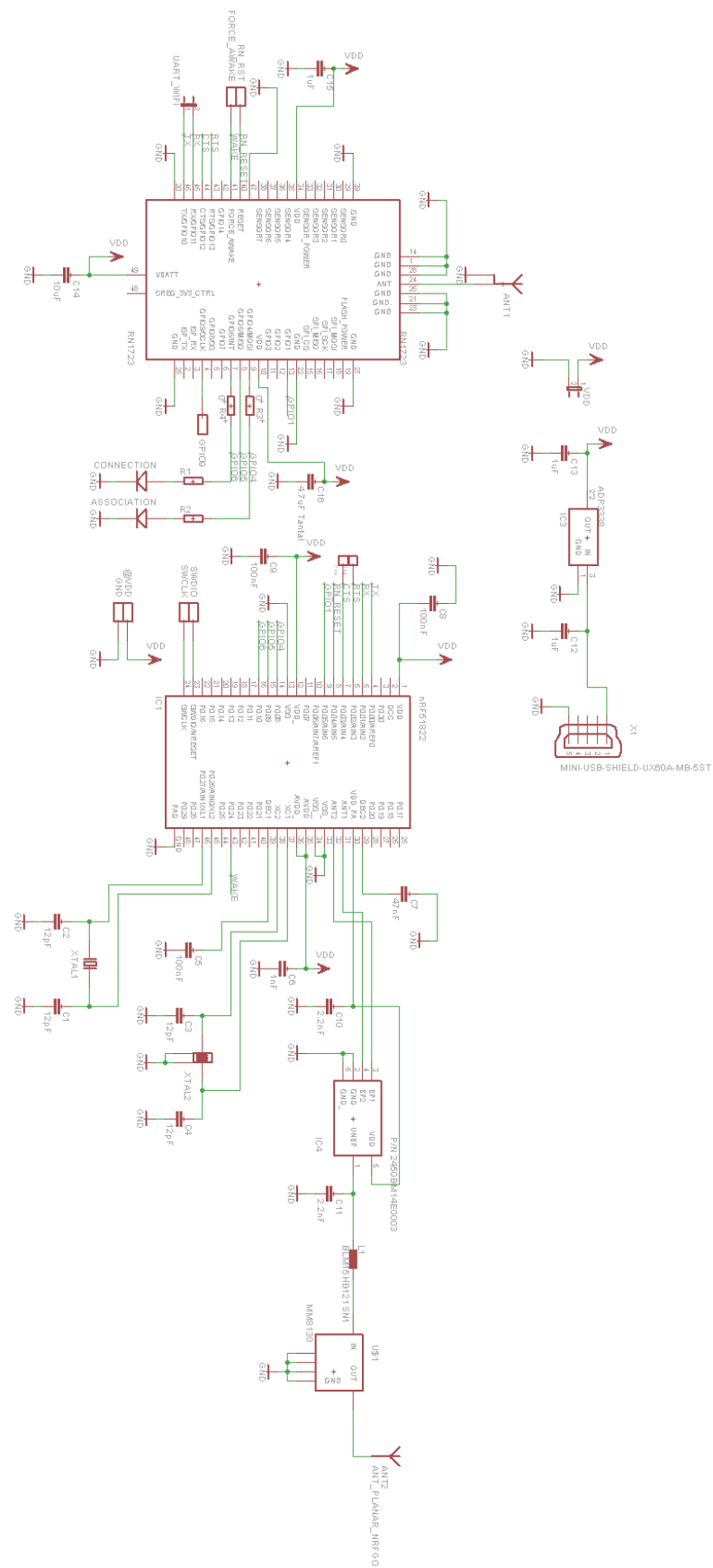
A - Anchor

- A.1 Schématický návrh
- A.2 Layout - top
- A.3 Layout - bottom
- A.4 Osazovací výkres - top
- A.5 Osazovací výkres - bottom
- A.6 Seznam součástí

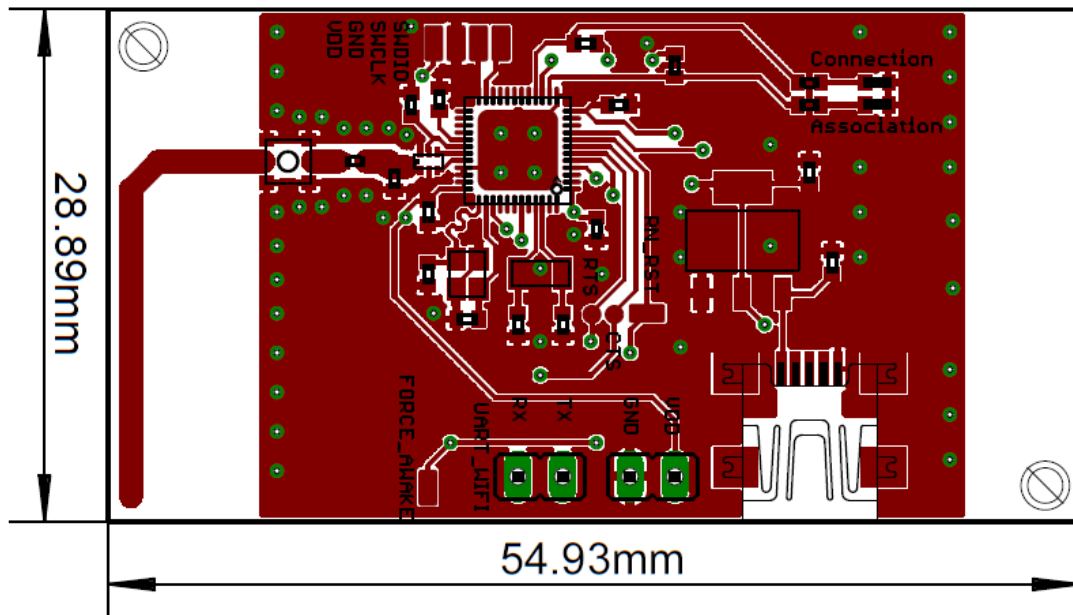
B - Tag

- B.1 Schématický návrh
- B.2 Layout - top
- B.3 Layout - bottom
- B.4 Osazovací výkres - top
- A.5 Osazovací výkres - bottom
- B.6 Seznam součástí

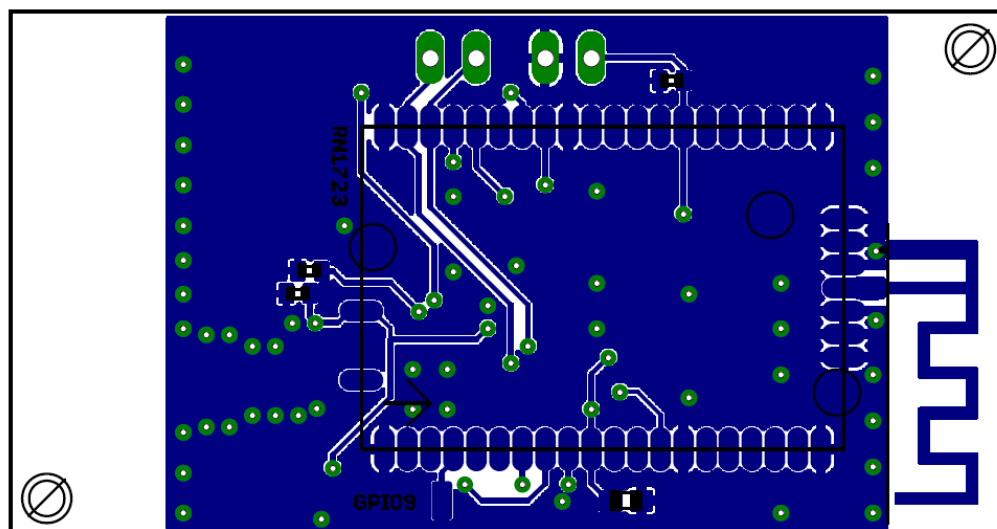
A.1 Anchor – Schématický návrh



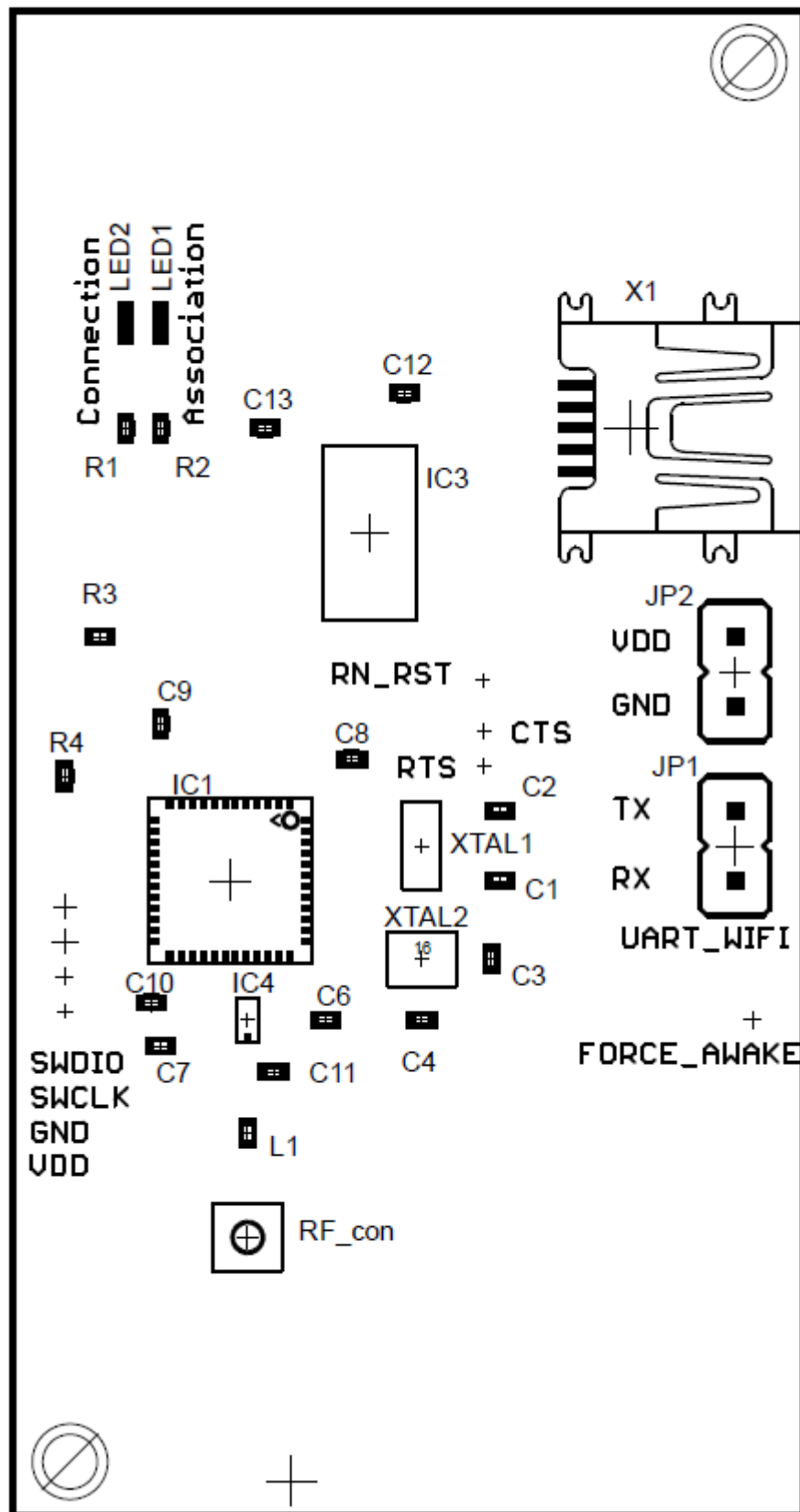
A.2 Anchor – Layout - top



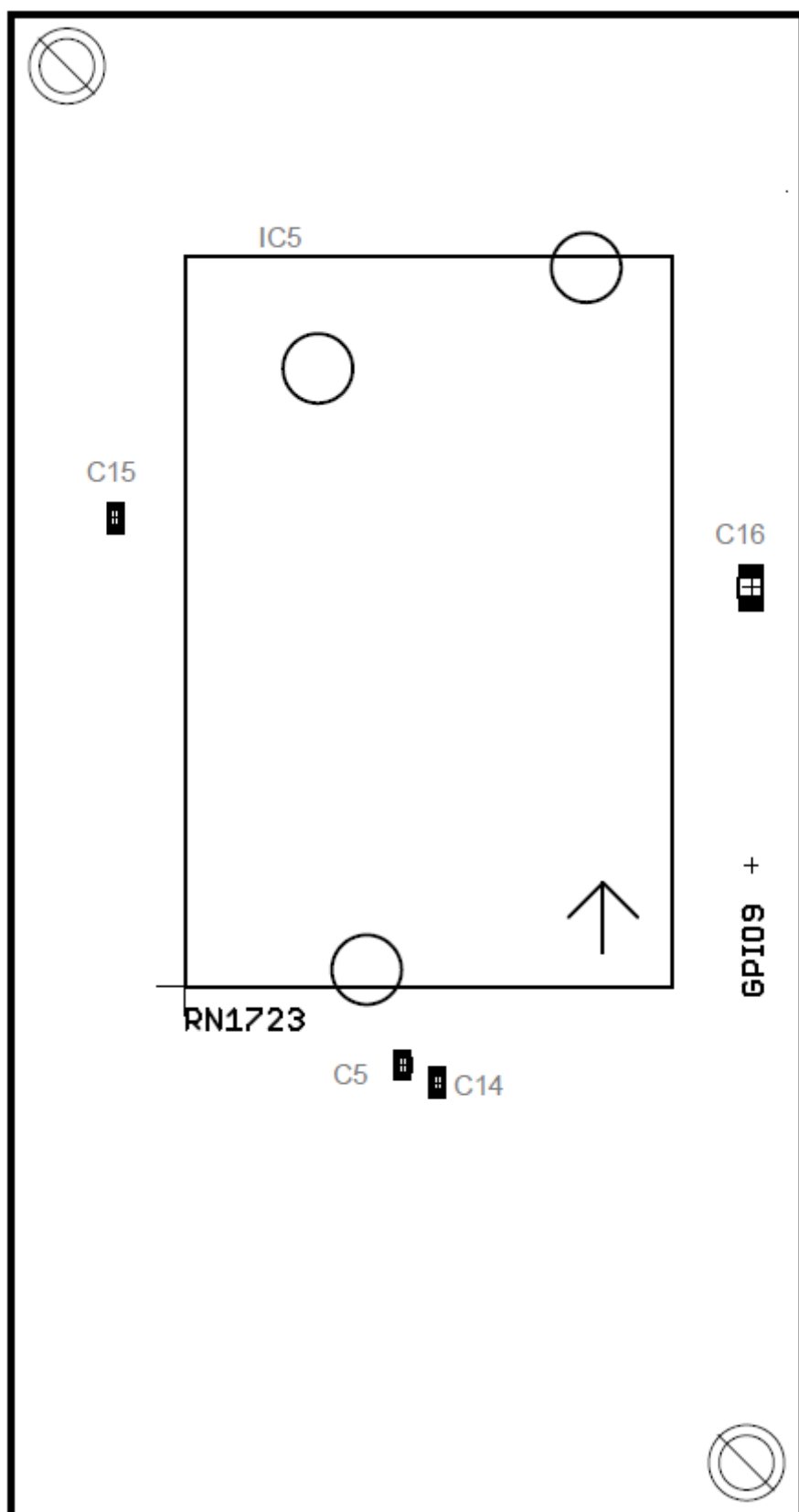
A.3 Anchor – Layout - bottom



A.4 Anchor – Osazovací výkres - top



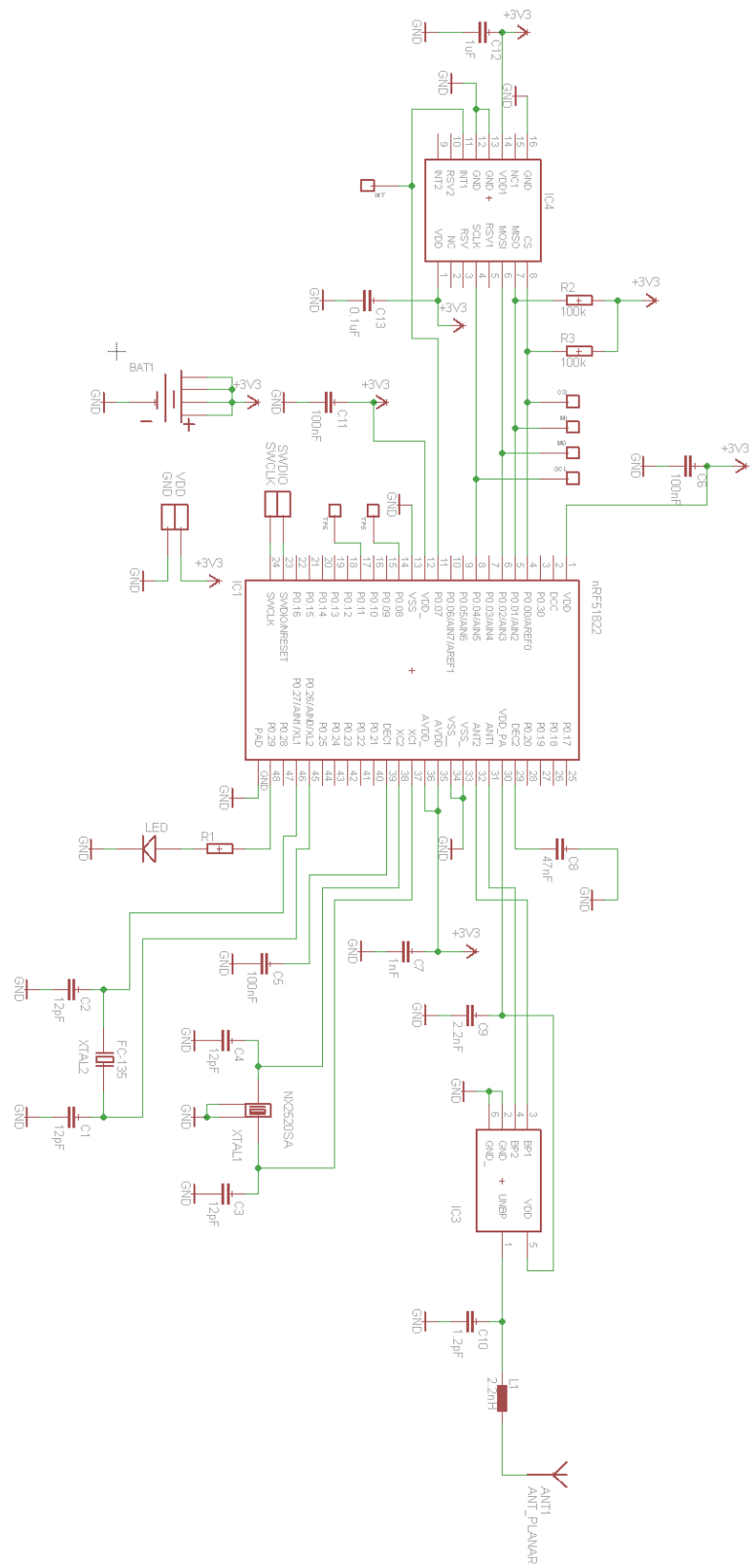
A.5 Anchor – Osazovací výkres - bottom



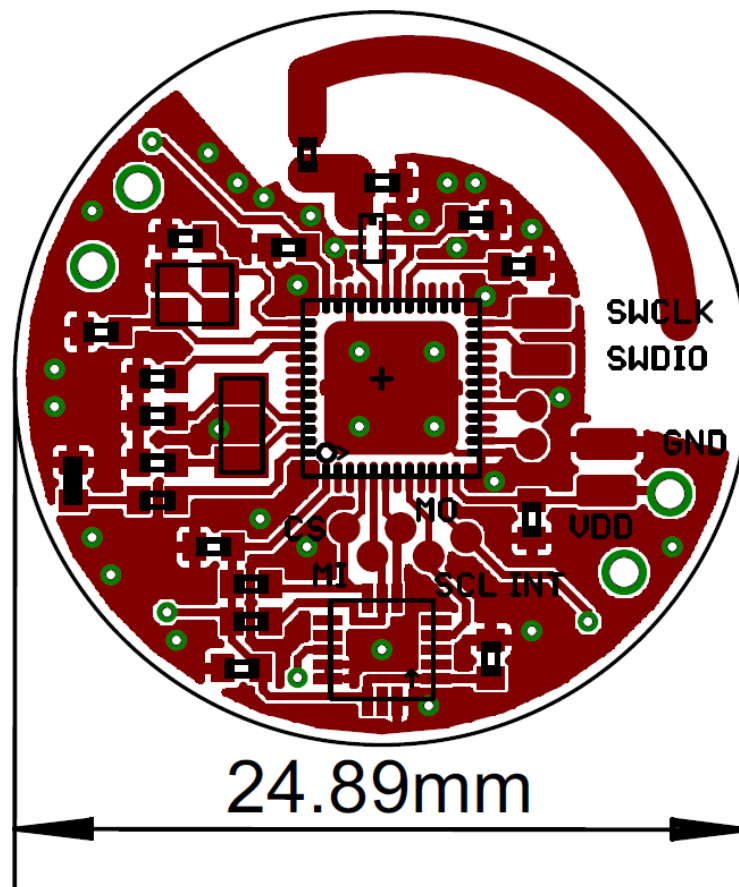
A.6 Anchor – Seznam součástek

Název	Hodnota	pouzdro
C1	12pF	C0402
C2	12pF	C0402
C3	12pF	C0402
C4	12pF	C0402
C5	100nF	C0402
C6	1nF	C0402
C7	47nF	C0402
C8	100nF	C0402
C9	100nF	C0402
C10	2.2nF	C0402
C11	2.2nF	C0402
C12	1uF	C0402
C13	1uF	C0402
C14	10uF	C0402
C15	1uF	C0402
C16	4.7uF	C0603
IC1	nRF51822	QFN48
IC3	ADP3338	SOT-223
IC4	P/N 2450BM14E0003	Balun
IC5	RN1723	WiFi modul
L1	2.2nH	L0402
LED1	Led association	LED0402
LED2	Led connection	LED0402
R1	10k	R0402
R2	10k	R0402
R3	0	R0402
R4	0	R0402
RF_con	MM8130	RF konektor
JP1	UART_WIFI	JP1
JP2	VDD	JP1
X1	MINI USB CONNECTOR	MINI USB konektor
XTAL1	32KHz	FC-135
XTAL2	16MHz	NXP2520

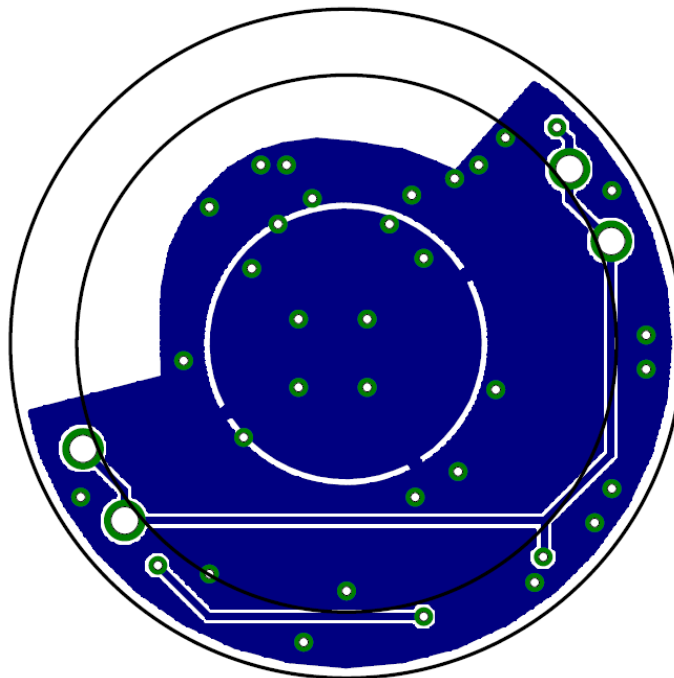
B.1 Tag – Schématický návrh



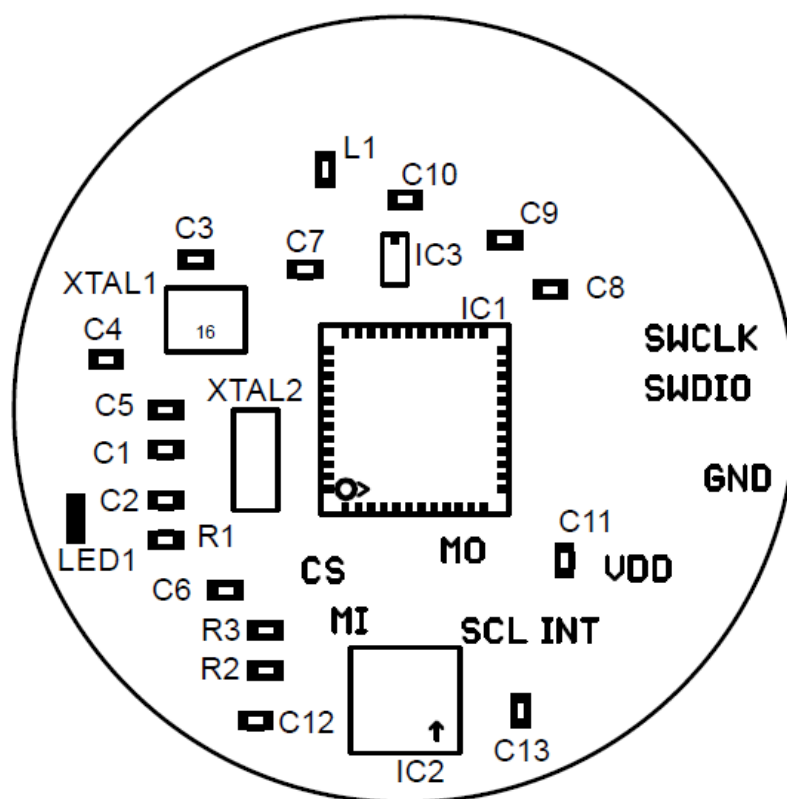
B.2 Tag – Layout - top



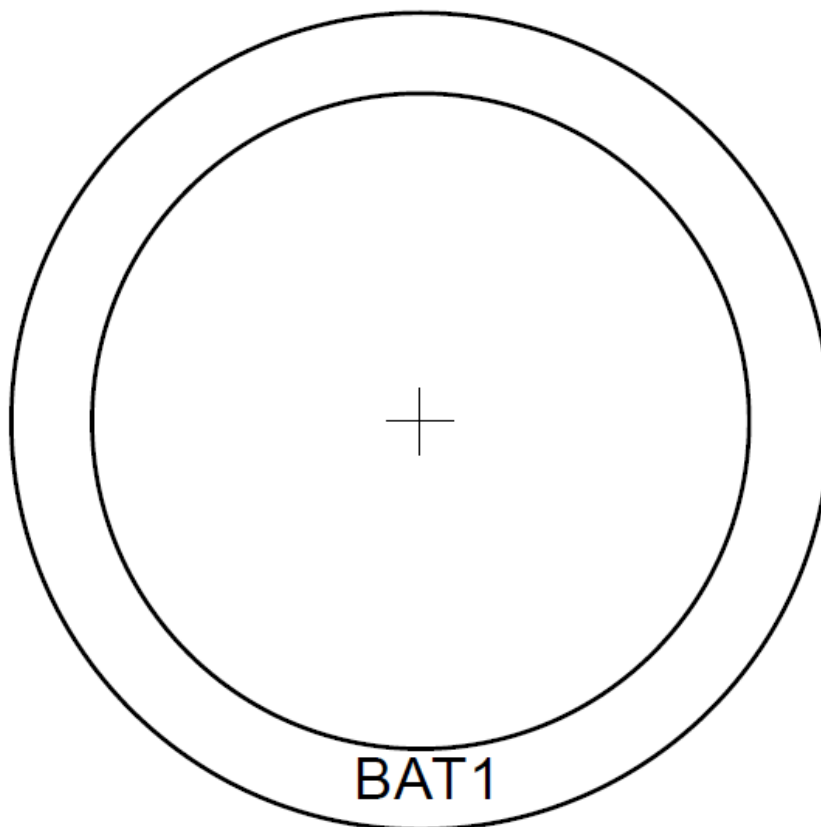
B.3 Tag – Layout - bottom



B.4 Tag – Osazovací výkres - top



B.5 Tag – Osazovací výkres - bottom



B.6 Tag – Seznam součástek

Název	Hodnota	Pouzdro
BAT1	CR2032	CR2032_THT_HOLDER
C1	12pF	C0402
C2	12pF	C0402
C3	12pF	C0402
C4	12pF	C0402
C5	100nF	C0402
C6	100nF	C0402
C7	1nF	C0402
C8	47nF	C0402
C9	2.2nF	C0402
C10	1.2nF	C0402
C11	100nF	C0402
C12	1uF	C0402
C13	0.1uF	C0402
IC1	nRF51822	QFN48
IC2	ADXL362	ADXL362_16LGA
IC3	P/N 2450BM14E0003	QFN
L1	2.2nH	L0402
LED1	LED	LED0402
R1	2.2k	R0402
R2	100k	R0402
R3	100k	R0402
XTAL1	16MHz	NX2520
XTAL2	32KHz	FC-135