

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Vojtěch Valenta

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Mobilní měřicí pracoviště pro monitoring pokrytí vybraných rádiových signálů

Vojtěch Valenta

Bakalářská práce

2017

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch Valenta**
Osobní číslo: **I14028**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Mobilní měřicí pracoviště pro monitoring pokrytí vybraných
radiových signálů**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Vytvořte mobilní měřicí pracoviště pro měření výkonu vybraných radiových signálů (FM, DVB-T, DAB) založené na využití SDR rádia a antén vhodných pro konkrétní službu. Jednotlivá měření budou obsahovat zaznamenaný výkon, GPS souřadnice, případně jiné informace vhodné pro další využití. Součástí práce bude aplikace umožňující zobrazit výsledky pokrytí signálem se zobrazenými mapovými podklady. Naměřená data bude dále možno exportovat do ostatních vybraných formátů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. Moderní radiotechnika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 767 s. ISBN 80-730-0132-2.
2. PROESCH, Roland. Signal analysis for radio monitoring. S.l.: Books On Demand, 2013. ISBN 978-373-2242-566.
3. PROESCH, Roland. Technical handbook for radio monitoring hf. S.l.: Books On Demand, 2013. ISBN 978-373-2241-422.
4. PROESCH, Roland. Frequency handbook for radio monitoring hf. S.l.: Books On Demand, 2013. ISBN 978-373-2242-207.
5. PROESCH, Roland a Aikaterini DASKALAKI-PROESCH. Technical handbook for radio monitoring vhf/uhf. S.l.: Books On Demand, 2013. ISBN 978-373-2241-477.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Pidanič, Ph.D.

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

31. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce:

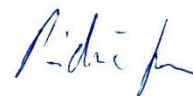
12. května 2017



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Jan Pidanič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2016

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 11. 5. 2017

Vojtěch Valenta

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Pidaničovi, Ph.D., za odborné vedení, věnovaný čas a podporu při řešení této práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přítelkyni a přátelům, za podporu při psaní práce a pomoc při provádění měření. Na závěr bych také rád poděkoval Fakultě Elektrotechniky a Informatiky Univerzity Pardubice za propůjčení vybavení a poskytnutí odborného zázemí.

ANOTACE

Práce je zaměřena na problematiku měření pokrytí radiových signálů a s tím i spojenou problematikou šíření radiového signálu. V teoretické části je zmíněn úvod do elektromagnetismu a digitálního zpracování signálů. Dále je pak rozebrána problematika softwarově definovaného rádia, přehled dostupných řešení, radiového monitoringu a určování polohy pomocí systému GPS. V praktické části je popsán vývoj aplikace v prostředí MATLAB, určené pro měření pokrytí s využitím SDR přijímače RTL-SDR a GPS přijímače Gmouse VK-162, a následné reprezentace naměřených dat. Na závěr práce jsou uvedena ukázková měření pokrytí vybraných radiových služeb, se zhodnocením jednotlivých měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Softwarově definované rádio, měření pokrytí, RTL-SDR, Gmouse VK-162, MATLAB

TITLE

The development of mobile workplace for monitoring of the selected radio signals

ANNOTATION

The work is focused on the measurement of radio signal coverage and related issues of radio signal propagation. The introduction to electromagnetism and digital signal processing is mentioned in the theoretical part. Next, the issue of software-defined radio is presented along with an overview of available solutions. Radio monitoring and positioning with a GPS system are also analyzed. In the practical part, the development of an application in the MATLAB environment, intended for coverage measurement and representation of measured data, is described. At the end of the thesis, examples of coverage measurements of selected radio services, are shown, with evaluation of individual measurements.

KEYWORDS

Software defined radio, signal coverage measurement, RTL-SDR, Gmouse VK-162, MATLAB

OBSAH

Úvod.....	13
1 Teoretická část	14
1.1 Elektromagnetismus.....	14
1.2 Šíření elektromagnetických vln.....	14
1.3 Výkonové poměry.....	16
1.4 Popis signálu v časové a spektrální oblasti	17
1.5 I/Q data.....	19
1.6 Softwarově definované rádio	20
1.7 Přehled SDR přijímačů	22
1.8 Rádiový monitoring	22
1.8.1 Účely monitoringu	22
1.8.2 Měření pokrytí rádiového signálu.....	23
1.8.3 Zaměřování zdroje neznámého signálu	23
1.9 Rádiové spektrum a služby v České republice.....	24
1.10 Parametry vybraných rádiových služeb.....	24
1.11 GPS.....	26
1.11.1 Standard NMEA 0183	28
2 Popis použitého hardwaru.....	29
2.1 USB přijímač RTL-SDR.....	29
2.2 GPS přijímač Gmouse VK-162.....	30
2.3 Výpočetní jednotka	32
3 Vývoj měřicí aplikace v prostředí Matlab	33
3.1 Popis aplikace.....	33
3.2 Záznamová část.....	33
3.2.1 Získání a zpracování I/Q dat.....	35
3.2.2 Výpočet kmitočtového spektra	36

3.2.3	Získání hodnot signálu ze spektra.....	36
3.2.4	Načtení a zpracování dat z GPS přijímače.....	37
3.2.5	Časování měření	38
3.2.6	Záznam a export hodnot	38
3.3	Prohlížeč naměřených dat	39
3.3.1	Mapové podklady	40
3.3.2	Vykreslení naměřených hodnot do mapy	41
3.3.3	Vykreslení časové osy měření	42
4	Měření pokrytí vybraných služeb	43
4.1	Metodika měření pokrytí.....	43
4.2	Použité antény a měřicí pracoviště.....	44
4.2.1	Anténa VUM-201	44
4.2.2	Anténa SRH-519.....	44
4.2.3	Teleskopická anténa pro příjem DVB-T.....	45
4.2.4	Anténa C37	45
4.2.5	Měřicí pracoviště	46
4.3	Měření pokrytí vybraných radiových signálů	47
4.3.1	Měření pokrytí signálu v pásmu 433–434 MHz	47
4.3.2	Měření pokrytí FM rozhlasu	49
4.3.3	Měření pokrytí služby DVB-T.....	50
4.3.4	Měření pokrytí služby LTE 800 – železniční koridor Praha – Pardubice	51
4.3.5	Měření pokrytí služby LTE 800 – pokrytí v zástavbě	52
	ZÁVĚR	54
	Použitá literatura	55
	Přílohy.....	60

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 - Znázornění elektromagnetické vlny [2]	15
Obrázek 2 - Diagram vícecestného šíření [4]	15
Obrázek 3 - Grafické znázornění poklesu výkonu šířením volným prostorem pro dvě různé frekvence [6]	17
Obrázek 4 - Zobrazení signálu v časové a spektrální oblasti [5]	18
Obrázek 5 - Grafická reprezentace signálu popsaného pomocí I/Q dat	20
Obrázek 6 - Blokové schéma ideálního softwarově definovaného rádia [9]	21
Obrázek 7 - (a) Baseband Digital Radio, (b) IF Digital Radio [9]	21
Obrázek 8 – Příklad zaměřování nouzového vysílače ze tří různých míst [14]	23
Obrázek 9 - Zjednodušené blokové schéma přijímače RTL-SDR [9]	29
Obrázek 10 – Přijímač RTL-SDR s krytem (vlevo) a bez krytu, s popisem klíčových obvodů(vpravo).....	30
Obrázek 11 - GPS přijímač Gmouse VK-162	31
Obrázek 12 - Ilustrační foto notebooku Dell 11z Touch [37].....	32
Obrázek 13 - Zjednodušené blokové schéma aplikace	33
Obrázek 14 - Uživatelské rozhraní záznamové části	34
Obrázek 15 - Nastavení parametrů měření	35
Obrázek 16 - Detail vypočítaného spektra.....	36
Obrázek 17 - Grafická reprezentace naměřených hodnot.....	37
Obrázek 18 - Číselné zobrazení naměřených hodnot	37
Obrázek 19 - Výpis pozice.....	37
Obrázek 20 - Časová osa	38
Obrázek 21 - Exportovaná data	39
Obrázek 22 - Uživatelské rozhraní prohlížeče naměřených dat	39
Obrázek 23 - Struktura souboru popisujícího meze mapy.....	40
Obrázek 24 - Uložení výřezu ze stránky OpenStreetMap	40
Obrázek 25 - Vykreslení dat do mapy a) scatter, b) signal strength map	41
Obrázek 26 - Vysílací aktivita na frekvenci 433,8 MHz se šířkou pásma 10 kHz.....	42
Obrázek 27 – Příklad plánu trasy měření.....	43
Obrázek 28 - Anténa VUM-201	44
Obrázek 29 - Anténa SRH-519	45
Obrázek 30 - Teleskopická anténa.....	45

Obrázek 31 - Anténa C37	45
Obrázek 32 - Měřicí pracoviště ve vozidle	46
Obrázek 33 - Měřicí pracoviště pro pěší měření.....	46
Obrázek 34 - Fotografie stanoviště vysílače.....	47
Obrázek 35 - Mapa pokrytí signálu v pásmu 433 MHz – typ scatter	48
Obrázek 36 - Mapa pokrytí signálu v pásmu 433 MHz – typ strength map.....	48
Obrázek 37 - Mapa pokrytí signálu FM rozhlasu – scatter map.....	49
Obrázek 38 - Mapa pokrytí signálu FM rozhlasu – strength map	49
Obrázek 39 – Předpokládaný rozsah pokrytí (dle RRTV) [44]	50
Obrázek 40 - Mapa pokrytí signálu DVB-T – scatter map.....	50
Obrázek 41 - Mapa pokrytí signálu DVB-T – strength map	51
Obrázek 42 - Časový průběh měření pokrytí signálu LTE 800 na železničním koridoru	51
Obrázek 43 - Mapa pokrytí signálu LTE 800 na železničním koridoru - typ scatter	52
Obrázek 44 - Mapa pokrytí signálu LTE 800 v zástavbě – typ scatter.....	52
Obrázek 45 - Mapa pokrytí signálu LTE 800 v zástavbě – typ strength map	53
Tabulka 1 - Přehled SDR přijímačů [11]	22
Tabulka 2 - Rozdělení spektra dle ITU (uvedeno do 300 GHz) [16]	24
Tabulka 3 - Parametry vybraných rádiových služeb [15].....	25
Tabulka 4 - Souhrn základních parametrů RTL-SDR (R820T2 a RTL2832U) [28] [35].....	30
Tabulka 5 - Parametry GPS přijímače Gmouse VK-162 [36]	31

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

I/Q	In phase/Quadrature phase
FT	Fourierova Transformace
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
SDR	Softwarově Definované Rádio
AGC	Automatic Gain Control
AFC	Automatic Frequency Control
PC	Personal Computer
USB	Universal Serial Bus
ITU	International Telecommunication Union
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ADS-B	Automatic Dependence Surveillance – Broadcast
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
FM	Frekvenční Modulace
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
DAB	Digital Audio Broadcasting
GSM	Globální Systém pro Mobilní komunikaci
LTE	Long Term Evolution
GPS	Global Positioning System
NMEA	National Marine Electronics Association

ÚVOD

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku měření pokrytí radiových signálů a s tím i spojenou problematikou šíření radiového signálu. Výstupem práce je aplikace, umožňující měření pokrytí radiových služeb, v rozsahu 24 MHz až 1766 MHz, a následné prohlížení naměřených dat. Součástí práce jsou také výstupy uskutečněných měření.

V teoretické části je nejprve popsán úvod do elektromagnetismu, šíření elektromagnetických vln a digitálního zpracování signálů. Dále je pak rozebrána problematika softwarově definovaného rádia a přehled dostupných řešení, radiového monitoringu a parametry vybraných radiových služeb, dostupných na území České republiky. V neposlední řadě je také popsán systém GPS a komunikační standard NMEA 0183.

V praktické části je popsán použitý hardware a vývoj aplikace s uživatelským rozhraním v prostředí MATLAB R2016b. Tato aplikace je určena především pro měření přijatého výkonu, s využitím SDR přijímače RTL-SDR a určením polohy měření pomocí GPS přijímače Gmouse VK-162. Díky těmto záznamům je následně možné sestavit mapu pokrytí. Dále je popsána problematika reprezentace naměřených dat do mapových podkladů (scatter map a strength map) a vykreslení grafu časové osy měření. Rozsah měřitelných kmitočtů je omezen přijímačem RTL-SDR, který umožňuje přijímat frekvence v rozsahu 24 MHz až 1766 MHz, se šířkou spektra 2,4 MHz. Na závěr práce jsou uvedeny výsledky uskutečněných měření pokrytí vybraných radiových služeb, s grafickými výstupy a zhodnocením jednotlivých měření.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Elektromagnetismus

Elektromagnetismus je oblast, jenž se zabývá souvislostmi a pravidly, vzájemného působením elektrického a magnetického pole, která se za určitých podmínek společně šíří prostorem ve formě elektromagnetické vlny. Toho využíváme v oblasti drátové i bezdrátové techniky (včetně optických spojů). Odvození rovnic, popisujících elektromagnetické pole, předcházelo množství dílčích objevů a experimentů. Velkou zásluhu na objevech v této oblasti měl Michael Faraday, který ze svých pokusů odvodil zákon elektromagnetické indukce. Všechny tehdejší poznatky však sjednotil až James Clerk Maxwell, který svými rovnicemi popsal provázanost elektrického a magnetického pole a jejich vlastnosti.

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho_f, \quad \oiint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q_f \quad 1.1$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad 1.2$$

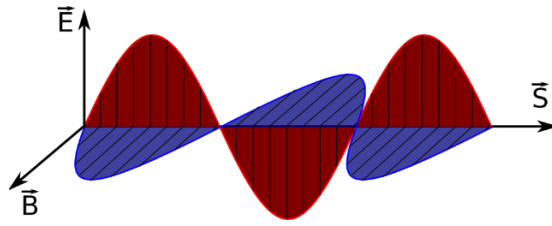
$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad 1.3$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_f + \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad 1.4$$

Uvedené rovnice označujeme jako soustavu hlavních Maxwellových rovnic v diferenciálním a integrálním tvaru. [1]

1.2 Šíření elektromagnetických vln

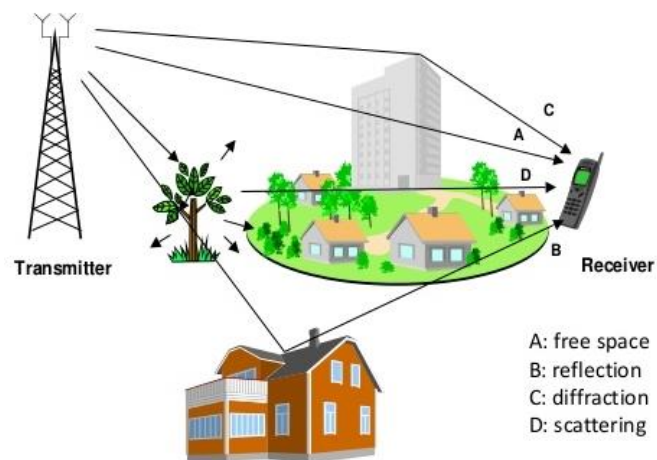
Směr šíření elektromagnetické vlny v prostoru charakterizuje Poyntingův vektor. Ten je popsán vektorovým součinem elektrické (intenzita elektrického pole \mathbf{E}) a magnetické (elektrická indukce \mathbf{B} , či intenzita magnetického pole \mathbf{H}) složky vlny (viz. Obrázek 1).



Obrázek 1 - Znárodnění elektromagnetické vlny [2]

Šíření elektromagnetické vlny volným prostorem je však značně ovlivňováno kmitočtem vlny a prostředím, kterým prostupuje. Základní způsob šíření radiového signálu je přímou vlnou, tedy při přímé viditelnosti z vysílače na přijímač. Zjevným problémem pro bezproblémové šíření přímé vlny je fyzická překážka, například v podobě budovy nebo kopce. Jestli bude šíření vlny ovlivněno záleží především na rozměrech překážky a vysílacím kmitočtu. Elektromagnetické vlna má totiž tu vlastnost, že se odrazí pouze od překážek, které jsou větší než její vlnová délka, jejíž výpočet je uveden níže (1.5). Dalším případem šíření vlny je jejím odrazem od překážky. V tomto případě se může odražená vlna sčítat s přímou a nastává situace, kterou nazýváme vícecestné šíření (multipath). Tyto případy ilustruje Obrázek 2. Zvláštním případem je pak odraz od ionosféry. Ionosféru dělíme do 4 základních vrstev (D, E, F1, F2), přičemž každá vrstva působí na různé kmitočty jinak. Obecně platí, že se zvyšující se výškou procházejí danými vrstvami signály vyšších kmitočtů. Při použití vhodného kmitočtu je pak možné navázat odrazem spojení s přijímačem, který je umístěný za překážkou v rádiovém stínu. [3]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 1.5$$



Obrázek 2 - Diagram vícecestného šíření [4]

1.3 Výkonové poměry

Popis přenosového kanálu je v oblasti rádiové komunikace klíčový pro správné dimenzování vysílacího výkonu a zisku vysílací a přijímací antény. K tomuto účelu slouží radiokomunikační rovnice (1.6), která v níže uvedeném tvaru dovoluje výpočet výkonu, přijatého na anténě přijímače. Ze zmíněné rovnice zároveň vyplývá, že přijatý výkon při zvětšování vlnové délky a klesá s převrácenou druhou mocninou vzdálenosti. [5]

$$P_r = P_t G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 L_\varphi L_p G_r \quad 1.6$$

P_r – Přijatý výkon [W]

P_t – Vyslaný výkon [W]

G_t – Zisk vysílací antény [-]

λ – Vlnová délka [m]

d – Vzdálenost [m]

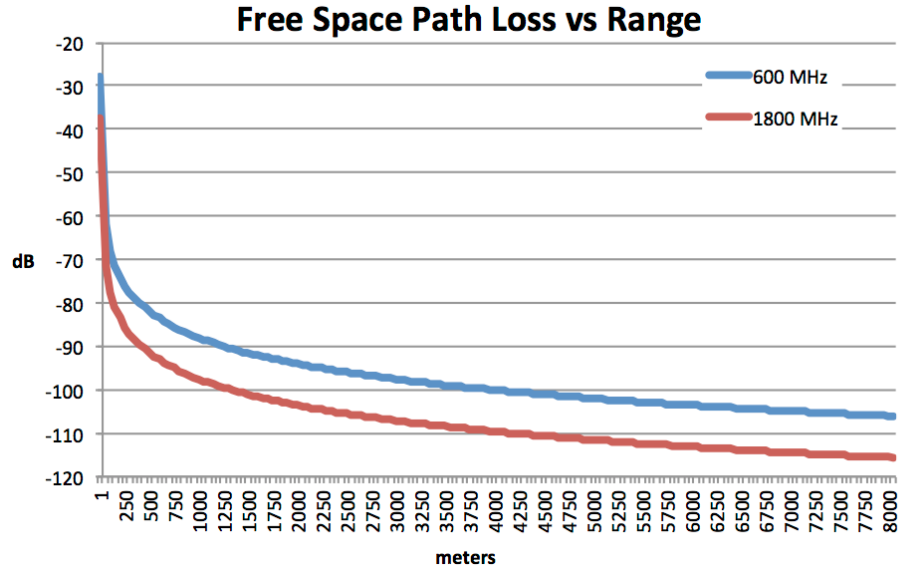
L_φ – Ztráty nepřesným zaměřením [W]

L_p – Polarizační ztráty [W]

G_r – Zisk antény přijímače [-]

Výše zmiňovaný pokles výkonu s převrácenou druhou mocninou vzdálenosti je důsledkem útlumu vlny při šíření volným prostorem (Free-space path loss), občas také nazývaný ředění výkonu. Tento jev popisuje rovnice (1.7), která je také součástí radiokomunikační rovnice (1.6). Pokles výkonu s vzdáleností ilustruje Obrázek 3.

$$FSPL = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad 1.7$$



Obrázek 3 - Grafické znázornění poklesu výkonu šířením volným prostorem pro dvě různé frekvence [6]
 Výkon, útlum či zesílení jsou, kromě wattů, často vyjadřovány v decibelech (dB). Decibely, tedy desetina Belu, jsou definovány jako bezrozměrná poměrná jednotka, vynášená v logaritmicím měřítku. Následující vztahy platí pro přepočtení poměrů výkonu a napětí.

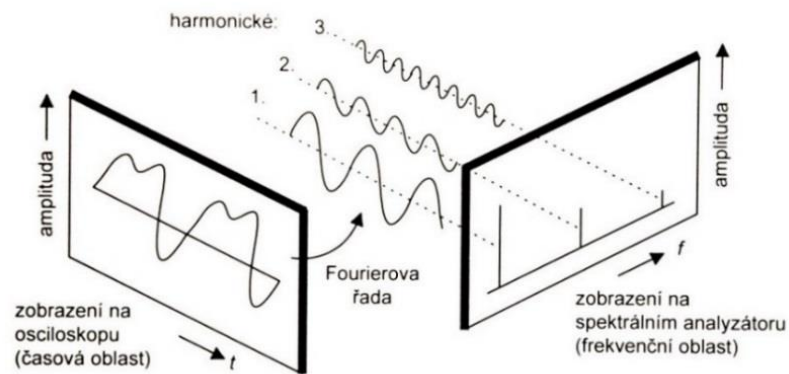
$$N_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad 1.8$$

$$N_{UdB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad 1.9$$

1.4 Popis signálu v časové a spektrální oblasti

Každý periodický signál lze rozložit na harmonické složky. Vztah, známý jako Fourierova řada (1.9), uvádí přepočtení daného periodického signálu na stejnosměrnou složku, a na harmonické (sinové a kosinové) složky.

$$x(t) = a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi f_0 t) + b_n \sin(2\pi f_0 t)] \quad 1.10$$



Obrázek 4 - Zobrazení signálu v časové a spektrální oblasti [5]

Základním nástrojem pro transformaci signálu z časové do spektrální oblasti je Fourierova transformace (FT) (1.10). Převod z frekvenční oblasti do časové je pak nazýván zpětná Fourierova transformace (1.11).

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad 1.11$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad 1.12$$

Výše uvedené rovnice (1.10, 1.11) jsou použitelné pro přepočítání signálu spojitého v čase. Pro zpracování diskrétního signálu se používá Diskrétní Fourierova transformace (1.12).

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \cdot e^{-j\omega kn/N} \quad 1.13$$

Efektivnějším způsobem výpočtu DFT je pak rychlá Fourierova transformace, zkráceně FFT (z anglického Fast Fourier Transform), což je metoda, která násobně zrychluje přepočítání signálu z časové oblasti do frekvenční. [5]

1.5 I/Q data

Vhodná reprezentace navzorkovaného signálu, je důležitý předpoklad pro jeho další číslicové zpracování, jako filtrace, demodulace apod. I/Q data jsou pro digitální zpracování mnohem vhodnější než klasická cesta digitalizace, v podobě převodu absolutní hodnoty signálu pomocí A/D převodníku. Jejich výhoda spočívá především v zachování fáze digitalizovaného signálu a také v možnosti určení „kladných“ a „záporných“ frekvencí. Samotné označení dat „I/Q“ je zkrácenou verzí pro výraz z anglického jazyka: „In phase/Quadrature phase“, což je označení pro vzorky, modulované pomocí kvadrurní modulační. I/Q data lze reprezentovat různými způsoby.

V komplexní rovině

$$Z = I + Qi, \quad 1.14$$

kde I je reálná a Q je imaginární část komplexního čísla Z (viz. Obrázek 5). Pokud jsou data výstupem z AD převodníku a I/Q demodulátoru, považujeme je za hodnoty napětí. Lze se také setkat s uvedením ve tvaru vektoru $[I, Q]$ nebo pouze jako dvě samostatná čísla I a Q .

Polární forma

$$I = A \cdot \cos(\varphi), \quad 1.15$$

$$Q = A \cdot \sin(\varphi). \quad 1.16$$

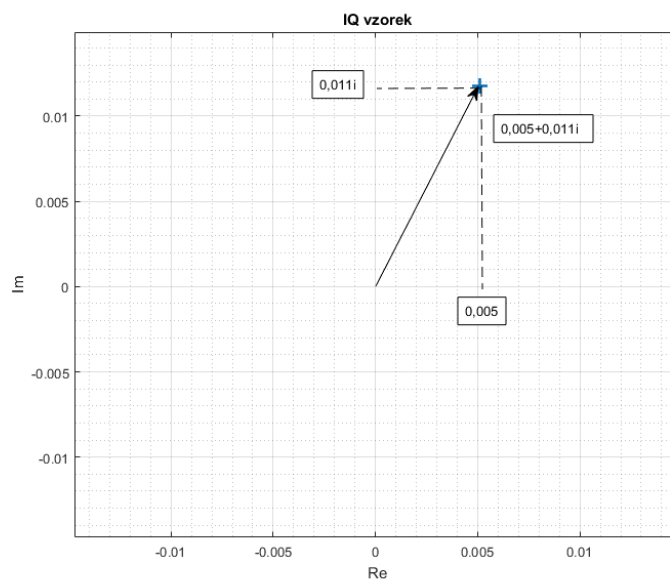
V rovnici 1.15 představuje I výslednou hodnotu reálné složky, A je amplituda a φ je fázový úhel, který reprezentuje pozici na úseku jedné periody (od 0° do 360°), pro kterou provádíme výpočet. Při výpočtu kvadrurní složky Q (vztah 1.16) se postupuje obdobně.

Eulerova forma

$$A \cdot \cos(\varphi) + i \cdot A \cdot \sin(\varphi) = A \cdot e^{i\varphi} \quad 1.17$$

Zde A představuje amplitudu, φ je fázový úhel a e je Eulerovo číslo ($e \approx 2,718$). V tomto tvaru tedy nepracujeme s IQ složkami, ale s Amplitudou vzorku a jeho fází.

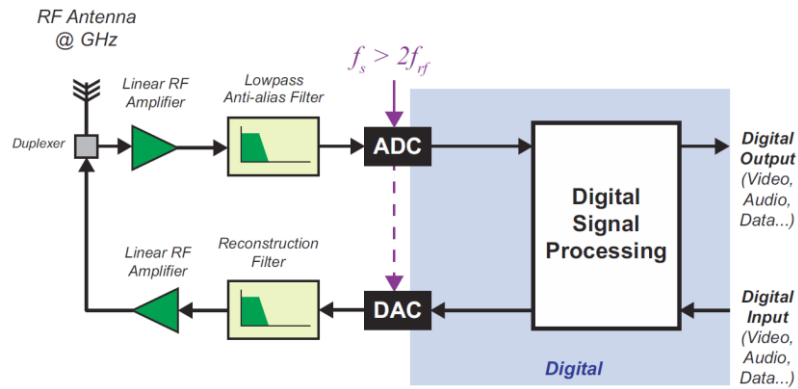
Z hlediska demodulace a následného zpracování dat v digitální technice, je však rozšířená reprezentace I/Q dat především pomocí komplexních čísel, a to především kvůli jednoduchosti modulační a demodulační, viz. Obrázek 5. [7] [8].



Obrázek 5 - Grafická reprezentace signálu popsaného pomocí I/Q dat

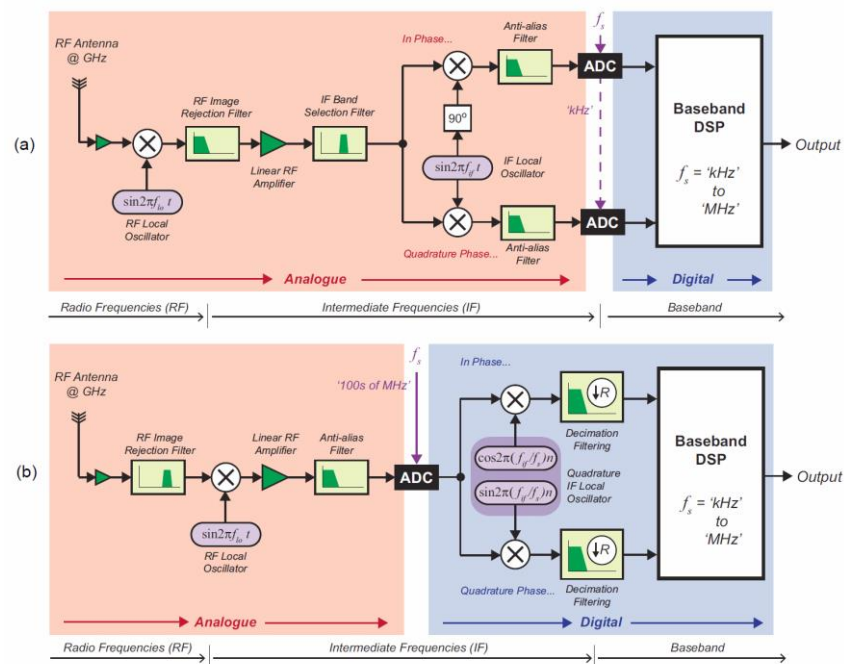
1.6 Softwarově definované rádio

Tradiční rádiový přijímač se skládá ze směšovače, zesilovače, obvodů AGC či AFC, filtrů, demodulátoru a dalších podpůrných obvodů. Přičemž všechny tyto části fyzicky existují jako integrovaný obvod, či jako kombinace diskretních součástek a nacházejí se na desce plošných spojů. Softwarově definované rádio se odlišuje především tím, že demodulace, obvody AGC a AFC, a v některých případech i filtrace, se provádí softwarově, uvnitř signálového procesoru (DSP), či na PC (viz. Obrázek 6). Nesporná výhoda spočívá v univerzálnosti takového rádia, kdy je možné pouze úpravou softwaru uvnitř signálového procesoru změnit modulaci, přenosový protokol či zabezpečení přenosového kanálu. Zmíněná modularita je výhodná především v oblasti vývoje komunikačních protokolů a také v případě, že je třeba, v reakci na změnu parametrů přenosového kanálu, měnit úroveň zabezpečení přenášené informace. Jako nevýhodu lze považovat vyšší nároky SDR rádia na kvalitu vstupních obvodů (což přímo ovlivňuje úroveň šumu systému), výpočetní výkon signálového procesoru (DSP), který má za následek vyšší spotřebu elektrické energie a také vyšší pořizovací náklady SDR rádií, disponujících možností vysílat. Softwarově definované rádio tedy najde uplatnění především v oblastech výuky, vývoje komunikačních systémů a v aplikacích, vyžadujících digitální zpracování radiového signálu. [9]



Obrázek 6 - Blokové schéma ideálního softwarově definovaného rádia [9]

Ideální softwarově definované rádio (schéma na Obrázek 6) dle definice obsahuje pouze duplexer, nízkosumový zesilovač (LNA), anti-aliasingový filtr, A/D převodník a signálový procesor (DSP). Taková architektura se nazývá zero-IF Digital Radio, v překladu rádio bez převodu signálu na mezifrekvenci. Tato architektura však klade vysoké nároky na dostatečnou šířku pásma A/D převodníku. Vhodnější provedení je tedy rádio s převodem na mezifrekvenci. Zde se však můžeme setkat se dvěma přístupy. První, označovaný jako Baseband Digital Radio (Obrázek 7 (a)), obsahuje hardwarový I/Q demodulátor se dvěma výstupy (složky I a složky Q) a následně A/D převodníky pro obě větve. Druhým přístupem je upuštění od hardwarového I/Q demodulátoru a použití pouze jednoho A/D převodníku (Obrázek 7 (b)). Demodulace I/Q složek se potom provádí softwarově, uvnitř signálového procesoru (DSP). [10], [9]



Obrázek 7 - (a) Baseband Digital Radio, (b) IF Digital Radio [9]

1.7 Přehled SDR přijímačů

Velká výhoda, oproti profesionálním přijímačům, je především jejich cena. V případě přijímače RTL-SDR, který je z uvedených nejlevnější, se tak za velmi příznivou cenu otevírají dveře k průzkumu kmitočtového pásma například radioamatérům, nadšencům do radiotechniky, nebo studentům elektrotechniky a komunikačních systémů. V následující tabulce jsou uvedeny nejběžnější dostupné SDR přijímače. Nutno podotknout, že některé SDR přijímače disponují také možností vysílat, avšak poměrně malým výkonem, v řádech setin wattů.

Tabulka 1 - Přehled SDR přijímačů [11]

Jméno	Rozsah [MHz]	Šířka pásma [MHz]	Rozlišení ADC [Bity]	Možnost vysílání (Ano/Ne)	Cena od [\$USD]
RTL-SDR	24-1766	3,2	8	Ne	20
Airspy Mini	24-1750	6	12	Ne	99
SDRPlay	0,01-2000	10	12	Ne	130
Airspy R2	24-1750	10	12	Ne	169
LimeSDR	0,1-3800	61,44	12	Ano (Duplex)	299
HackRF One	1-6000	20	8	Ano (Semi duplex)	299
BladeRF	300-3800	28	12	Ano (Duplex)	420
USRP B200	70-6000	56	12	Ano (Duplex)	800

1.8 Rádiový monitoring

Rádiový monitoring je činnost, při které je získávána informace o hodnotách a parametrech sledovaného rádiového signálu (přijatý výkon či napětí na přijímací anténě). Sledování může být zaměřeno na sledování přijatého výkonu signálu v závislosti na poloze přijímače (měření pokrytí krajiny signálem), čase příjmu, kombinaci obojího, či na určení místa vysílání.

1.8.1 Účely monitoringu

Základním účelem monitoringu rádiového spektra je dohled nad dodržováním předpisů pro využívání dané frekvence, které jsou stanovené v Národní kmitočtové tabulce. Kontrolu využívání a narušování rádiového spektra v České republice provádí Český Telekomunikační Úřad (ČTU). Tento úřad využívá k celoplošnému monitorování území České republiky systém ASMKS (Automatizovaný Systém Monitorování Kmitočtového Spektra), který

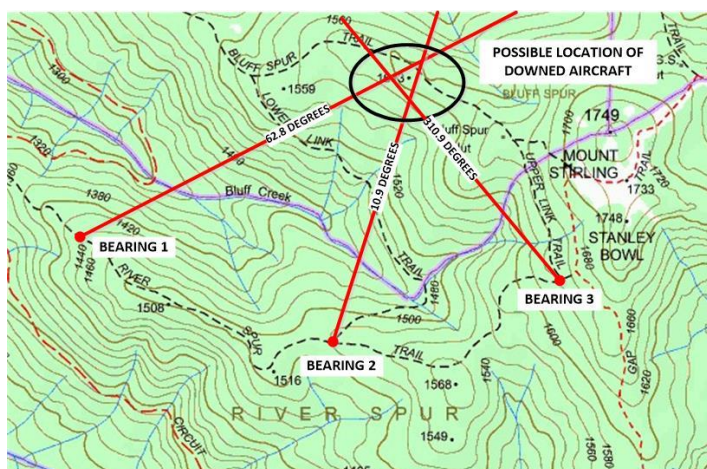
zajišťuje nepřetržitý dohled nad rádiovým spektrem v oblasti od 9 kHz do 3 GHz. Pro monitorování vyšších kmitočtů (do 40 GHz) je využíváno mobilních stanic. [12].

1.8.2 Měření pokrytí rádiového signálu

Měření pokrytí se rozumí sběr naměřených parametrů zájmového signálu a polohy, případně čas pořízení jednotlivých kroků měření. Důležitým faktorem je zájmová oblast měření. Ta rozhoduje o způsobu provedení měření. V případě měření pokrytí železniční tratě mobilním signálem se nabízí provedení měření ze speciálně vypravené měřicí soupravy nebo ze soupravy běžného osobního spoje. V případě měření plošného pokrytí je použití k přesunu měřicí soupravy oblastí osobní automobil.

1.8.3 Zaměřování zdroje neznámého signálu

Zaměřování lokace vysílání signálu, v angličtině označované jako Direction finding, je činnost, při které se zjišťuje směr vysílání zájmového signálu, vůči přijímači. První způsob je hledání směru s jediným přijímačem s připojeným anténním systémem. Případně s využitím jedné mobilní směrové antény. Tento způsob nazýváme Angle of Arrival (AOA). Pro nalezení místa vysílání lze využít také metodu měření pokrytí rádiového signálu, popsanou výše, přičemž vyhodnocením naměřených dat lze následně určit z místa největšího přijatého výkonu místo pravděpodobného výskytu vysílače. Druhý způsob je s využitím více přijímačů ve stejnou dobu. V tomto případě je možné použít metody Time Difference of Arrival (TDOA), což je metody využívající porovnání rozdílů časů příjmu stejného signálu různými přijímači, a metoda Angle of Arrival (AOA) (viz. Obrázek 8). Možné je i zkombinovat obě metody a vytvořit tak hybridní systém. [13]



Obrázek 8 – Příklad zaměřování nouzového vysílače ze tří různých míst [14]

1.9 Rádiové spektrum a služby v České republice

V České republice je konkrétní rozdělení frekvenčního pásma a podmínky využití kmitočtů stanoveno Národní kmitočtovou tabulkou. Tento dokument vydává Ministerstvo průmyslu a obchodu. Zatím poslední verze tohoto dokumentu byla vydána v roce 2010 a vychází z Radiokomunikačního řádu Mezinárodní telekomunikační unie (ITU), jehož aktuální verze byla v roce 2007 přijata na Světové radiokomunikační konferenci Mezinárodní telekomunikační unie. Národní kmitočtová tabulka je součástí rozsáhlejšího dokumentu. Plánu přidělení kmitočtových pásem, který mimo jiné stanoví technické vlastnosti vysílačích a přijímacích zařízení a určuje postupy při přidělování kmitočtových pásem radiokomunikačním službám. V oboru radiokomunikací je zažito dělení spektra dle doporučení ITU-R, které bylo přijato v roce 2015 v Ženevě (viz. Tabulka 2). [15]

Tabulka 2 - Rozdělení spektra dle ITU (uvedeno do 300 GHz) [16]

Číslo	Symbol	Rozsah kmitočtů	Metrické označení
3	ULF	300-3000 Hz	Hektokilometrové vlny
4	VLF	3-30 kHz	Myriametrové vlny
5	LF	30-300 kHz	Kilometrové vlny
6	MF	300-3000 kHz	Hektometrové vlny
7	HF	3-30 MHz	Dekametrové vlny
8	VHF	30-300 MHz	Metrové vlny
9	UHF	300-3000 MHz	Decimetrové vlny
10	SHF	3-30 GHz	Centimetrové vlny
11	EHF	30-300 GHz	Milimetrové vlny

1.10 Parametry vybraných rádiových služeb

Pro měření pokrytí rádiových signálů je nezbytné znát jejich základní parametry, jako umístění vysílače, vysílací výkon a frekvence, šířka pásma, kanálová rozteč, typ modulace, znalost rozsahu území předpokládaného pokrytí a u některých služeb také časový rozvrh provozu. Vysílací výkon je občas udáván ve tvaru EIRP (Efektivní izotropní vyzařovaný výkon) který udává výkon vyzářený vysílací anténou oproti izotropnímu zářiči. Jeho výpočet je uvádí vztah 1.18, kde P_t je vysílaný výkon ve Watech a G_t je zisk vysílací antény v bezrozměrných jednotkách. [5]

$$EIRP = P_t \cdot G_t$$

1.18

Tabulka 3 - Parametry vybraných rádiových služeb [15]

Služba	Kmitočty	Šířka pásma	Modulace
FM rozhlas	87,5-108 MHz	150 KHz	FM
DAB III. TV pásmo	174-230 MHz	1,536 MHz	OFDM
DAB pásmo L	1452-1492 MHz	1,536 MHz	OFDM
DVB-T	470-598, 678-750 MHz	8 MHz	OFDM
LTE 800	791-862 MHz	10 MHz	OFDM
GSM 900	876-960 MHz	200 kHz	GMSK

FM rozhlas

FM rozhlas je služba s kmitočtovým přidělem 87,5-108 MHz. Vysílací výkony se pohybují od desítek wattů pro malá rádia regionálního významu, až po desítky kilowatt u velkých komerčních stanic. (doplnit)

DAB rozhlas

DAB neboli Digital Audio Broadcasting, je služba digitálního rádia. Služba má za účel, podobně, jako digitální televize, zefektivnit přenos veřejného rozhlasu, především použitím multiplexů (6-20 programů v jednom multiplexu), digitální modulace a audio kodeků (DAB, DAB+). [17]

DVB-T

Digital Video Broadcasting (DVB), je pozemní televizní vysílání určené k pokrytí území České republiky systémem digitální televize.

LTE 800

System LTE slouží k pokrytí území vysokorychlostním mobilním internetem. Konkrétně LTE 800 (název odvozený od frekvenčního přidělu 791-862 MHz) je v České republice využíván mobilními operátory k celoplošnému pokrytí území. Na území jednotlivých měst je pak k dispozici služba LTE 2600. [18]

GSM 900

GSM 900 je rozděleno do 124 kanálů a souhrnný název, pro 3 samostatně vystupující. První je GSM-R (uplink 876-880, downlink 921-925 MHz), které je používáno především pro komunikaci na železnicích, druhé E-GSM (880-890/925-935 MHz) a třetí P-GSM (890-915/935-960 MHz). Poslední dvě zmíněná pásma jsou mobilními operátory využívána v rámci veřejné telekomunikační sítě. [18]

1.11 GPS

Globální poziční systém je založen na určení polohy dle rozdílu času příchodu GPS zpráv. Satelity vysílají pravotočivý kruhově polarizovaný signál na dvou frekvencích. První frekvence, označovaná jako L1 má nosnou na frekvenci 1575,42 MHz. Tato frekvence je modulována dvěma kódy. Kód C/A (coarse/acquistion) obsahuje data, používaná v civilních přijímačích GPS a kód P/Y (precision/secure), který je určen pro vojenské a na zvláštní povolení také pro civilní využití. Druhá frekvence, s nosnou na frekvenci 1227,6 MHz, nese označení L2. Data, která jsou modulována na frekvenci L2 jsou používána výhradně pro přesné zaměřování a vyhodnocování ionosférického zpoždění. [19]

DGPS

DGPS je označení Diferenční GPS, což je podpůrný systém družicové navigace, využívající síť pozemních vysílačů GPS signálu. Tento systém přispívá ke zvýšení přesnosti určení polohy. Pro C/A kód se hodnoty bez DGPS pohybují v rozmezí 5 až 10 m, s použitím DGPS pak mezi 0,7 a 3 m. V případě P/Y kódu pak 2 až 9 m bez DGPS a 0,5 až 2 m s aktivním diferenčním módem. [19] [20]

Vesmírný segment

Skládá se z minimálně 24 aktivních satelitů, které jednocestně vysílají signály, používané k určení zeměpisné polohy a času.

Kontrolní segment

Kontrolní segment tvoří pozemní stanice, umístěné na různých lokacích kolem světa. Tyto stanice zejména monitorují stav satelitů, jejich oběžné dráhy a systému jako celku, dále provádí korekce dráhy a palubních hodin družic, a také satelitům nahrávají aktuální navigační data.

Uživatelský segment

Uživatelský segment je tvořen přijímači GPS signálů, které z přijatých dat vypočítají polohu přijímače a aktuální čas. Z těchto údajů je možné dalšími výpočty určit také rychlost a kurs.

TTF

TTF neboli Time To First Fix, je termín, který označuje časový úsek od zapnutí GPS přijímače a prvního určení polohy. Jeho výpočet je uveden ve vztahu 1.19. Tento čas se může lišit v závislosti na době uběhlé, od předchozích výpočtů polohy. V praxi výrobci uvádějí pouze souhrnné hodnoty pro různé scénáře (horký start, teplý start, studený start).

$$TTF = T_{warm-up} + T_{acq} + T_{track} + T_{navMessage} + T_{navSolution} \quad 1.19$$

$T_{warm-up}$ – čas naběhnutí přijímače včetně softwarových a hardwarových částí

T_{acq} – doba potřebná k přijmutí GPS signálů

T_{track} – čas nutný k získání stabilních výsledků sledování polohy

$T_{navMessage}$ – dekódování přijaté zprávy (závisí na počáteční kondici navigačních dat přijímače)

$T_{navSolution}$ – výpočet polohy z dekódovaných dat

Horký start

Přijímač již má po zapnutí ihned k užívání navigační data (efemeridy, frekvenční ofset, pozice družic atd.). V tomto případě je první určení polohy od zapnutí GPS přijímače nejrychlejší. [21]

Teplý start

Přijímač má k dispozici validní navigační data, která byla uložena buď z poslední dekódované zprávy nebo získána z jiného zdroje, je však ještě nutné načíst efemeridy. [21]

Studený start

V případě studeného startu nemá přijímač k dispozici žádná navigační data. V takovém případě je nutné tyto informace obstarat buď extrahováním ze samotného GPS signálu nebo z jiných podpůrných zdrojů. V tomto případě je první určení polohy od zapnutí GPS přijímače nejpomalejší. [21]

1.11.1 Standard NMEA 0183

Organizace NMEA (National Marine Electronics Association) byla založena kolem roku 1953, na veletrhu New York Boat Show, jako seskupení obchodníků s námořní elektronikou. Původním účelem bylo sdružit prodejce, výrobce lodní elektroniky a další organizace, jako FCC (Federal Communications Commission), Pobřežní stráž a RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services). Ze spolupráce těchto subjektů a zkušeností vzešly standardy NMEA, které specifikují formát digitální komunikace a předávání informací mezi lodními přístroji různých výrobců (GPS přijímač, sonar, vysílačka, elektronický kompas, radar atd.). Samotný standard, s označením NMEA 0183, definuje požadavky na elektrické vlastnosti signálů, podobu protokolu sériové komunikace, pro přenos ASCII dat, formát času a textovou strukturu zpráv. Hlavním rysem je, že na sběrnici může být v jeden moment aktivní (posílat zprávy) pouze jedno zařízení. Všechna ostatní zařízení jsou v danou chvíli posluchači. Samotný standard NMEA 0183 je navržen pro komunikaci rychlostí 4800 baud. Existuje však také vysokorychlostní varianta, s označením NMEA 0183-HS, která dovoluje komunikaci o rychlosti 38400 baudů za sekundu. Nástupcem je standard NMEA2000. [22]

Vybrané prefixy a obsah zpráv standardu NMEA 0183 [23] [24]

GGA – Čas, pozice, kvalita GPS pozice a opravná data

GLL – Pozice (Latitude, Longitude), čas a status

GSA – GPS DOP a počet aktivních satelitů

GSV – Počet viditelných satelitů, ID satelitů, elevace, azimut a hodnoty SNR

GRS – Dupočet GPS od hodnoty uvedené v GGA

MSS – SNR, síla signálu, frekvence, přenosová rychlost z vysílače DGPS

RMC – Čas, pozice, kurs a rychlost

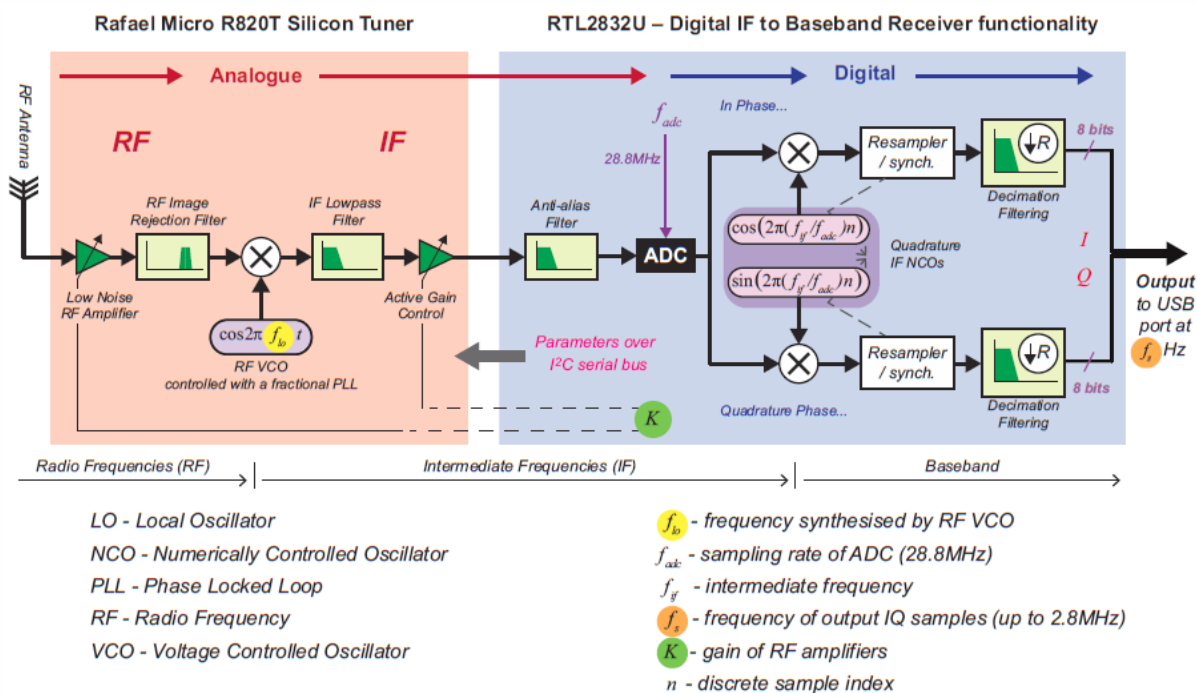
VTG – Kurs a rychlost relativní k zemi

ZDA – UTC den, měsíc, rok a lokální posun času

2 POPIS POUŽITÉHO HARDWARU

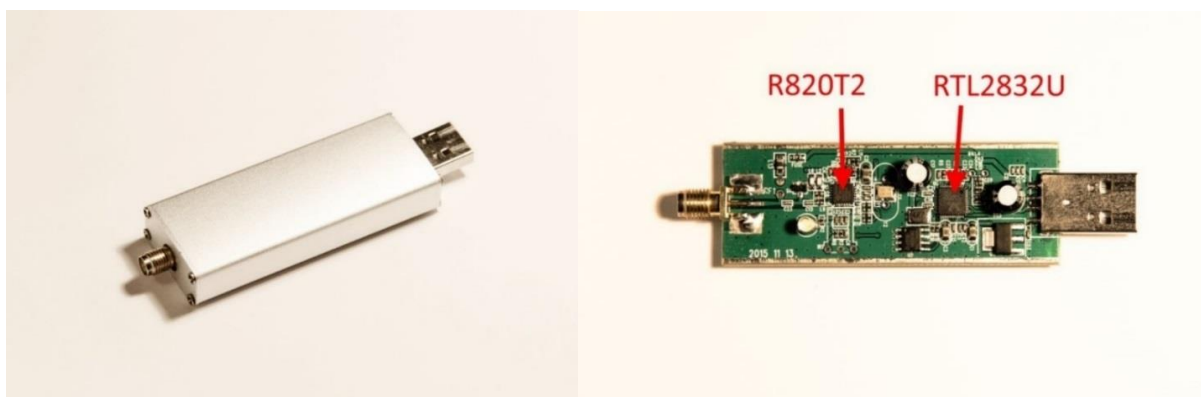
2.1 USB přijímač RTL-SDR

Jednou z veřejnosti finančně dostupných variant softwarově definovaného rádia je USB dongle přijímač RTL-SDR. Název je odvozen z katalogového označení OFDM demodulátoru RTL2832, vyráběného firmou Realtek [25]. Ten společně s DVB-T přijímačem R820T2, který vyrábí firma Rafael Microelectronics [26], viz. Obrázek 9. Původně byl dongle zkonstruován, a do dnešní doby stále prodáván jako USB přijímač digitálního televizního vysílání, pro stolní PC a notebooky. Vývojáři Antti Palosaari a Eric Fry však kolem roku 2010, při vývoji neoficiálních ovladačů pro příjem DVB-T na operačním systému Linux, zjistili, že je možné uvést obvod demodulátoru RTL2832U do stavu, kdy přes USB do počítače neposílá pakety, obsahující demodulovaný signál, ale přímo I/Q data. Dále zjistili, že je možné úpravou ovladačů řídit zisk předzesilovače, který je uvnitř obvodu R820T2 a také, že je tento obvod schopen přijímat frekvence v rozsahu 24 MHz až 1755 MHz. Následně pak s pomocí vývojářů, sdružených kolem stránky Osmocom.org [27], uvedli na začátku roku 2012 vlastní verzi hardwarového ovladače, pro operační systém Windows, které umožnily již zmíněný přístup k I/Q datům a otevřeli tak bránu k využití přijímače, jako softwarově definovaného rádia. [28] [25] [29]



Obrázek 9 - Zjednodušené blokové schéma přijímače RTL-SDR [9]

Známý jsou také velmi tvůrčí případy využití tohoto levného SDR donglu (Obrázek 10), kdy byly s tímto levným přijímačem objeveny nedostatky v používání policejního komunikačního systému TETRA [30] [31], přijaty a dekodovány záběry z meteorologických satelitů NOAA [32] či dekodovány SMS zprávy, zachycené v GSM síti [33]. Existují i samostatné programy, které slouží k dekodování odpovědí leteckého sekundárního radaru (ADS-B, MODE-S), na frekvenci 1090 MHz [34]. Technické specifikace přijímače popisuje Tabulka 4.



Obrázek 10 – Přijímač RTL-SDR s krytem (vlevo) a bez krytu, s popisem klíčových obvodů (vpravo)

Tabulka 4 - Souhrn základních parametrů RTL-SDR (R820T2 a RTL2832U) [28] [35]

Rozsah příjmu	25-1766 MHz
Maximální vzorkovací frekvence	3,2 MS/s
Maximální stabilní vzorkovací frekvence	2,4 MS/s
Maximální šířka pásma	3,2 MHz
Rozlišení A/D převodníku	8 b (7 b efektivně)
Vstupní impedance	75 Ω
Maximální výkon přijatého signálu	+10 dBm
Stabilita vnitřního oscilátoru	1 PPM
Citlivost (FFT:8k,64 QAM, CR:7/8)	-79,5 dBm

2.2 GPS přijímač Gmouse VK-162

Přijímač GPS systému, Gmouse VK-162 (Obrázek 11), je určen především pro mobilní aplikace v oblastech automobilové a lodní dopravy. Propojení s PC je řešeno pomocí rozhraní USB. Samotná komunikace pak probíhá prostřednictvím virtuální sériové linky, v souladu s protokolem NMEA 0183 v3.01. Kromě určení polohy a času je přijímač schopen také

udávat rychlost pohybu, elevaci a azimut. Pro zlepšení přesnosti určení polohy je přijímač schopen dekódovat, kromě satelitní GPS, také diferenční GPS (DGPS). Technické parametry GPS přijímače popisuje Tabulka 5. [36]



Obrázek 11 - GPS přijímač Gmouse VK-162

Tabulka 5 - Parametry GPS přijímače Gmouse VK-162 [36]

GPS čip	Ublox 6010 / 7020
Frekvence	L1 (1575,42 MHz)
Kód	C/A
Přesnost	5 m (3 m DGPS)
Souřadnicový systém	WGS-84
Přesnost určení času	1 μ s
Zaměřovací citlivost	-148 dBm
Sledovací citlivost	-162 dBm
Studený start	32 s (průměr)
Teplý start	32 s (průměr)
Horký start	1 s (průměr)
Perioda čtení polohy	0,1 s
Provozní teploty	-40°C až 80°C
GPS protokol	NMEA 0183 v3
Dostupná data NMEA 0183	GLL, GGA, GSA, GSV, RMC, VTG
Ostatní	DGPS, WAAS, EGNOS, MSAS

2.3 Výpočetní jednotka

Jako výpočetní jednotka mobilního pracoviště byl zvolen notebook Dell 11z Touch 3000 Series. Notebook je vybaven dotykovou obrazovkou o úhlopříčce 11“, s možností překlopení do režimu tabletu (zařízení 2v1). Překlopení obrazovky poskytuje jak skladnější proporce a jednodušší ovládání, při pochůzkovém měření v terénu, tak také možnost využití plnohodnotného laptopu pro pozdější zápis a zpracování dat a poznatků z měření. Notebook je vybaven dvoujádrovým procesorem Intel i3 pracujícím na frekvenci 1,9 GHz, možností Hyper Threadingu, 4 GB operační paměti RAM a pevným diskem SATA o kapacitě 500 GB. Výdrž na baterii je podle výrobce až 8 hodin. [37]

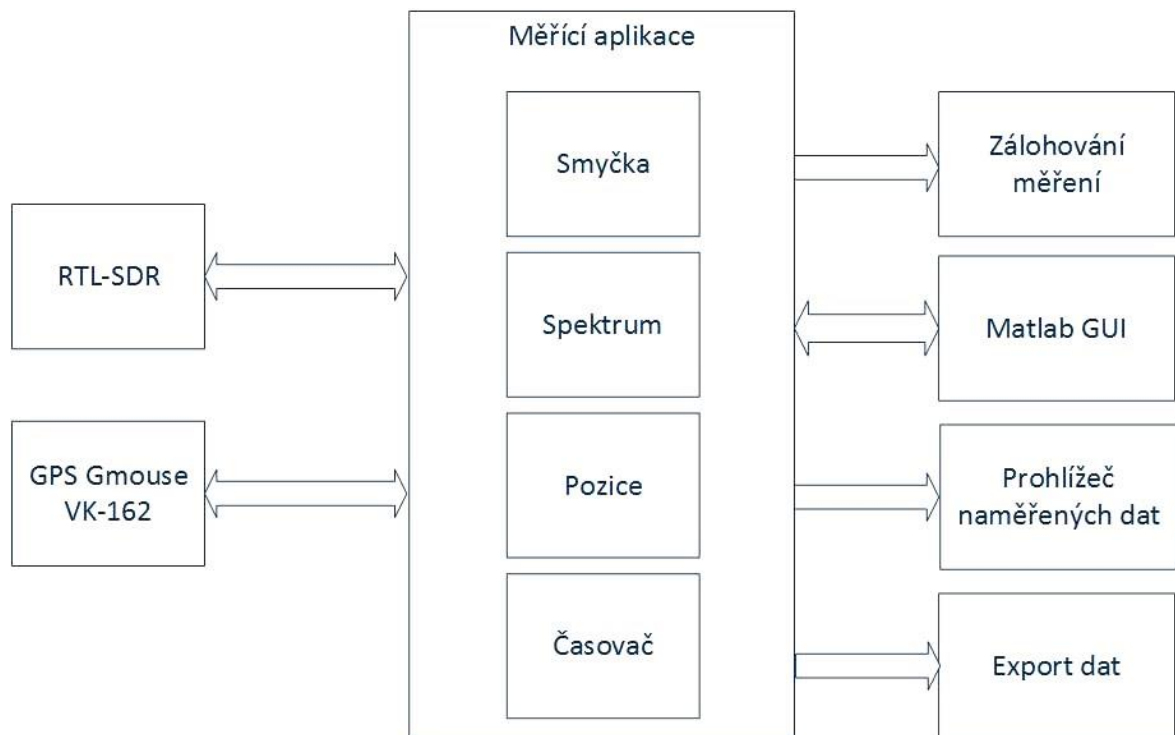


Obrázek 12 - Ilustrační foto notebooku Dell 11z Touch [37]

3 VÝVOJ MĚŘÍCÍ APLIKACE V PROSTŘEDÍ MATLAB

3.1 Popis aplikace

Pro využití přijímačů RTL-SDR a VK-162 k monitoringu pokrytí prostředím rádiovým signálem bylo nutné vytvořit aplikaci pro ovládání hardwaru, záznam hodnot a zpracování naměřených dat. Pro vývoj bylo zvoleno prostředí a programovacího jazyka MATLAB (verze R2016b), a to především z důvodů zkušeností zhotovitele této bakalářské práce, kvalitně zpracované dokumentace tohoto jazyka a existence podpůrných knihoven pro zpracování digitálního signálu a ovládání přijímače RTL-SDR [38]. Výsledná aplikace je rozdělena do dvou celků (záznamová část a prohlížeč zaznamenaných dat), přičemž oba mohou být spuštěny samostatně. Strukturu programu popisuje Obrázek 13, který však vzhledem ke složitosti skutečného provedení ilustruje pouze zjednodušené funkční schéma.



Obrázek 13 - Zjednodušené blokové schéma aplikace

3.2 Záznamová část

Základní funkcí záznamové části je měření výkonu přijatého signálu na přijímači RTL-SDR, se záznamem polohy pomocí GPS přijímače Gmouse VK-162. Pro zvýšení frekvence záznamu lze záznam polohy zcela vypnout. Toto je však logicky použitelné pouze v případě analyzování spektra v čase, bez změny polohy přijímače. Z důvodu nestability délky trvání

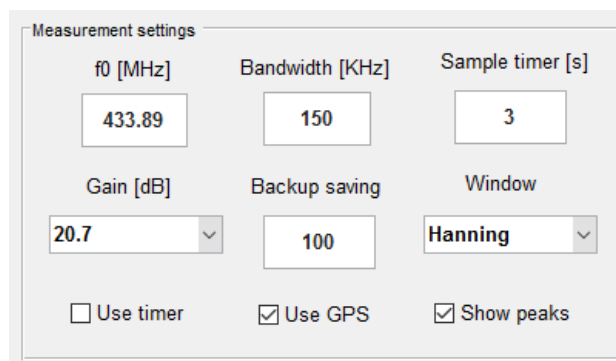
odběhů měření, která je velkou měrou závislá na proměnlivém vytížení výpočetního výkonu PC, je aplikace vybavena volitelnou funkcí časovače, jehož nejmenší hodnotu lze zjistit pomocí funkce kalibrace. Spuštěním režimu kalibrování časovače je proveden testovací odběh záznamu, při kterém je měřena délka prvního odběh, což je, z důvodu inicializace přijímače RTL-SDR, také vždy ten nejpomalejší. Pro oddálení doby do dalšího měření lze časovač nastavit na vyšší hodnotu, čímž se zmenší frekvence záznamu a prodlouží výdrž fungování laptopu (při provozu na baterii). Dále jsou součástí měřicí aplikace i funkce jednorázového zobrazení spektra a GPS pozice. Tyto funkce jsou užitečně především pro kontrolu funkčnosti před spuštěním kontinuálního měření. V neposlední řadě je součástí programu zálohování dat v průběhu měření do souboru backup.csv, který se nachází v kořenovém adresáři. Frekvenci ukládání zálohy lze nastavit libovolně nastavit (po spuštění nastaveno na každých 100 odběhů). Uživatelské rozhraní (Obrázek 14) tvoří 4 grafické prvky (Spectrum sample, Band detail, Levels a Timeline), které zobrazují průběh měření, 4 textová pole (Measurement settings, Position, Measuring a Status panel), sloužící k nastavení měření a kontroly průběhu měření. Dále pak číselný výpis naměřených hodnot a 6 ovládacích tlačítek (Start/Continue, Stop, Clear, Get spectrum, Get GPS data a Calibrate timer), která spouští předdefinované akce měření a kalibrace. K dispozici je také lištové menu, v horní části okna, ve kterém se nacházejí volby pro export naměřených hodnot, detailní kontrolu stavu připojeného hardwaru a zobrazení naměřených dat.



Obrázek 14 - Uživatelské rozhraní záznamové části

3.2.1 Získání a zpracování I/Q dat

Před zahájením měření je nutné nastavit příslušné parametry přijímače (viz. Obrázek 15). Především frekvenci příjmu (okno f_0) a zisk vnitřního zesilovače přijímače (okno Gain). Dále pak šířku pásma (okno Bandwidth), které určuje zájmovou oblast (zpravidla šířka pásma zkoumaného signálu), váhovací okno (Obdélník, Hanning, Balckman a Hamming). Hodnotu časovače (okno Sample timer) je nutno nastavit pouze v případě použití časování měření (aktivace zaškrtnutím checkboxu Use timer). Pro urychlení záznamu, v případě měření beze změny polohy, lze deaktivovat záznam GPS polohy (deaktivování je provedeno odškrtnutím checkboxu Use GPS). V případě průzkumu spektra je také možné aktivovat funkci detekce špiček (checkbox Show peaks). Okno Backup saving slouží k nastavení parametru k ukládání zálohy měření. Po zapnutí aplikace je parametr předvolen na ukládání zálohy každých 100 odběhů měření. Hodnotu je možné libovolně změnit, avšak zmíněných 100 odběhů se v praxi, při měření s časovačem na 2 s, ukázalo jako dostačující.



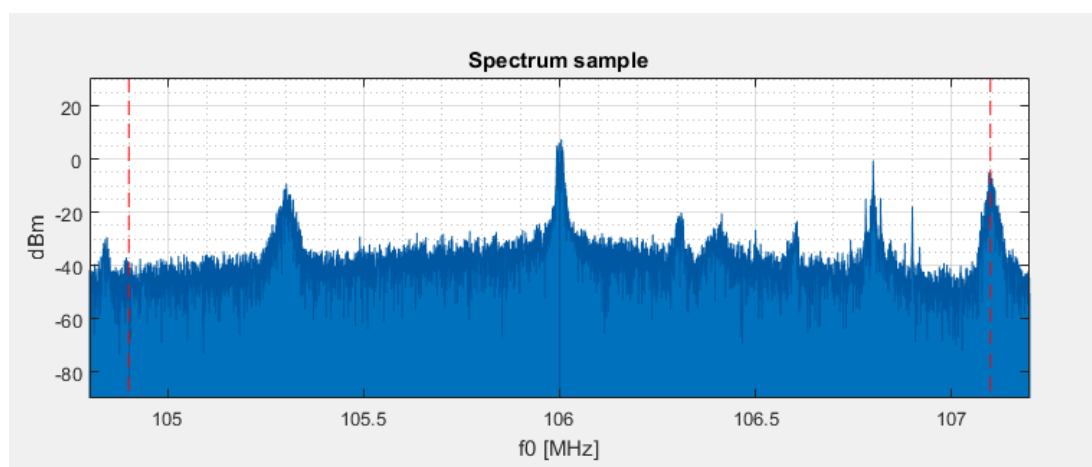
Measurement settings		
f0 [MHz]	Bandwidth [KHz]	Sample timer [s]
433.89	150	3
Gain [dB]	Backup saving	Window
20.7	100	Hanning
<input type="checkbox"/> Use timer	<input checked="" type="checkbox"/> Use GPS	<input checked="" type="checkbox"/> Show peaks

Obrázek 15 - Nastavení parametrů měření

Pro změření přijatého výkonu je nutné získat z přijímače I/Q data. Tento úkon velmi ulehčuje podpůrný balík, jménem Communications System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio, který slouží jako prostředník při komunikaci s přijímačem RTL-SDR. Před příjmem dat je však nutné zadat frekvenci, vzorkovací frekvenci, zisk vnitřního zesilovače, šířku vzorkovaného pásma a vytvořit v programu objekt rádia, díky kterému je možné komunikovat z prostředí MATLAB se zařízením RTL-SDR. Samotný import dat je pak spouštěn příkazem $IQ=step(h)$, kde h reprezentuje objekt rádia a IQ je výsledná matice, obsahující I/Q data v komplexním tvaru. Následně je ještě nutné odstranit stejnosměrnou složku, což je provedeno odečtením střední hodnoty dat. [9]

3.2.2 Výpočet kmitočtového spektra

Po zpracování I/Q dat přichází na řadu výpočet kmitočtového spektra. Nejdříve je však, dle výběru uživatele, aplikováno. Následuje výpočet rychlé Fourierovy transformace, pomocí příkazu `fft()`. Dále je výsledek znormován a vzorky seřazeny pomocí příkazu `fftshift()`. Posledním krokem ve výpočtu spektra je logaritmický přepočítání na decibely a přičtení hodnoty 30 dB, pro posunutí hodnot do měřítka v dBm, které jsou v radiotechnice běžné. Výsledkem je kmitočtové spektrum o šířce 2,4 MHz (viz. Obrázek 16). Do vypočítaného spektra lze zobrazit špičky (viz. Obrázek 14), což v některých případech ulehčuje průzkum spektra a odhalování slabých signálů.

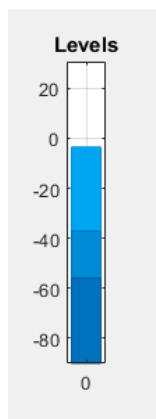


Obrázek 16 - Detail vypočítaného spektra

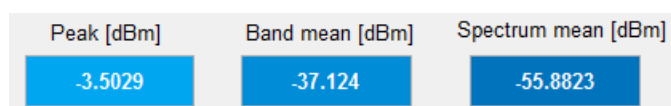
3.2.3 Získání hodnot signálu ze spektra

Šířka získaného kmitočtového spektra, která je dána konstantní vzorkovací frekvencí A/D převodníku (2,4 MS/s), je 2,4 MHz. Pro získání hodnot signálu, který však zabírá užší část (150 kHz pro FM rozhlas) je nutné extrahovat zájmovou část spektra. Rozsah zájmové části indikují dvě svislé červené přerušované čáry, které se nachází vždy symetricky kolem středu vykresleného spektra (viz. Obrázek 16). Šířku zájmového spektra lze zadat v uživatelském rozhraní aplikace, a to v rozsahu 10–2200 kHz. Tyto hodnoty byly stanoveny na základě zkušeností při testovacích měřeních, kde 10 kHz je mezní hodnota, kdy lze rozeznat dělicí čáry ve vykresleném spektru a 2200 kHz je hodnota, za kterou již dochází k výraznějšímu úpadku amplitudy spektra, vlivem omezených vlastností A/D převodníku a dalších vnitřních obvodů přijímače. Následně jsou získány maximální a průměrná hodnota zvoleného zájmového spektra a dále také průměrná hodnota původního spektra o šířce 2,4 MHz (viz. Obrázek 18). Průměrná hodnota původního spektra, zastupuje úroveň šumu a jejím

porovnáním s hodnotami, získanými ze zájmového spektra, lze odvodit kvalitu signálu (viz. Obrázek 17 a Obrázek 18).



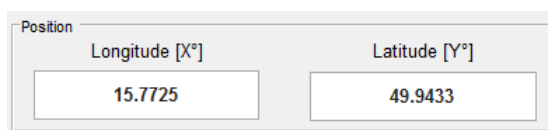
Obrázek 17 - Grafická reprezentace naměřených hodnot



Obrázek 18 - Číselné zobrazení naměřených hodnot

3.2.4 Načtení a zpracování dat z GPS přijímače

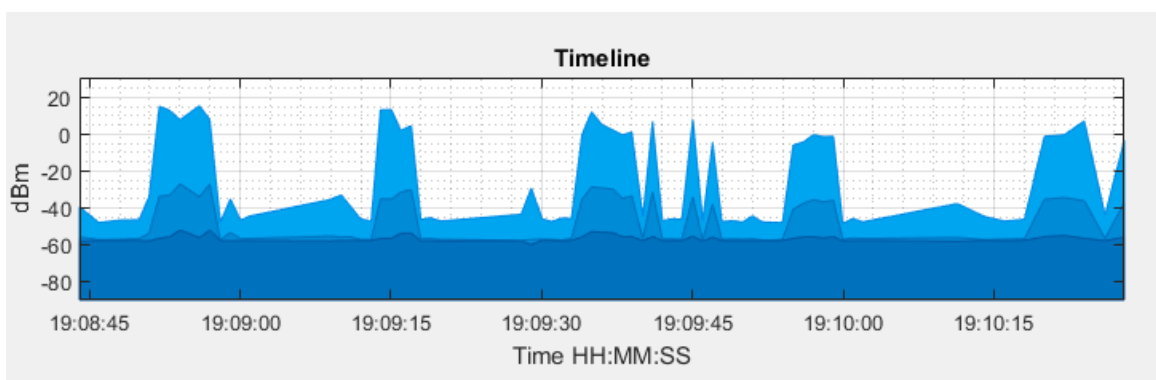
Pro určení okamžité pozice, na které je změřen výkon signálu, je nutné získat poziční data z GPS přijímače. Vzhledem k tomu, že použitý GPS přijímač komunikuje dle standardu NMEA 0183, stačí k načtení dat vytvořit v aplikaci objekt sériové komunikace a zahájit čtení. To probíhá, dokud nenastane shoda prefixu načítané zprávy a požadovaného prefixu, v tomto případě GPGLL. Načtená data je však dále nutné upravit do decimálního tvaru, který schůdnější pro vykreslování grafů v Matlabu (např. 50.0339472 N, 15.7675183 E). Vzhledem k určení aplikace pro měření v České republice není nutné zaznamenávat označení severní, jižní či východní a západní polokoule. Aktuální pozice je následně vypisována v boxu Position. Zvětšený detail boxu ilustruje Obrázek 19. [39]



Obrázek 19 - Výpis pozice

3.2.5 Časování měření

Problematika nestability výpočetního výkonu, která byla zmíněna v části Popis aplikace (kapitola 3.1), je řešena pomocí volitelného časovače. V případě požadavku nejvyšší možné frekvence záznamu lze časovač ignorovat. V tomto případě pak aplikace provádí odběhy měření neprodleně za sebou. V praxi se ukázalo, že s uvedeným měřícím laptopem (kapitola 2.3) je maximální frekvence záznamu zhruba 1 Hz a při deaktivovaném záznamu GPS polohy kolem 3 Hz. Při použití časovače pak délka trvání jednoho odběhu dosahuje 2 s. Při provádění odběhů měření je frekvence měření stále nestabilní, ta je však vždy měřena a po dokončení procedur daného měření nastává čekání, v délce rozdílu trvání daného odběhu a nastavení časovače. Například: při časovači nastaveném na hodnotu 2 s a délce měření 1,2 s, bude program do zahájení dalšího měření čekat 0,8s. Průběh změn měřených hodnot pak lze sledovat pomocí časové osy, vykreslované v grafu Timeline (viz. Obrázek 20). Počet zobrazovaných měření lze nastavit v poli Timeline samples (viz. Obrázek 14).



Obrázek 20 - Časová osa

3.2.6 Záznam a export hodnot

Na konci každého cyklu měření je provedeno uložení dat do výsledkové matice. Každý řádek této matice reprezentuje jedno měření, a obsahuje pozici (zeměpisnou délku a šířku), maximální hodnotu zájmové části spektra, průměrnou hodnotu zájmové části, průměrnou hodnotu celého spektra (kromě hodnot zájmové oblasti) a čas pořízení vzorku. Čas je ukládán, pomocí příkazu `now()`, v ve formě desetinného čísla. Toto číslo svou hodnotou reprezentuje aktuální datum a čas, jako počet dní, které uplynuly od 0. ledna roku 0000. Například hodnota 736801,640080 odpovídá datumu 16. dubna 2017, 15:21:42. Data lze po ukončení měření exportovat do souboru ve formátu CSV, s čárkou jako oddělovač. Všechna desetinná čísla tedy musí pro oddělení celé a desetinné části používat tečku, což je v prostředí MATLAB standardní tvar desetinného čísla. Uložení pomocí příkazu `csvwrite()` se ukázalo, vzhledem k maximální přesnosti čísel na 4 desetinná místa, jako nedostatečné. Tento úkon je proto

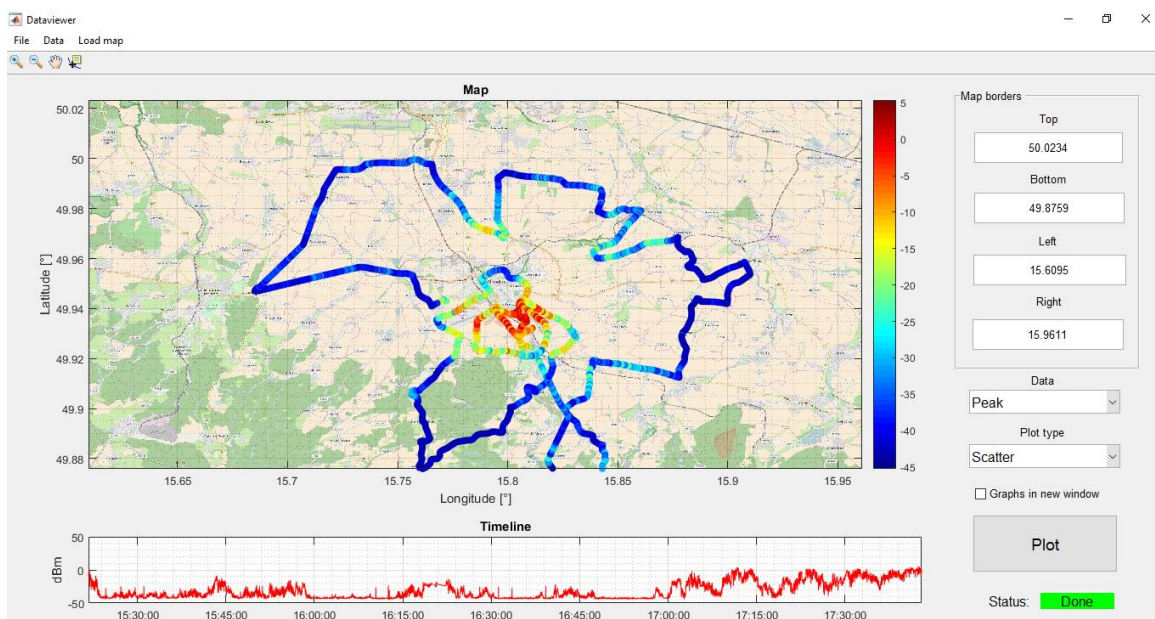
realizován pomocí příkazu `dlmwrite()`, který dovoluje zápis čísla s vyšším počtem desetinných míst. Pro případ této aplikace byla zvolena přesnost na 6 desetinných míst. Podobu výsledného souboru ilustruje Obrázek 21.

	A	B	C	D	E	F
1	15.772442	49.943156	-8.800029	-18.162622	-27.935384	736801.640080
2	15.772441	49.943157	-5.032388	-16.779034	-27.442862	736801.640090
3	15.772441	49.943157	-6.553673	-17.325442	-28.316997	736801.640114
4	15.772441	49.943157	-6.609730	-17.928574	-28.035906	736801.640138
5	15.772441	49.943156	-7.268225	-17.754697	-28.221739	736801.640162
6	15.772448	49.943149	-1.732680	-11.236293	-18.351650	736801.640183

Obrázek 21 - Exportovaná data

3.3 Prohlížeč naměřených dat

Prohlížeč část dovoluje zobrazit naměřené hodnoty ve formě časové osy nebo projekce na mapové podklady (viz. Obrázek 22). Obě varianty zobrazení lze následně uložit jako obrázek. V horní části okna se nachází lištové menu, které slouží pro načítání naměřených dat. V záložce Data se nachází volba Add data, která slouží ke spojování více souborů, pro vykreslení více měření najednou. Pro manipulaci s grafy slouží nástroje v liště, umístěné pod zmíněným menu. Tyto nástroje umožňují přiblížení, oddálení, pohyb mapou a kurzorové měření pozice vzorků. Pro využití kompletní palety nástrojů, které pro práci s grafy nabízí prostředí MATLAB, lze využít volbu vykreslení grafů v samostatném okně, čímž se grafy vykreslí v prostředí okna MATLAB figure.



Obrázek 22 - Uživatelské rozhraní prohlížeče naměřených dat

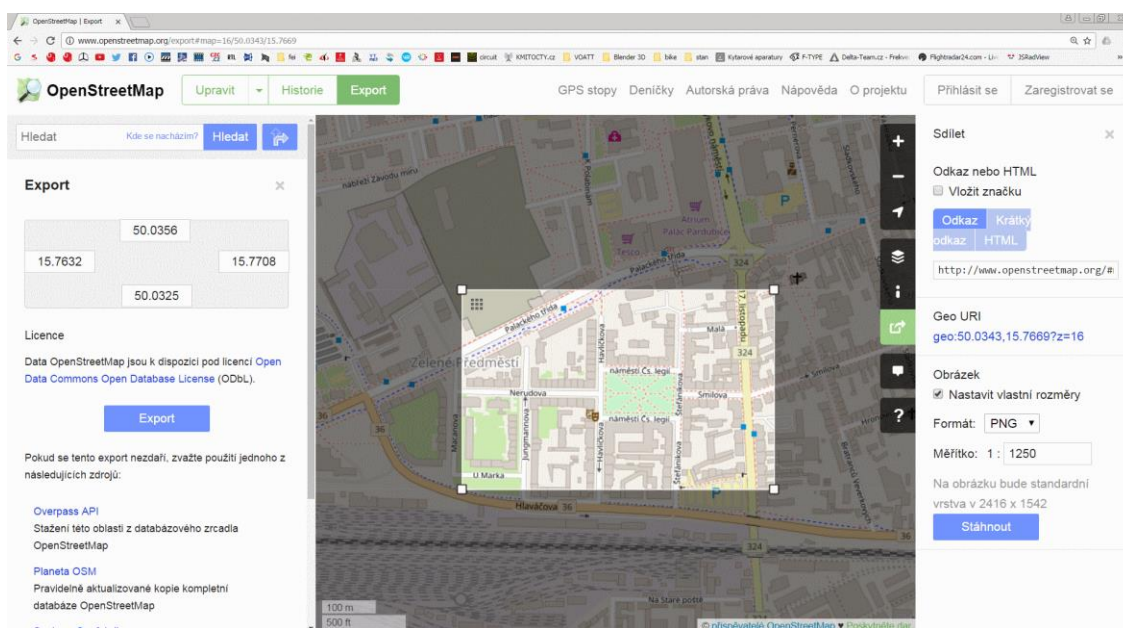
3.3.1 Mapové podklady

Mapové podklady jsou řešeny formou obrázku, který je dodatečně ocejchován pomocí CSV souboru. Tento soubor obsahuje rozmezí GPS souřadnic, reprezentujících okraje mapy. Cejchovací soubor obsahuje na prvním řádku souřadnici horního okraje mapy, na druhém dolní okraj, dále levý okraj mapy a na čtvrtém řádku je pravý okraj mapy (viz. Obrázek 23).

	A	B	C
1	50.0234		
2	49.8759		
3	15.6095		
4	15.9611		
5			

Obrázek 23 - Struktura souboru popisujícího meze mapy

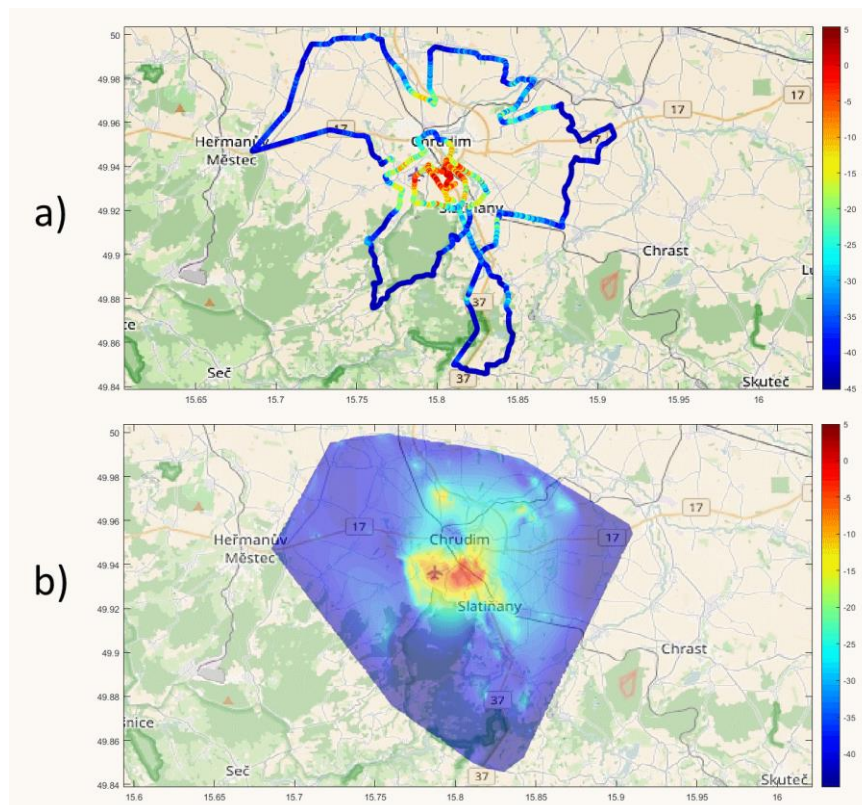
Toto provedení má své výhody i nevýhody. Jednoznačnou výhodou tohoto řešení, oproti vektorové mapě, je především možnost použití libovolné obrázkové mapy, jestliže známe souřadnice okrajů. Díky tomu lze použít téměř libovolný mapový podklad, od nejběžnější topografické a satelitní mapy, přes dopravní mapy nebo například leteckou mapu. Stáhnutí mapy ve formátu obrázku, s definovanými hranicemi a výpisem GPS souřadnic okrajů výřezu, lze například ze stránky OpenStreetMap (www.openstreetmap.org). Proceduru stažení obrázku ilustruje Obrázek 24. Nevýhodou tohoto řešení pak je, oproti vektorovým mapám, nemožnost změny měřítka a větší nároky na velikost souboru mapy. Další možností provedení mapových podkladů je využití funkce prostředí MATLAB pro implementaci online map. Toto řešení však bylo, především z důvodu požadavku na mobilitu pracoviště, zavrhnuto.



Obrázek 24 - Uložení výřezu ze stránky OpenStreetMap

3.3.2 Vykreslení naměřených hodnot do mapy

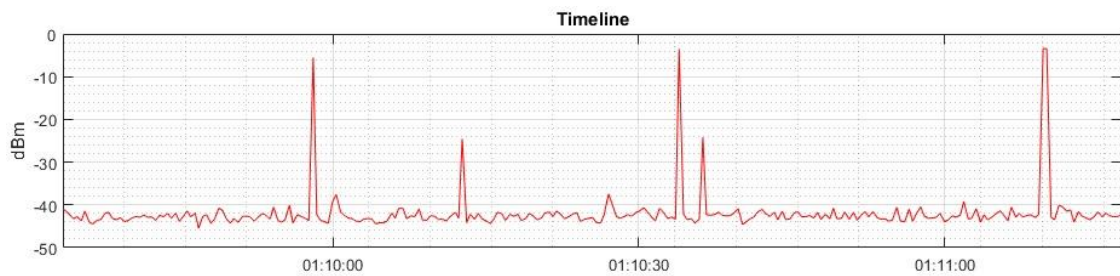
Pro reprezentaci naměřených dat je možné použít dvě formy. Prvním způsobem je vykreslení naměřených hodnot do mapy. Pro správné vykreslení je nutné, aby data obsahovala zaznamenanou pozici. Toto vylučuje prohlížení dat, naměřených ve zrychleném módu s deaktivovaným čtením polohy z GPS přijímače. Pro vykreslení je možné vybrat ze dvou režimů. Prvním je bodový scatter graf, který barvou vykreslených bodů reprezentuje pozici pořízení měření a korespondující naměřenou hodnotu. Tento graf je nejpřesnější reprezentací naměřených dat. Druhým režimem je reprezentace dat pomocí signal strength map. Výstupem je mapa s barevnou vrstvou, jejíž barva reprezentuje sílu signálu v daném místě. Tato vrstva je v MATLABu vytvořena interpolací naměřených dat, pomocí funkce `scatteredInterpolant()`. Pro interpolaci byla zvolena metoda `natural`. Samotná interpolace je výpočetně velmi náročný úkon. Pro potřeby této aplikace a s uvažováním použitého PC byla stanovena jako mezní hodnota vzorků, pro výpočet interpolace, na 1500 hodnot. Při překročení této hodnoty je provedena decimace matice hodnot na únosnou velikost. Nutno zmínit, že ač je tato metoda vizuálně atraktivnější, dochází zde k matematickému výpočtu hodnot přijatého výkonu na místě, kde neproběhlo měření. Tuto formu vykreslení hodnoty tedy, na rozdíl od grafu scatter, nelze považovat za jednoznačný ukazatel pokrytí. Obě formy vykreslení ilustruje Obrázek 25.



Obrázek 25 - Vykreslení dat do mapy a) scatter, b) signal strength map

3.3.3 Vykreslení časové osy měření

Druhou možností pak je výpis naměřených hodnot do časové osy. Graf je vhodný pro inspekci průběhu měření pokrytí signálu, a především pak pro analýzu radiových signálů, jejichž vysílaný výkon je proměnlivý v čase. Jako příklad lze uvést domácí teploměr s bezdrátovým senzorem teploty, který v určitých časových intervalech vysílá údaje o naměřené teplotě (viz. Obrázek 26) nebo monitoring aktivity veřejných radiových stanic.



Obrázek 26 - Vysílací aktivita na frekvenci 433,8 MHz se šířkou pásma 10 kHz

4 MĚŘENÍ POKRYTÍ VYBRANÝCH SLUŽEB

4.1 Metodika měření pokrytí

Pro bezchybné měření by bylo nutné provést měření s rozmístěním jednotlivých odběhů v minimální vzdálenosti a náhodném směru pohybu měřícího stanoviště. Tento způsob by však v praxi představoval enormní časové a technické zatížení. V mnoha případech by tedy tento postup nebyl vůbec uskutečnitelný. Je tedy nutné mít na paměti, že měření pokrytí bude vždy zatíženo chybou, způsobenou omezeními trasy měření. Měření pokrytí plošné oblasti o velké rozloze se ukázalo jako velmi časově náročné. Využití vozidla, pro přesun měřícího pracoviště, se ukázalo jako vhodné řešení. Nevýhodou tohoto způsobu přesunu je ovšem závislost na přítomnosti sjízdných komunikací v záměrové oblasti. Před zahájením samotného měření je nutné zvolit vhodnou trasu, na které bude probíhat měření (viz. Obrázek 27).



Obrázek 27 – Příklad plánu trasy měření

Zvolená trasa by měla odrážet terénní podmínky dané oblasti. V případě rovinné oblasti (louka) lze předpokládat, že nebude docházet k výraznému vlivu terénu na šíření signálu. Trasu tak lze zvolit přibližně ve formě znaménka plus, kde bod průtnutí je umístěn v blízkosti místa vysílače. Příklad měření pokrytí kopcovitého terénu, s vysílačem umístěným ať na kopci nebo v údolí, se ukázalo jako velmi náročný proces. V tomto terénu se totiž projevuje šíření mnohonásobným odrazem, difrakce, rozptyl a radiový stín od terénních nerovností. Pro ucelený přehled pokrytí je nutné zachytit přijatý výkon na místech s přímou viditelností na vysílač (vrcholy kopců) a problémová místa (údolí). Je nutné také uvažovat specifika

měření pomocí automobilu, například měření při jízdě v lese, kde vzniká útlum od stromů, nebo měření pokrytí ve městě. Naopak měření oblasti o malé rozloze (sídlíště, městský blok), se ukázalo jako vhodnější provést přesunem pěšky. Díky tomu je možné provést měření v pěší zóně a na vozidlu obtížně přístupných místech (například vnitroblok). Specifickou variantou měření pokrytí je měření dopravní cesty (dálnice nebo železniční koridor). V tomto případě odpadá plánování cesty. Je však nutné mít na paměti, že na šíření signálu mají nezanedbatelný vliv atmosférické jevy, které současně ovlivňují přesnost určení polohy GPS přijímačem.

4.2 Použité antény a měřící pracoviště

4.2.1 Anténa VUM-201

Anténa VUM-201 (viz. Obrázek 28) od výrobce Hoxin, je vhodná pro příjem kmitočtů v pásmech VHF a UHF. Vysílání je možné na frekvencích 140-150 MHz (zisk 2,5 dBi) a 430-450 MHz (zisk 3 dBi), s maximálním vysílacím výkonem 25 W. Impedance antény je 50 Ω . Magnetická základna a pružná konstrukce ji předurčuje pro umístění na střechu automobilu, jako anténu pro vozidlovou radiostanici. [40]



Obrázek 28 - Anténa VUM-201

4.2.2 Anténa SRH-519

Anténa SRH-519 (viz. Obrázek 29) od výrobce Hoxin, je čtvrt vlnná prutová anténa, vhodná pro příjem na frekvencích od 0,5 MHz do 1300 MHz a vysílání na pásmech 2 m a 70 cm. Zisk této antény se pohybuje, dle výrobce, kolem hodnoty 3 dBi. Díky nízké hmotnosti (40 g) je vhodná především pro měření pokrytí menších oblastí, s pěším přesunem. [41]



Obrázek 29 - Anténa SRH-519

4.2.3 Teleskopická anténa pro příjem DVB-T

Pro měření pokrytí DVB-T signálu byla použita teleskopická anténa (viz. Obrázek 30), která je dodávána v setu s přijímačem RTL-SDR. Výhodou teleskopické antény je možnost nastavení délky zářiče, dle požadované vlnové délky (pro frekvenci 690 MHz vychází $\lambda/4$ přibližně 10,8 cm). Pro upevnění antény na střechu vozidla byla použita magnetická základna.



Obrázek 30 - Teleskopická anténa

4.2.4 Anténa C37

Všesměrová dipólová anténa C37 (viz. Obrázek 31) je určena pro provoz v sítích LTE 800 a UMTS 2100. Kmitočtový rozsah této antény se pohybuje od 791 MHz do 894 MHz, se ziskem 2,4 dBi, a dále od 1,92 GHz do 2,17 GHz, se ziskem 2,1 dBi. Impedance antény je 50 Ω . [42]



Obrázek 31 - Anténa C37

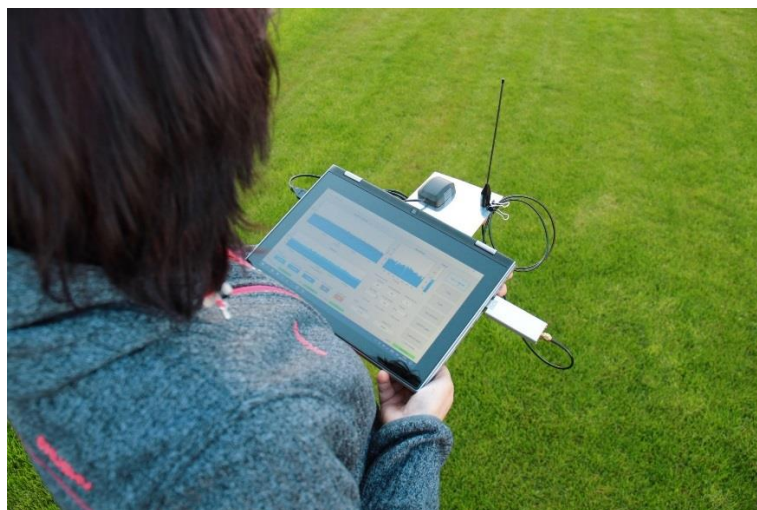
4.2.5 Měřící pracoviště

Pro měření ve vozidle (viz. Obrázek 32) je vhodné umístit anténu vně automobilu, aby bylo zabráněno ovlivnění signálu karoserií vozu. Použity byly antény s magnetickou základnou. V případě měření ve vlaku pak především kvůli bezpečnosti nebylo možné umístit přijímací anténu a GPS přijímač vně vozu. Bylo tedy nutné počítat s útlumem způsobeným konstrukcí vozu.



Obrázek 32 - Měřící pracoviště ve vozidle

Pro pěší měření byl PC používán ve formě tabletu. Pro připevnění GPS přijímače a přijímací antény byl do mezery mezi displejem a klávesnicí vložen plech, který posloužil jako základna pro zmíněné periferie (viz. Obrázek 32).



Obrázek 33 - Měřící pracoviště pro pěší měření

4.3 Měření pokrytí vybraných radiových signálů

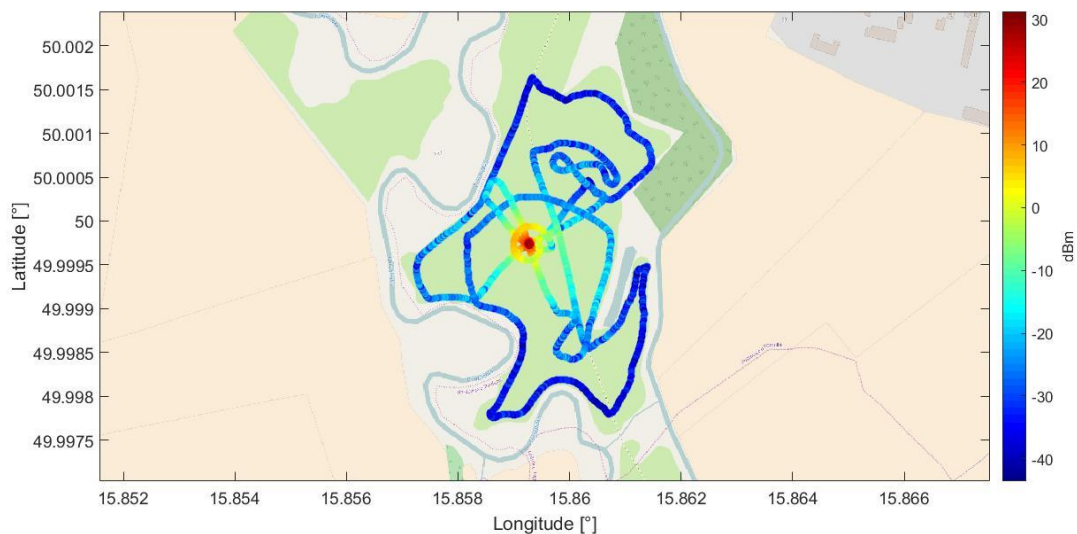
4.3.1 Měření pokrytí signálu v pásmu 433–434 MHz

Frekvenční pásmo 433 MHz až 434 MHz je vyčleněno pro datovou komunikaci na krátkou vzdálenost. Tyto kmitočty pro komunikaci velmi často využívají bezdrátové teploměry, dálková ovládání garážových vrat a podobné domácí aplikace. Pro objektivní posouzení dosahu takového zařízení bylo přistoupeno pro změření pokrytí signálu levného vysílacího modulu SYN115 F115 433M ASK na volném prostranství. Zmíněný modul při trvalém zaklíčování datového vstupu, a napájecím napětí 1,8-3,6V, disponuje vysílacím výkonem až 10 dBm. Pro účely měření bylo použito napájení prostřednictvím dvou tužkových baterií, které společně s anténou délky $\lambda/4$, umožnily vysílací výkon modulu kolem 8 dBm. Jako přijímací anténa byla zvolena anténa SRH-519. [43]

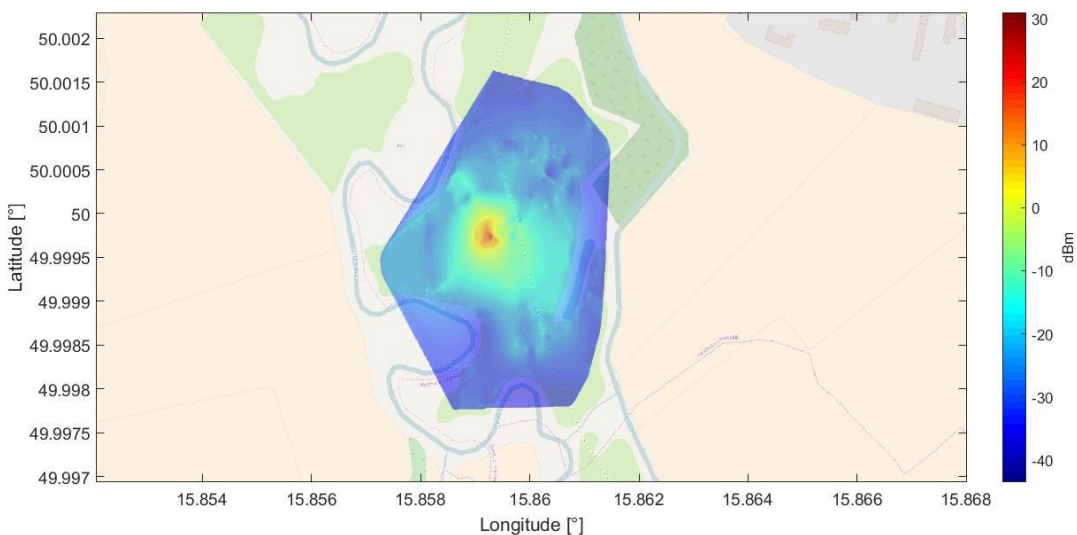


Obrázek 34 - Fotografie stanoviště vysílače

Měření bylo uskutečněno dne 30. dubna 2017, na louce v blízkosti obce Hostovice na Pardubicku. Tato lokace byla dostatečně vzdálená a stromy chráněná od přilehlých obydlí, což zajistilo odstínění případného rušení, způsobeného používáním zařízení pracujících ve stejném kmitočtovém pásmu. Vysílací modul byl pomocí nepájivého pole připojen na napájení a následně umístěn na stativ do výšky cca 1,6 m od země. Po zapnutí napájení bylo provedeno samotné měření. Přijímací kmitočet byl nastaven na 433,935 MHz, zisk vnitřního zesilovače na hodnotu 20,7 dB a šířka zájmového pásma byla zvolena 100 kHz.



Obrázek 35 - Mapa pokrytí signálu v pásmu 433 MHz – typ scatter

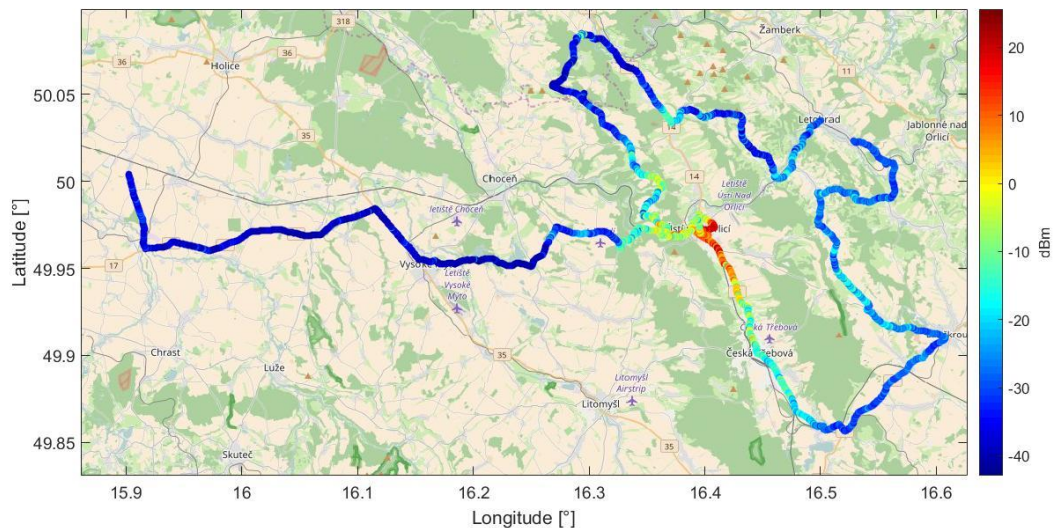


Obrázek 36 - Mapa pokrytí signálu v pásmu 433 MHz – typ strength map

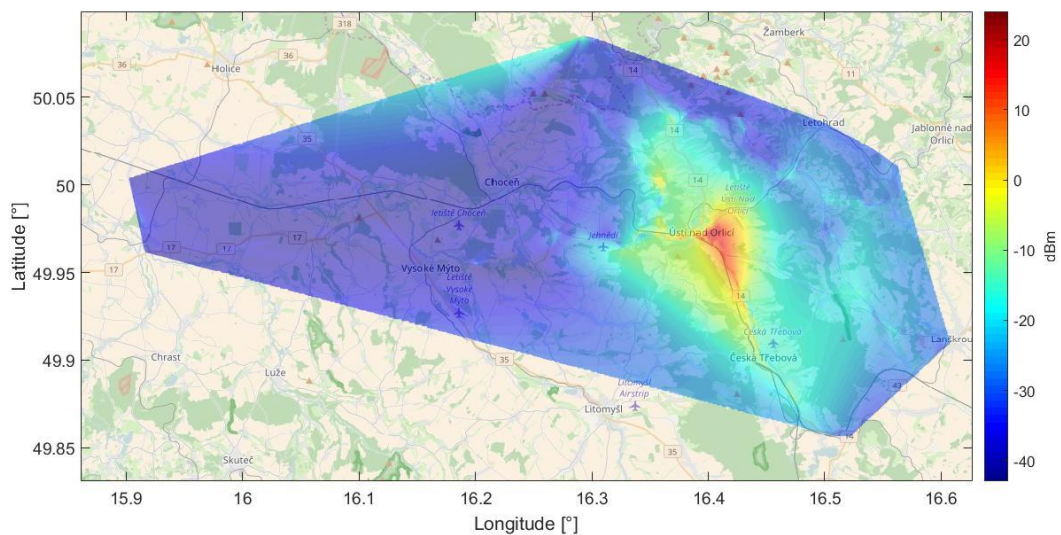
Dle naměřených dat lze vyhodnotit, že zařízení v uvedené konfiguraci vykazuje schopnost pokrytí kruhového území o poloměru zhruba 100 m od vysílače. Nutno však zmínit, že zvolené prostředí nebylo zcela bez překážek. Tuto skutečnost lze pozorovat na grafických výstupech měření (Obrázek 35 a Obrázek 36), kde v jejich horní a spodní části lze vidět kolísání v přijatém výkonu, které bylo způsobeno ostrůvky stromů a křoví.

4.3.2 Měření pokrytí FM rozhlasu

Pro měření pokrytí signálu FM rozhlasové stanice, bylo zvoleno regionální stanice Rádio Orlicko. Vysílací frekvence 95,5 MHz, vysílací výkon 200 W (EIRP). [44] Pro měření byla nastavena šířka pásma 150 kHz a zesílení signálu zesilovačem přijímače 29,7 dB. Jako přijímací anténa byla zvolena anténa VUM-201. Měření proběhlo 22. dubna 2017.



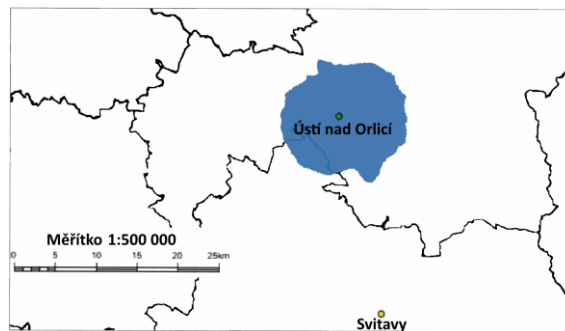
Obrázek 37 - Mapa pokrytí signálu FM rozhlasu – scatter map



Obrázek 38 - Mapa pokrytí signálu FM rozhlasu – strength map

Naměřené hodnoty potvrzují předpoklady o problematickém šíření signálu v kopcovitém terénu. I přes značný vysílací výkon (200 W) je plocha pokrytí signálu omezena především umístěním vysílací antény do údolí. Vysílací anténa je umístěna ve výšce zhruba 40 m nad terénem, na komínu kotelny ve východní části města Ústí nad Orlicí (GPS souřadnice

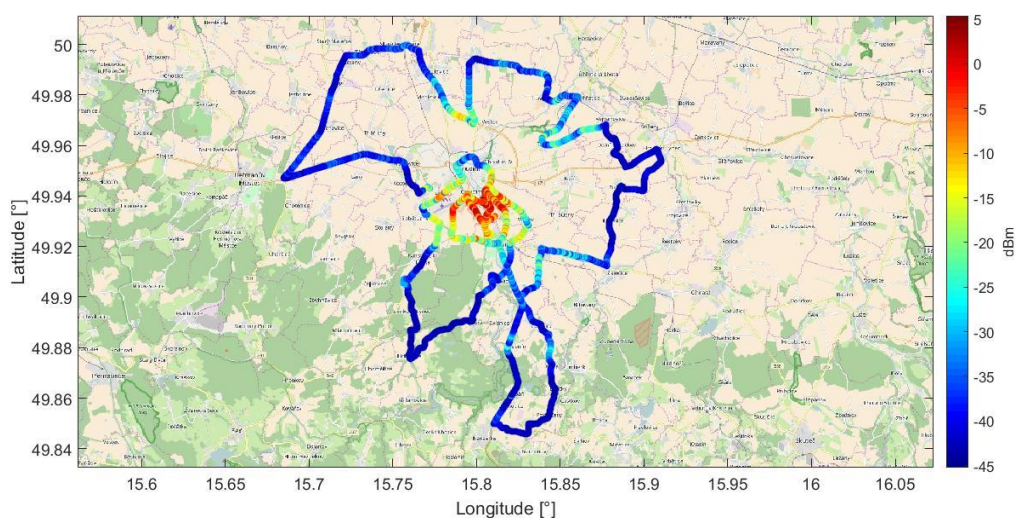
49.9722872N, 16.4071394E). Při měření se také projevila obsazenost pásma FM rozhlasu (87,5-108 MHz), když v okolí města Žumberk došlo k příjmu stanice Country rádio. Předpokládanou oblast pokrytí znázorňuje Obrázek 39, který v zápisu z rozhodnutí o udělení licence k vysílání, zveřejnila Rada pro rozhlasové a televizní vysílání. Porovnáním naměřených hodnot (Obrázek 37, Obrázek 38 a Obrázek 39) lze vyvodit rezervy v západní části, způsobené radiovým stínem Svitavské pahorkatiny.



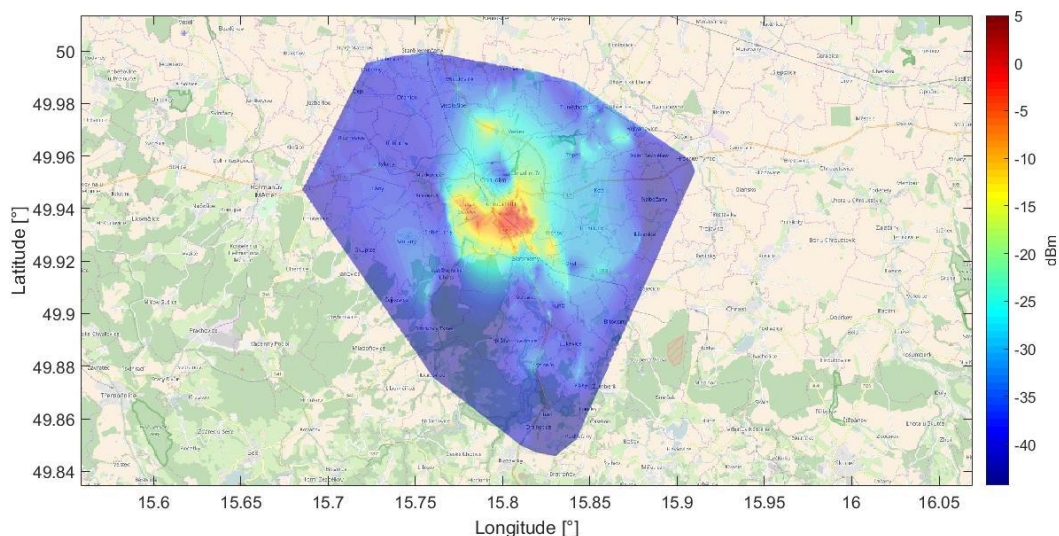
Obrázek 39 – Předpokládaný rozsah pokrytí (dle RRTV) [44]

4.3.3 Měření pokrytí služby DVB-T

Měření pokrytí vysílání digitální televize probíhalo dne 16. dubna 2017, v okolí regionálního vysílače Slatiňany (silo). Vysílací frekvence 690 MHz a vysílací výkon 10 kW. Vzhledem k šířce pásma, zabíraného DVB-T kanálem (8 MHz), bylo zvoleno použít jako střední frekvenci měření kmitočet 686,4 MHz se šířkou pásma 300 kHz a ziskem 20,7 dB. Použitím těchto parametrů byla měřena pouze okrajová část spektra signálu, díky čemuž část spektra nebyla zabírána signálem, ale šumem. Díky tomu bylo možné porovnat kvalitu měřeného signálu. Jako přijímací anténa byla zvolena teleskopická anténa, rozvinutá do délky $\lambda/4$.



Obrázek 40 - Mapa pokrytí signálu DVB-T – scatter map

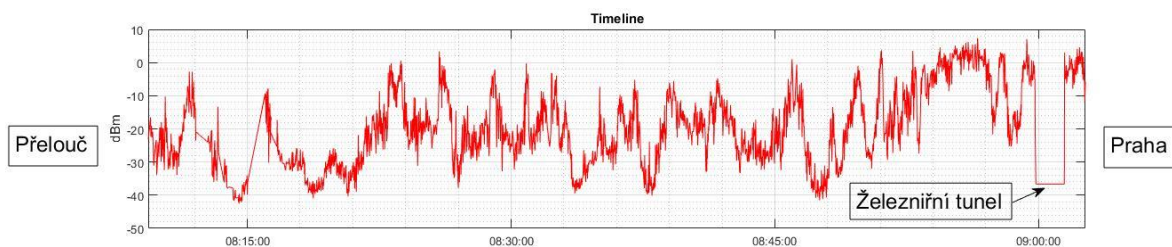


Obrázek 41 - Mapa pokrytí signálu DVB-T – strength map

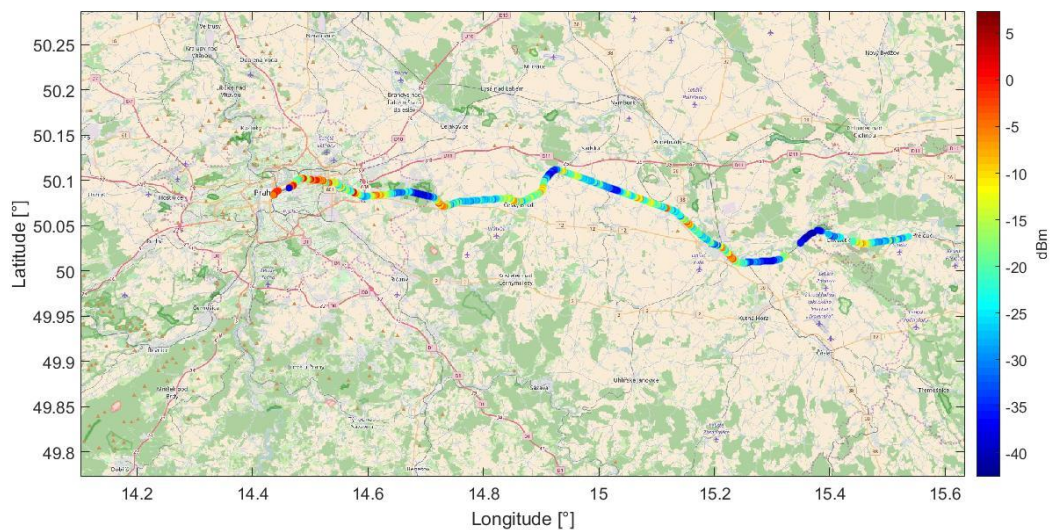
Z naměřených a vypočtených dat (Obrázek 40 a Obrázek 41) lze vyzorovat, že signál má dobré pokrytí v okolí vysílače a na místech s přímou viditelností. Překážkou k šíření signálu pak byly terénní nerovnosti, zástavba a zalesněná území.

4.3.4 Měření pokrytí služby LTE 800 – železniční koridor Praha – Pardubice

Měření pokrytí signálu služby LTE 800 mobilního operátora T-Mobile proběhlo dne 4.dubna 2017, na koridoru Praha-Pardubice. Měření bylo provedeno v úseku Přelouč – Hl. n. Praha, z důvodu problémové akvizice GPS pozice uvnitř vozu vlakové soupravy. V případě tohoto měření bylo nutné měřit pouze část spektra signálu, z důvodu nedostatečné šířky pásma přijímače. Zvolená byla frekvence signálu o hodnotě 792,8 MHz, šířka pásma 500 kHz a zisk 29,7 dB. Jako přijímací anténa byla zvolena anténa C37. Toto měření bylo dále zatíženo útlumem způsobeným konstrukcí vozu vlakové soupravy (oddílový vůz Bmz 241). Dle výsledků měření ČTU, publikovaných dne 31. března 2016 vyplývá, že tento vůz vykazuje na frekvencích služby LTE 800 průměrný útlum kolem 45 dB. [45]



Obrázek 42 - Časový průběh měření pokrytí signálu LTE 800 na železničním koridoru

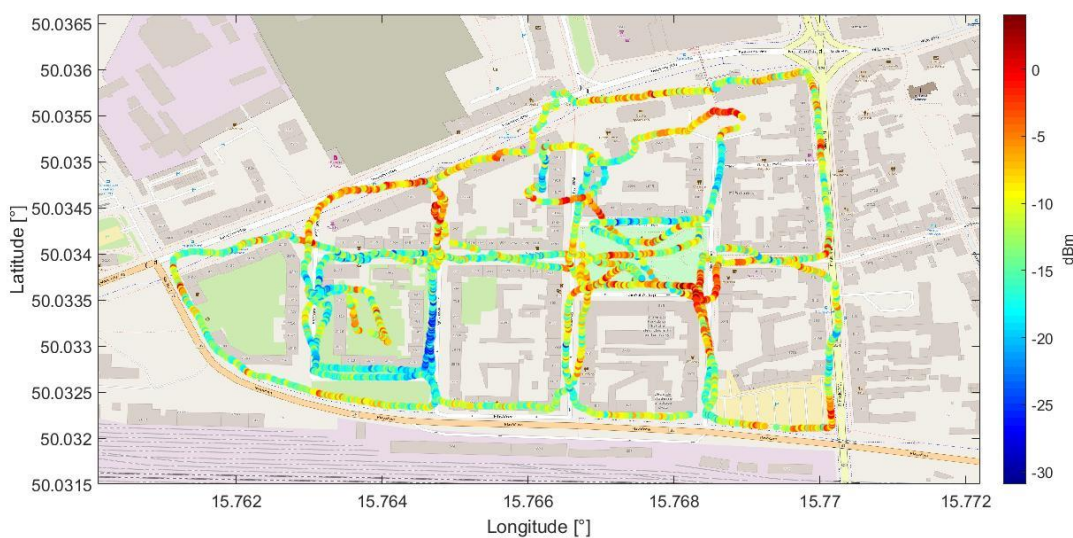


Obrázek 43 - Mapa pokrytí signálu LTE 800 na železničním koridoru - typ scatter

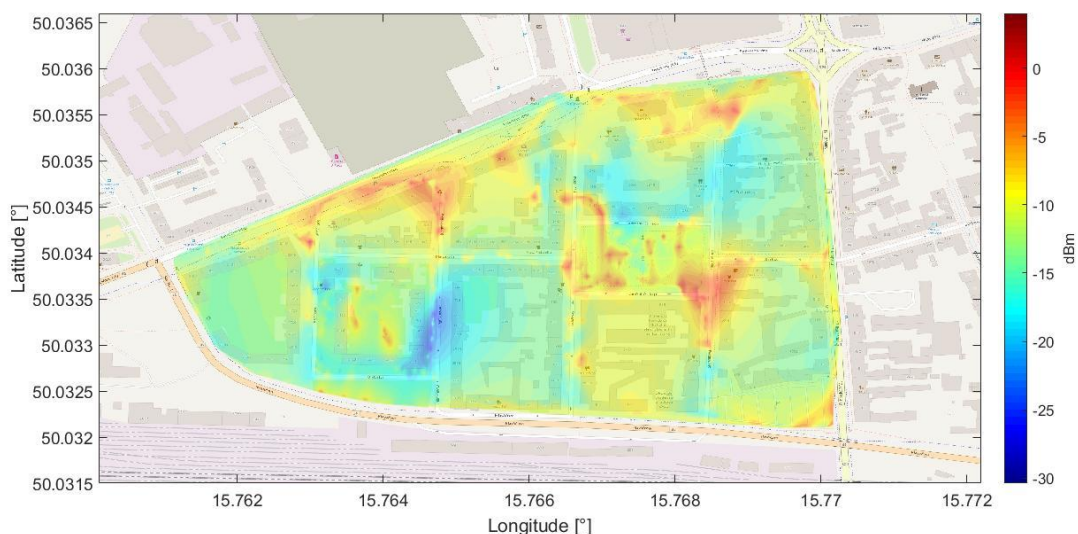
Z výsledků měření (viz. Obrázek 43 a Obrázek 42) vyplývá, že tato služba, při příjmu signálu ve zmíněném typu vozu vykazuje signál nejvyšší míru pokrytí v okolí větších měst. Problémovými částmi pak jsou zalesněné úseky a místa zastíněná výraznějšími terénními nerovnostmi.

4.3.5 Měření pokrytí služby LTE 800 – pokrytí v zástavbě

Měření bylo uskutečněno pro vyšetření pokrytí signálu služby LTE 800 mobilního operátora T-Mobile. Měření proběhlo dne 2. května 2017, v okolí Fakulty elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice. Kmitočet příjmu byl zvolen 791,8 MHz, šířka pásma 300 kHz a zisk vnitřního zesilovače 20,7 dB. Jako přijímací anténa byla zvolena anténa C37.



Obrázek 44 - Mapa pokrytí signálu LTE 800 v zástavbě – typ scatter



Obrázek 45 - Mapa pokrytí signálu LTE 800 v zástavbě – typ strength map

Z vykreslených obrázků (viz. Obrázek 44 a Obrázek 45) lze odvodit míru pokrytí zvolené oblasti. V levé polovině dolní části lze vypočítat místo nejhoršího příjmu signálu. Toto místo v době měření bylo, kromě budov, silně zastíněno stromy, které pravděpodobně způsobily výrazný útlum signálu. Nejlepší hodnoty vykazují místa s velkou koncentrací pohybu osob (Palackého třída – v horní části obrázků a náměstí Čs. Legií – zhruba uprostřed). V průběhu měření se vyskytl vliv budov na GPS signál, což způsobilo nepřesnosti v určení polohy. Tento následek viditelně ilustruje Obrázek 44, kde trasa měření chybně prochází napříč budovami. Přesto však při měření nebylo zaznamenáno žádné místo, kde by signál služby LTE 800 naprosto chyběl. Tuto lokaci tedy lze považovat za dobře pokrytou.

ZÁVĚR

Náplní bakalářské práce bylo vytvoření mobilního pracoviště pro měření přijatého výkonu vybraných radiových signálů, společně se záznamem GPS pozice provedeného měření. Tyto cíle byly úspěšně splněny.

První kapitola je věnována teoretickému úvodu do elektromagnetismu, šíření radiových vln, reprezentaci signálu v časové a frekvenční oblasti a I/Q dat. Dále byla popsána architektura softwarově definovaného rádia a uvedeny parametry vybraných komerčně dostupných přijímačů. Následoval úvod do rádiového monitoringu a dohledu nad kmitočtovým spektrem v České republice. Závěr teoretické části byl věnován systému určování polohy pomocí GPS a popisu standardu NMEA 0183.

Druhá kapitola obsahuje popis hardwaru, použitého pro účely vyvinuté měřící aplikace. Popis zahrnuje detaily a funkční schéma přijímače RTL-SDR, GPS přijímače Gmouse VK-162 a použité výpočetní jednotky (laptopu). Použitý přijímač (RTL-SDR) omezuje použitelnost měřícího pracoviště na rozsah kmitočtů od 24 MHz do 1766 MHz. Maximální stabilní šířka pásma zmíněného přijímače je 2,4 MHz.

Ve třetí kapitole je popsán vývoj aplikace v prostředí MATLAB. Tato aplikace se skládá ze dvou samostatně spustitelných programů. První je určen pro záznam výkonu vybraného signálu, přijatého pomocí SDR přijímače. Záznam jednoho odběhu obsahuje špičkovou hodnotu zájmového spektra, průměrnou hodnotu zájmového spektra, průměrnou hodnotu z hodnot základního spektra, kromě zájmového spektra a čas s datumem pořízení měření. Naměřené hodnoty lze následně vyexportovat do csv souboru.

Poslední, tedy čtvrtá kapitola, obsahuje popis vytvořeného měřícího pracoviště, použité antény a zvolenou metodiku měření pokrytí vybraných služeb. Dále jsou popsána uskutečněná měření vybraných služeb (FM rozhlas, DVB-T, LTE 800 a běžný vysílač s nízkým vysílacím výkonem v pásmu 433 MHz). Výstupem těchto měření jsou poznatky z průběhů měření, grafické výstupy, vybrané vhodně pro dané měření (scatter mapa, strength mapa a časová osa měření), a závěrečné zhodnocení provedených měření, obsahující poznatky, které z těchto měření vzešly.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] P. Bezoušek, V. Schejbal a P. Šedivý, Elektrotechnika, Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008.
- [2] Matematicko-fyzikální fakulta, „1.3 Rovinné vlny,“ Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, [Online]. Available: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/optika/1_3. [Přístup získán 7. duben 2017].
- [3] OK1PD, „Šíření rádiových signálů,“ Český radioklub, 2006. [Online]. Available: <http://www.crk.cz/SIRENIC>. [Přístup získán 10. duben 2017].
- [4] S. Krupa, „Multichannel fading,“ 19. duben 2016. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/ShreeKrupa1/multichannel-fading>. [Přístup získán 11. duben 2017].
- [5] J. Dobeš a V. Žalud, Moderní radiotechnika, Praha: BEN - technická literatura, 2006.
- [6] E. Mcmilin, „Ambient RF Energy Harvesting,“ Stanford University, 15. prosinec 2014. [Online]. Available: <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/mcmilin2/>. [Přístup získán 8. duben 2017].
- [7] M. Q. Kuisma, „I/Q Data for Dummies,“ 21. listopad 2016. [Online]. Available: <http://whiteboard.ping.se/SDR/IQ>. [Přístup získán 30. březen 2017].
- [8] National Instruments, „What is I/Q Data?,“ 30. březen 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>. [Přístup získán 30. březen 2017].
- [9] B. Stewart, K. Barlee, D. Atkinson a L. Crockett, Software Defined Radio using MATLAB Simulink and the RTL-SDR, Glasgow: University of Strathclyde, 2015.
- [10] UREL FEKT VUT Brno, „Softwarově definované rádio,“ VUT Brno, 8. leden 2013. [Online]. Available: http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Softwarov%E9%2C_kognitivn%ED_a_kooperativn%ED_r%E1dio:Softwarov%E9_a_softwarov%EC_definovan%E9_r%E1dio. [Přístup získán 11. duben 2017].

- [11] rtl-sdr.com, „Roundup of software defined radios,“ rtl-sdr.com, 20. srpen 2014. [Online]. Available: <http://www.rtl-sdr.com/roundup-software-defined-radios/>. [Přístup získán 2. březem 2017].
- [12] Český telekomunikační úřad, „Měsíční monitorovací zpráva č. 12 Českého telekomunikačního úřadu červenec 2007,“ červenec 2007. [Online]. Available: <https://www.ctu.eu/sites/default/files/obsah/clanky/61919/soubory/monitorovaci-zprava-12-cervenec-2007-1187091112.pdf>. [Přístup získán 11. dubem 2017].
- [13] Rohde & Schwarz, „Spectrum monitoring,“ Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2016. [Online]. Available: <https://spectrum-monitoring.rohde-schwarz.com/>. [Přístup získán 11. dubem 2017].
- [14] „Amateur Radio Direction Finding,“ School Amateur Radio Club Network, [Online]. Available: http://www.sarcnet.org/activities/activity_ardf.html. [Přístup získán 8. dubem 2017].
- [15] Český telekomunikační úřad, „Kmitočtová tabulka,“ Český telekomunikační úřad, [Online]. Available: <http://www.ctu.cz/kmitoctova-tabulka>. [Přístup získán 2. březem 2017].
- [16] International Telecommunication Union, „V.431 : Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications,“ International Telecommunication Union, 18. srpen 2015. [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/R-REC-V.431-8-201508-I/en>. [Přístup získán 8. březem 2017].
- [17] digitalradiodab.cz, „Co je Digital Audio Broadcasting ?,“ digitalradiodab.cz, 2014. [Online]. Available: <http://www.digitalradiodab.cz/co-je-dab.html>. [Přístup získán 13. březem 2017].
- [18] V. Bílý, „Frekvenční přiděl na pásmech GSM, DCS, UMTS a LTE v České republice,“ GSMweb.cz, 2009. [Online]. Available: <https://www.gsmweb.cz/clanky/freq2.htm>. [Přístup získán 13. březem 2017].
- [19] NAVIPEDIA, „GPS General Introduction,“ European Space Agency, 9. prosinec 2015. [Online]. Available: http://www.navipedia.net/index.php/GPS_General_Introduction. [Přístup získán 6. dubem 2017].

- [20] „What is GPS?,“ National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing, 26. září 2016. [Online]. Available: <http://www.gps.gov/systems/gps/>. [Přístup získán 6. duben 2017].
- [21] „TTFF,“ European Space Agency, 18. září 2014. [Online]. Available: <http://www.navipedia.net/index.php/TTFF>. [Přístup získán 6. duben 2017].
- [22] „NMEA 0183 Standard,“ National Marine Electronics Association, 2016. [Online]. Available: https://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_0183_v_410.asp. [Přístup získán 6. duben 2017].
- [23] „NMEA-0183 messages: Overview,“ TRIMBLE, [Online]. Available: https://www.trimble.com/OEM_ReceiverHelp/V4.44/en/NMEA-0183messages_MessageOverview.html. [Přístup získán 6. duben 2017].
- [24] „SiRFstarIIeLP Evaluation Kit User’s Guide,“ SiRF Technology, Inc., leden 2016. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual1.pdf>. [Přístup získán 6. duben 2017].
- [25] Realtek Semiconductor Corp., „RTL2832U,“ Realtek Semiconductor Corp., 2017. [Online]. Available: <http://www.realtek.com.tw/products/productsView.aspx?Langid=1&PFid=35&Level=4&Conn=3&ProdID=257>. [Přístup získán 17. únor 2017].
- [26] Rafael Micro, „SILICON TUNER PRODUCT LINE,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.rafaelmicro.com/product/list/3>. [Přístup získán 11. duben 2017].
- [27] S. Markgraf, D. Stolnikov, Hoernchen, K. Keen, C. Vogel a H. Welte, „SDR (Software Defined Radio),“ <http://osmocom.org>, 2017. [Online]. Available: <http://osmocom.org/projects/sdr/wiki/rtl-sdr>. [Přístup získán 11. duben 2017].
- [28] „About RTL-SDR,“ [Online]. Available: <http://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>. [Přístup získán 17. únor 2017].
- [29] roklobsta, „Welcome to the rtl-sdr.org wiki!,“ rtl-sdr.org, 10. duben 2016. [Online]. Available: <https://rtl-sdr.org/>. [Přístup získán 17. únor 2017].

- [30] rtl-sdrblog, „Slovenian University Student & Security Researcher Almost Jailed for Researching TETRA with an RTL-SDR,“ rtl-sdr.com, 27. květen 2016. [Online]. Available: <http://www.rtl-sdr.com/security-researcher-jailed-for-researching-tetra/>. [Přístup získán 11. duben 2017].
- [31] TETRA News, „Suspended Prison Sentence for Disclosing TETRA Security Issues,“ TETRA-applications.com, 23. květen 2016. [Online]. Available: <http://www.tetra-applications.com/32638/news/suspended-prison-sentence-for-disclosing-tetra-security-issues>. [Přístup získán 11. duben 2017].
- [32] rtl-sdrblog, „RTL-SDR Tutorial: Receiving NOAA Weather Satellite Images,“ rtl-sdr.com, 13. květen 2013. [Online]. Available: <http://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-tutorial-receiving-noaa-weather-satellite-images/>. [Přístup získán 11. duben 2017].
- [33] D. P. Tomcsanyi, „The big GSM write-up “ how to capture, analyze and crack GSM?“,“ Going on my way..., 13. říjen 2013. [Online]. Available: <https://domonkos.tomcsanyi.net/?p=428>. [Přístup získán 11. duben 2017].
- [34] rtl-sdrblog, „RTL-SDR Tutorial: Cheap ADS-B Aircraft Radar,“ rtl-sdr.com, 13. duben 2013. [Online]. Available: <http://www.rtl-sdr.com/adsb-aircraft-radar-with-rtl-sdr/>. [Přístup získán 11. duben 2017].
- [35] Rafael Microelectronics, „Microsoft Word - R820T_datasheet-Non_R-20111130,“ 30 Listopad 2011. [Online]. Available: http://rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked.pdf. [Přístup získán 19. březen 2017].
- [36] rhydoLABZ INDIA, „Mini Gmouse VK-162 (GPS Receiver USB),“ Rhydo Technologies (P) Ltd, 2016. [Online]. Available: http://www.rhydolabz.com/wireless-gps-c-130_186/mini-gmouse-vk162-gps-receiver-usb-p-2026.html. [Přístup získán 11. duben 2017].
- [37] Dell Inc., „Inspiron 11 3000 Series 2-in-1 Laptop,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.dell.com/en-us/shop/productdetails/inspiron-11-3157-laptop>. [Přístup získán 18. duben 2017].
- [38] MathWorks, „RTL-SDR Support from Communications System Toolbox,“ 2017.

- [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/hardware-support/rtl-sdr.html>. [Přístup získán 18. duben 2017].
- [39] T. Jarvi, „Configuring and Controlling External Hardware in MATLAB,“ MathWorks, 2007. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/configuring-and-controlling-external-hardware-in-matlab.html>. [Přístup získán 20. duben 2017].
- [40] Tecno Comunicazioni, „Hoxin VUM-201 SAM Antenna Veicolare Magnetica con connettore SMA,“ [Online]. Available: <http://www.tecnocomunicazioni.com/hoxin-vum-201-sam-antenna-veicolare-magnetica-con-connettore-sma.html>. [Přístup získán 29. duben 2017].
- [41] radio-shop.cz, „SRH 519 SMA,“ [Online]. Available: <http://www.radio-shop.cz/anteny-pro-rucky/srh-519-sma/>. [Přístup získán 29. duben 2017].
- [42] GM electronic, „Venkovní všesměrová anténa C37,“ [Online]. Available: <https://www.gme.cz/venkovni-vsesmerova-antena-c37>. [Přístup získán 29. duben 2017].
- [43] Shenzhen LC Technology Co.,Ltd, „SYN115 F115 433M ASK wireless transmitting module,“ 25. červenec 2014. [Online]. Available: http://www.chinalctech.com/index.php?_m=mod_product&_a=view&p_id=652. [Přístup získán 2. květen 2017].
- [44] Rada pro rozhlasové a televizní vysílání, „Rozhodnutí o udělení licence č. 4095766,“ 17. květen 2016. [Online]. Available: <http://www.rrtv.cz/cz/files/lic/4877268.pdf>. [Přístup získán 30. duben 2017].
- [45] Český telekomunikační úřad, „Zpráva č. 1604-004-00/1M o výsledcích měření útlumu stěn železničních vozů pro signály mobilních sítí,“ 31. březen 2016. [Online]. Available: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/91655/soubory/vysledkymereniutlu-mustenzeleznicnichvozu.pdf>. [Přístup získán 30. duben 2017].

PŘÍLOHY

Zdrojový kód aplikace a naměřená data jsou k dispozici na přiloženém CD.