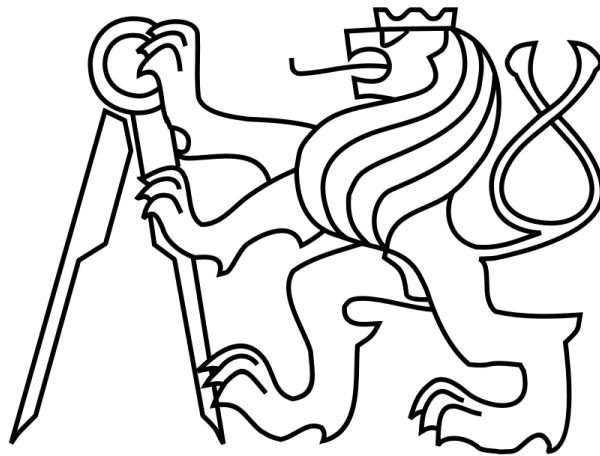


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



Bakalářská práce

Signály systémů eLORAN, Čajky a LTE jako 'opportunity' signals

The eLORAN, Tchayka and LTE Signals as Opportunity Signals

Autor: Juraj Rečka

Vedoucí práce: Prof. Ing. František Vejražka, CSc.

2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci zpracoval sám dle zadání a za použití podkladů, které jsem uvedl v přiloženém seznamu.

V Praze dne 22. 5. 2017

.....
Juraj Rečka

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rečka** Jméno: **Juraj** Osobní číslo: **434964**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Signály systémů eLORAN, Čajky a ev. LTE jako 'opportunity' signals

Název bakalářské práce anglicky:

The eLORAN, Tchayka and LTE Signals as Opportunity Signals

Pokyny pro vypracování:

Zabývejte se možnostmi příjmu signálů systémů eLORAN a Čajka pro určení polohy. Uskutečňte experimenty s příjmem těchto signálů pokusnou rámovou anténou a nízkošumovým zesilovačem. Signály se pokuste zpracovávat zařízením USRP 210 Ettus; vytvořte programy pro tyto experimenty. Zvažte, zda lze těchto signálů využít pro podporu přijímačů družicové navigace, příp. popište další eventuality.

Písemná zpráva: do 50 stran, příp. pravidelné dílčí zprávy.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Vejražka, F.: Loran C. Text z časopisu Letectví a kosmonautika, 1988.
- [2] Forssell, B.: Radionavigation systems.
- [3] Chun Yang: Signals of Opportunity for Positioning. ION Cal Sec Meeting. Torrance, Sep, 2011.
- [4] Grejner-Brzezinska, D.: Referát na IAIN World Meeting, Praha, OCT 2015.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. František Vejražka CSc., katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce prof. Františku Vejražkovi za odborné vedení, vstřícnost a trvalou podporu.

Děkuji také Ing. Jiřímu Svatoňovi a Bc. Rostislavu Karáskovi za cenné rady a nezanedbatelnou pomoc.

Za rady, doplňující informace o Loranu a měření děkuji Ing. Janu Šafářovi, Ph.D.

Ďakujem svojey rodine za vytvorenie podmienok, bez ktorých by táto práca nemohla vzniknúť.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá možnostmi příjmů signálů systémů Loran, Čajka a DRM za účelem určování polohy. V softwaru MatLab jsou navrženy algoritmy pro příjem a analýzu těchto signálů (a i signálů LTE). Příjem byl realizován přijímačem Ettus N210.

Klíčová slova

Hyperbola, Navigační systém, Loran, Čajka, DRM, Šíření vln, Přímá vlna, Odražená vlna, Ettus N210, GSM, LTE

Summary

The Bachelor's thesis deals with the possibilities of signal reception from systems Loran, Tchayka DRM and LTE for the purpose of determining the position. Algorithms, designed in software MatLab are intended for analysis received signals (including signals LTE). Reception was realized by receiver Ettus N210.

Index Terms

Hyperbola, Navigation systems, Loran, Tchayka, DRM, Propagation of waves, Direct wave, Reflected wave, Ettus N210, GSM, LTE

Obsah

| | |
|---|----|
| 1 Úvod | 3 |
| 1.1 Cíl práce | 3 |
| 1.2 Definice vybraných pojmů | 4 |
| 2 Hyperbolická navigace | 6 |
| 2.1 Loran | 10 |
| 2.1.1. Vznik a vývoj do Loranu-C | 10 |
| 2.2.2 Popis Loranu-C | 11 |
| 2.2.3 eLoran a Eurofix | 15 |
| 2.2 Čajka | 20 |
| 2.3 Současný stav a budoucnost Loranu a Čajky | 22 |
| 3 Přijímač Ettus N210 | 24 |
| 3.1 Propojení s počítačem | 25 |
| 3.2 GNU Radio | 26 |
| 4 Digitalizace rozhlasového vysílání | 27 |
| 4.1 DRM | 27 |
| 4.1.1 Popis DRM | 27 |
| 4.1.2 Přijímače DRM | 30 |
| 4.1.3 DRM(+) a T-DAB | 30 |
| 4.1.4. DRM(+) dnes | 30 |
| 5 Šíření vln | 33 |
| 5.1 Úvod | 33 |
| 5.2 Útlumy | 34 |
| 5.3 Složení atmosféry | 36 |
| 5.3.1 Troposféra | 36 |
| 5.3.2 Ionosféra | 37 |
| 5.4 Odrazy vln od povrchu Země | 40 |
| 5.5 Shrnutí | 41 |

| | |
|--|----|
| 6 Pokusné příjmy..... | 42 |
| 6.1 Příjem Loranu..... | 43 |
| 6.1.1 Měření pomocí vzdálených přijímačů | 46 |
| 6.1.2 Měření přijímačem Reelektronika LORADD | 47 |
| 6.1.3 Loran a Čajka – shrnutí | 50 |
| 6.2 Příjem DRM | 51 |
| 6.2.1 DRM – Shrnutí | 54 |
| 7 Signály LTE | 55 |
| 7.1 Úvod k LTE..... | 55 |
| 7.2 Od analogových telefonů k LTE | 55 |
| 7.2.1 Base Transceiver Station | 57 |
| 7.2.2 Base Station Controller..... | 59 |
| 7.2.2.1 Handover | 59 |
| 7.3 Poloha zařízení v síti GSM..... | 59 |
| 7.3.1 Možné metody určování polohy v mobilních sítích | 60 |
| 7.3.2 Poloha v sítích LTE | 61 |
| 7.4 LTE - Shrnutí..... | 62 |
| 8 Závěr..... | 63 |
| 8.1 Směr další činnosti | 63 |
| 9 Seznam použité literatury | 64 |
| 10 Přílohy | 69 |
| 10.1 Seznam příloh..... | 69 |
| 10.1.1 Příloha 1 – skript 1 | 70 |
| 10.1.2 Příloha 2 – skript 2 | 72 |
| 10.1.3 Příloha 3 – ukázka z aplikace GNU Radio Companion | 74 |

1 Úvod

Družicová navigace, která je v současnosti jedním z nejpoužívanějších systémů pro určování polohy, nedosahuje dostatečnou přesnost v případech, kdy se přijímač nachází v problematickém prostředí (v budovách, či pod vegetací). Systémy GNSS jsou i relativně lehkou rušitelné. Z těchto důvodů se může v podmínkách, nepříznivých pro GNSS, přistoupit k určování polohy ze signálů pozemních vysílačů.

První skupinou jsou tzv. „Opportunity Signals“. Tyto signály nejsou primárně určeny k určování polohy, ale mají vlastnosti, které určování polohy umožňují. Pro experimenty byly vybrány signály DRM (kapitola 4.1) a signály LTE, resp. GSM (kapitola 7).

Druhou skupinou signálů, představujících alternativu ke GNSS, jsou signály pozemských navigačních systémů. Z této množiny signálů byl vybrán Loran (kapitola 2.1) a Čajka (kapitola 2.2).

Odlíšné mechanismy šíření vln pro pozemní a družicovou navigaci jsou popsány v kapitole 5.

1.1 Cíl práce

Cílem práce bylo prověřit možnosti příjmů vybraných signálů na území ČR pro účely určování polohy. Pro příjmy byl použit přijímač Ettus N210, ke kterému byly vyvinuty skripty v softwaru MatLab (kapitola 3.1).

1.2 Definice vybraných pojmů¹

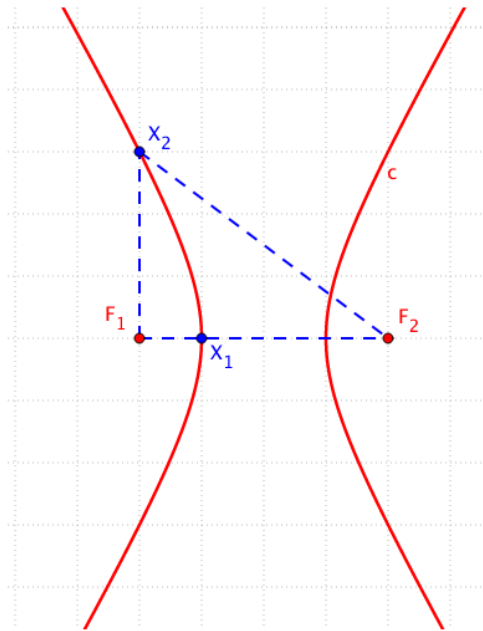
| | | |
|---------|---|--|
| 3GPP | The 3rd Generation Partnership Project | Partnerský projekt 3. generace |
| AOA | Angle of Arrival | Směr příchodu signálu |
| BSC | Base Station Controller | Ovladač BTS |
| BTS | Base Transceiver Station | Základnová stanice v sítích GSM |
| BICN | Bearer-Independent Core Network | Síť GSM s jednou infrastrukturou |
| BCCH | Broadcast Common Control Channel | Kanál, dohlížející na spojení |
| CRC | Cyclic redundancy check | Cyklický redundantní součet |
| COFDM | Coded OFDM | OFDM s kódováním |
| DGPS | Differential GPS | Diferenciální GPS |
| DRM | Digital Radio Mondiale | Standard rozhlasového vysílání |
| DTMF | Dual-tone multi-frequency | Tónová volba |
| ECD | Envelope-to-Cycle Difference | Časový posun |
| ERP | Effective radiated power | Efektivní vyzářený výkon |
| eLoran | Enhanced Loran | Vylepšená verze Loranu |
| eDLoran | Differential eLoran | Diferenciální eLoran |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute | Evropský ústav pro telekomunikační normy |
| FAC | Fast Access Channel | Kanál rychlého přístupu |
| FCCH | Frequency Correction Channel | Kanál kmitočtových korekcí |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access | Kmitočtové dělení kanálu |
| FPGA | Field Programmable Gate Array | Programovatelné hradlové pole |
| FSL | Free – Space path Loss | Ztráty volným prostorem |
| GRI | Group Repetition Interval | Opakovací interval, označení skupiny vysílačů Loranu |
| GSM | Groupe Spécial Mobile | Globální Systém Mobilní komunikace |
| GNSS | Global Navigation Satellite System | Globální systém družicové navigace |
| GPS | Global Positioning System | Americký systém družicové navigace |
| GLONASS | ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система | Ruský systém družicové navigace |
| GALILEO | | Evropský systém družicové navigace |
| LA | Location Area | Seskupení buněk v síti GSM |
| Loran | LORange Navigation | Pozemní radionavigační systém Loran |
| Loran-C | | Verze Loranu |

¹ Většina pojmů, zkratk, či význam proměnných ve vztazích jsou vysvětleny i na příslušném místě v textu.

| | | |
|---------------|--|---|
| LTE | Long Term Evolution | Mobilní síť třetí generace |
| LDC | Loran Data Channel | Datový kanál Loranu |
| M | Master | Hlavní vysílač |
| MSC | Main Service Channel | Hlavní obslužný kanál |
| MUF | Maximum Usable Frequency | Nejvyšší kmitočet odrazu vln od ionosféry |
| MPEG-4 AAC | Advanced Audio Coding | Kompresa zvuku v rámci standardu MPEG-4 |
| NELS | Northwest European Loran System | Evropský severozápadní systém Loranu |
| OFDM | Orthogonal frequency-division multiplexing | Druh modulace s kmitočtovým dělením |
| PCI | Phase-Code Interval | Fázově – kódovací interval |
| PRS | Positioning reference signal | Signály pro určování polohy |
| PPM | Pulse Position Modulation | Modulace posuvem pulzů |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation | Kvadrurní amplitudová modulace |
| S | Slave (Secondary) | Sekundární vysílač |
| SDC | Service Description Channel | Kanál popisu služby |
| SFN | Single Frequency Network | Síť, pracující na jednom kmitočtu |
| SNR | Signal-to-Noise Ratio | Odstup signál-šum |
| SZC | Standard Zero Crossing | Šesté překřížení nulové hodnoty |
| TOA | Time of Arrival | Čas příchodu (signálu) |
| T-DAB | Terrestrial Digital Audio Broadcasting | Standard pozemního vysílání rozhlasu |
| TDoA | Time Difference of Arrival | Rozdíl časů příchodu (signálů) |
| TDMA | Time Division Multiple Access | Sdílení jednoho kanálu více službami na základě časových slotů |
| UTC | Coordinated Universal Time | Koordinovaný světový čas |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunication System | Další vývoj GSM sítí |
| VOR/DME | VHF omnidirectional range, distance measuring equipment | Kombinace systémů pro leteckou radionavigace |

2 Hyperbolická navigace

Tento typ navigace je založen na faktu, že elektromagnetické vlny procházejí prostředím známou rychlostí. Měřením časového rozdílu příchodu signálů ze dvou různých bodů (vysílačů) získáváme dráhový rozdíl. Množina bodů, které mají stálý rozdíl vzdáleností ode dvou pevných bodů (ohnisek F_1 a F_2) je hyperbola; rozdíl vzdálenosti je jejím parametrem. Hyperbola má dvě větve, viz obrázek 1.

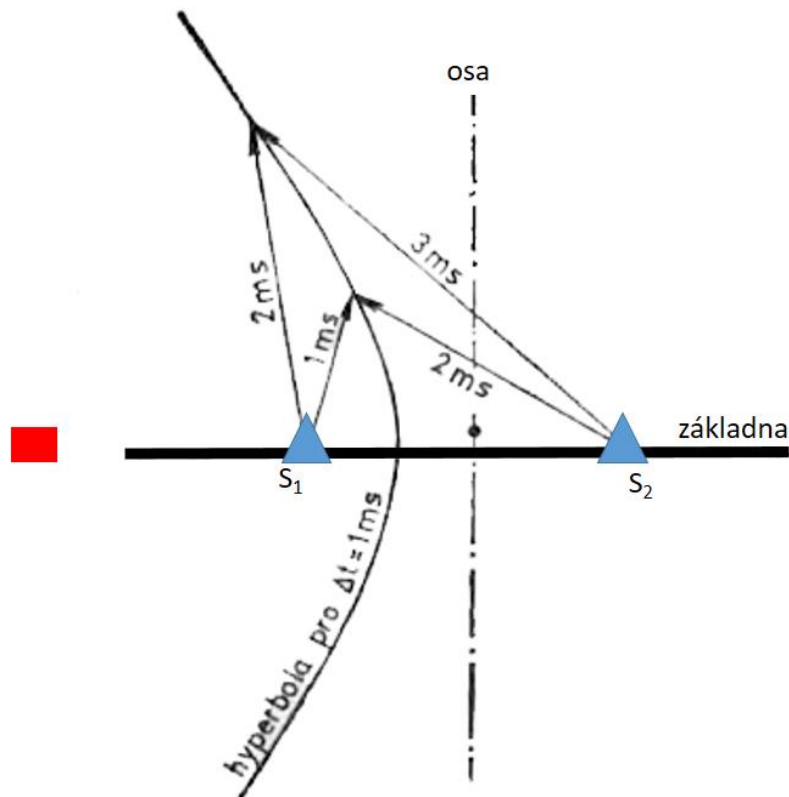


Obrázek 1: Hyperbola, převzato z [5]

Jedno měření rozdílů vzdáleností ode dvou vysílačů se známými polohami nám tedy poskytne informaci o tom, že se nacházíme na jedné z křivek.

Měřením s další dvojicí vysílačů pak „vytýčíme“ další hyperboly, s možnou polohou přijímače. Průnik dvojice hyperbol definuje polohu přijímače. U Loranu (viz kapitola 2.1) je minimální počet vysílačů 3, tj. dvě dvojice vysílačů, kde je jeden společný M (Master). V něm se nachází časová reference pro vysílače S (Slave); vysílače jsou vzájemně synchronizovány. Tyto vysílače řídí dle M své vysílání. Ve stanici M se rovněž sleduje správnost vysílání všech S stanic. Nejvíce problematické (chybové) je určení polohy, nacházíme-li se ve velké blízkosti jedné ze stanic. Hyperboly jsou pak velmi zakřivené a protínají se pod malými úhly (ideálně se protínají pod úhly blízko 90°). Problematická je i poloha, která je na obrázku 2 vyznačena červeným obdélníkem

(tzv. prodloužená základna). S_1 a S_2 jsou stanice, na obrázku 2 je vyznačena hyperbola pro konkrétní příklad $\Delta t = 1\text{ms}$. Dále jsou zde příklady pro $|2 - 3| = 1$ a $|1 - 2| = 1$.



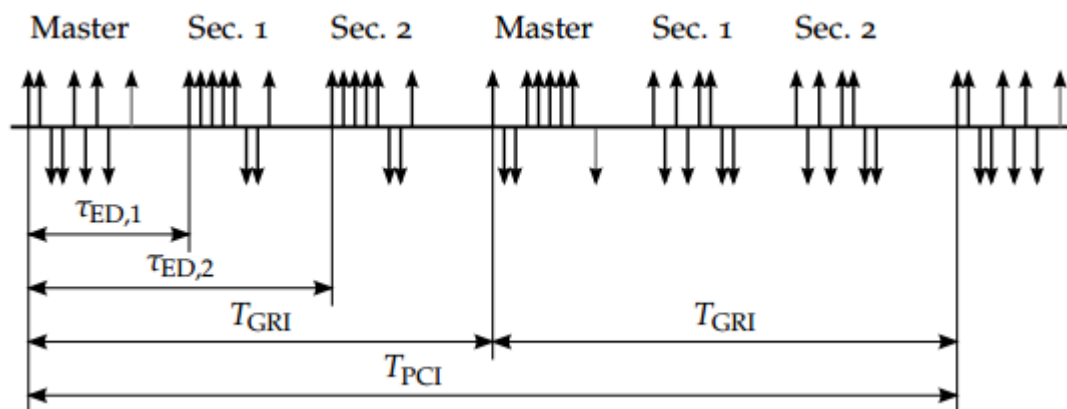
Obrázek 2: Příklad určení hyperboly možných poloh, převzato z [18]

Operace Loranu-C (ale i eDLoranu, viz kapitola 2.1) na jednotném kmítočtu je umožněna právě tím, že jsou stanice synchronizovány. Každá stanice vysílá sérii 8 pulzů, jejichž počátky jsou od sebe vzdáleny 1ms. Jak již bylo uvedeno, stanice M vysílá 9 pulz, mj. i na identifikaci skupiny (GRI, tj. opakovací interval skupiny). Vysílané pulzy se liší fází, která se mění dle dané sekvence, čím se zvyšuje odolnost vůči interferencím a jejich autokorelační funkce má výrazné maximum. Tato sekvence je shodná pro všechny stanice S. Fáze pulzů jsou v tabulce 1.

Tabulka 1: Fáze vysílaných pulzů (+, nebo -). První dva případy se následně opakují.

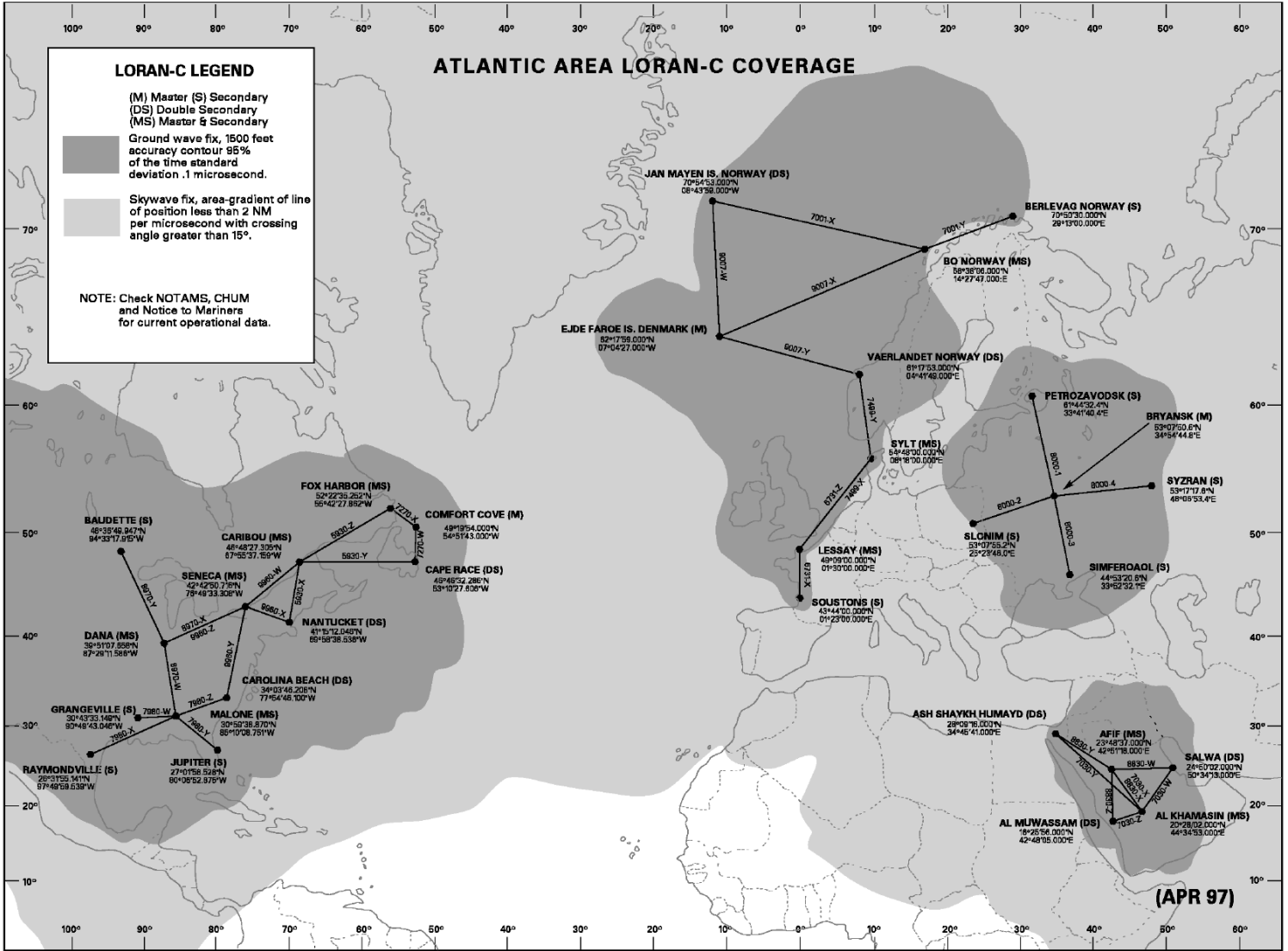
| | Master (M) | Slave 1 (S_1) | Slave 2 (S_2) | Slave 3 (S_3) |
|-------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| První opakování | + - - + + + + + | + - - - + + - - | + - - - + + - - | + - - - + + - - |
| Druhé opakování | + + - - - + - + | + + + + + - - + | + + + + + - - + | + + + + + - - + |
| Třetí opakování | <i>První opakování</i> | | | |
| Čtvrté opakování | <i>Druhé opakování</i> | | | |

Další znázornění vysílání je na obrázku 3, kde je fáze označena šipkou. Čas $\tau_{ED,1}$ je čas, o který se vysílání Sec. 1 (Slave) opožďuje od M. Podobný význam má čas $\tau_{ED,2}$. Po odvysílání M a všech S se sekvence opakuje, uplynulší čas je T_{GRI} . Z obrázku 3 vidíme, že T_{PCI} je dvojnásobkem hodnoty T_{GRI} . T_{PCI} je čas, po který se opakuje fázový kód, viz tabulka 1.



Obrázek 3: Časové vyjádření fází vysílaných pulzů jedné skupiny vysílačů, převzato z [6]

GRI je identifikátor skupin vysílačů. Každou skupinu tvoří řídicí maják M (master) a podružné majáky S (slave). Vezmeme-li hodnotu T_{GRI} v μs a vydělíme ji 10, dostaneme identifikátor GRI. Hodnoty T_{GRI} se teoreticky mohou pohybovat od $40\,000\mu s$ do $99\,990\mu s$ s rozestupem $10\mu s$ [6]. Dolní hranice je omezena vzdáleností mezi M a S. Větší počet stanic S znamená nutnost většího GRI. Na obrázku 4 je příklad pokrytí Atlantského oceánu. Tmavé úseky jsou s dominantním šířením povrchové vlny, světlejší vlny prostorové (viz kapitola 5). Vzhledem k ukončení činnosti Loranu v Evropě koncem roku 2015 je obrázek 4 jenom ilustrací konstelace vysílačů jednotlivých GRI. Na obrázku 4 jsou kromě polohy a příslušné GRI vyznačeny i informace o roli daného vysílače. Označení M je pro stanice typu Master, S pro Slave. Vysílá-li stanice signály Slave pro dvojici GRI, je označena DS (Dual Slave). Stanice, vysílající současně Master a Slave pro různé GRI, jsou označena MS. GRI 8000 napravo je obdobný systém Čajka, který bude dále popsán. Pozemní soustavy vysílačů Loranu tvoří komplexy o rozloze i do $0,25\text{km}^2$, včetně přijímací stanice ostatních vysílačů daného GRI, a soustav antén. Každá stanice je vybavena přesným časem, vysílací výkon je volen kolem 400kW .



Obrázek 4: Mapa pokrytí z roku 1997. GRI jsou vyznačené na spojnicích, S jsou vzestupně číslovány, nebo označeny X,Y,Z,W, převzato z [7]

2.1 Loran

2.1.1. Vznik a vývoj do Loranu-C

Loran (zkratka Long RAnge Navigation) byl dlouhohlavný navigační systém. Byl vyvinut v první polovině dvacátého století Spojenými státy. Využíval hyperbolické navigace. Používal skupinu pozemních vysílačů, od kterých se určovala různá doba přijetí signálů přijímačem. Z těchto údajů pak byla spočtena poloha přijímače. Vznik Loranu, resp. hyperbolické navigace umožnil tehdejší vývoj kmitočtových generátorů vysokých výkonů, a zařízení, schopných určovat relativní čas s přesností jednu miliontinu sekundy [1]. Během prvních experimentů bylo rozhodnuto použít nižší nosný kmitočet 100kHz, který dokázal zabezpečit dostatečný dosah pro námořní a leteckou navigaci. V roce 1940 National Defense Research Committee Spojených států rozhodla o realizaci tohoto projektu. Požadovaná přesnost byla 1000 stop (304 m).

Za zmínku stojí souběžně vyvíjený britský navigační systém Gee, který později posloužil k dalšímu vývoji Loranu. Tento systém pracoval s vysílači, které byly od sebe vzdálené 120 km. Přesnost určování polohy byla 3-5 km.

Vysílače Loranu jsou sdruženy do „řetězců“ (chain). První řetězec, který byl koncem roku 1941 zprovozněn již pod Loranovým standardem, byla skupina vysílačů Montauk a Fenwick ([2], západní pobřeží Spojených států). Postupně přibývaly další stanice, které byly rozmístovány podél západního i východního pobřeží Spojených států a Kanady. Oficiálně byl Loran zprovozněn v roce 1943. Během druhé světové války byly instalovány další vysílače v Grónsku, Spojeném království, Islandu, a na dalších ostrovech, což zajistilo kontinuální navigaci pro plavbu Atlantickým oceánem. Ke konci druhé světové války byl počet stanic (vysílačů) 72, které souhrnně pokrývaly plochu 20 miliónů km² (Atlantský oceán a část Tichého, [4]). Následně bylo obdobně pokryto území Tichého oceánu, Japonska a Koreje. Před zavedením jednotného kmitočtu 100kHz byly v roce 1944 prvotně prováděny experimenty s vyššími kmitočty, které se měnily během dne a noci (10,585MHz ve dne a 2MHz v noci). Nižší kmitočet u Loranu-C 100kHz zajistil menší počet vysílacích stanic a lepší dosah, a to zejména v námořní navigaci, pro kterou je v současnosti vymezeno pásmo 90 - 110kHz. Kromě navigace byl Loran v době svého vzniku první, globálně rozšířený, systém přenosu přesného času. Při pokusném měření vzdálenosti pomocí Loranu-C byla zaznamenaná odchylka 36 m na vzdálenosti 1610 km².

V době studené války byl souběžně s Loranem v Americe (a Evropě) vyvíjen obdobný navigační systém i tehdejším Sovětským svazem. Šlo o systém Čajka (Чайка, viz kapitola 2.2).

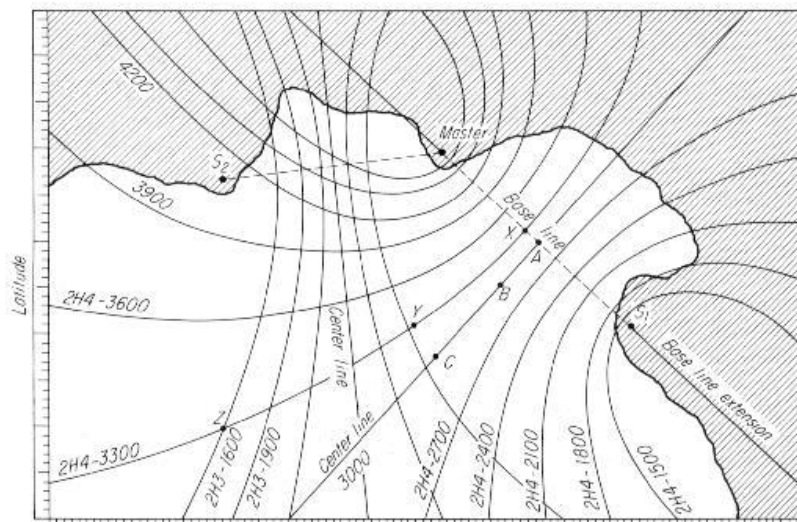
² Odchylka činila 118 stop na vzdálenosti 1000 mil, měřeno na moři, rok 1962

2.2.2 Popis Loranu–C

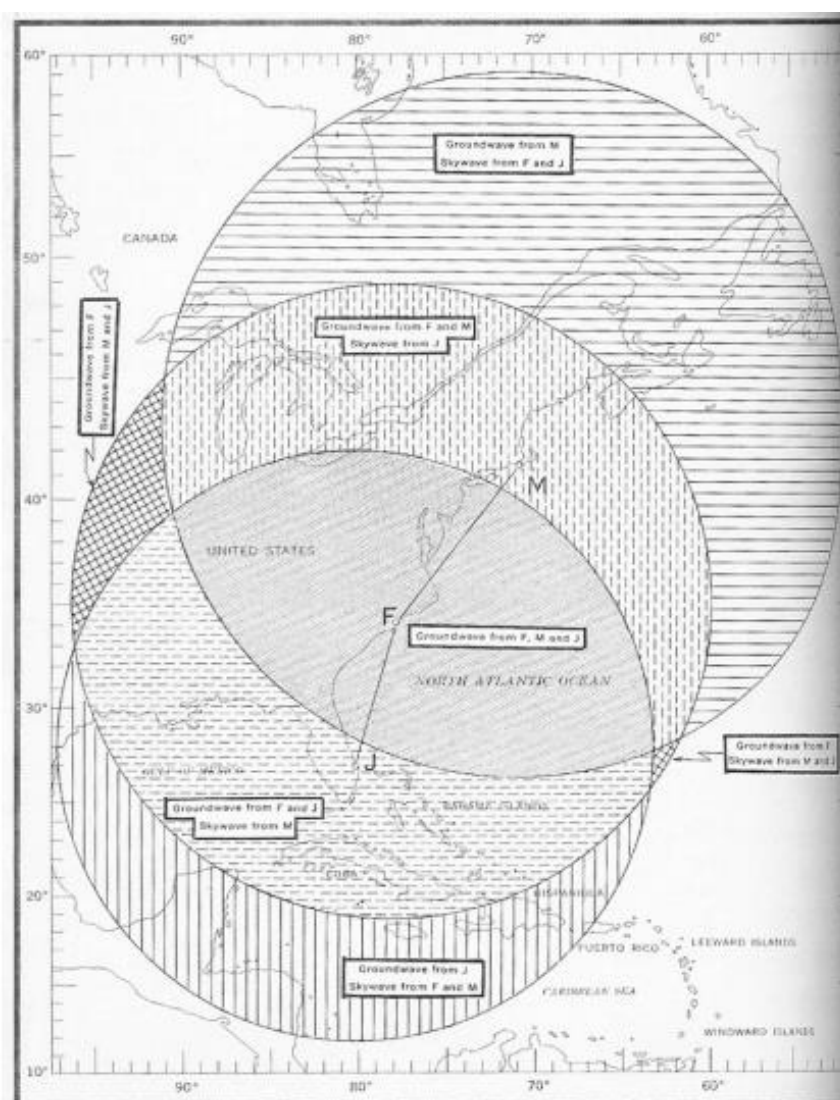
Loran-C byl výsledkem vývoje hyperbolických navigačních systémů z konce padesátých let. Na rozdíl od svých předchůdců byl během několika let celosvětově rozšířen, a umožňoval určování polohy i během nepříznivých meteorologických podmínek. V případě výpadku družicové navigace umožňoval Loran-C šíření času na velké vzdálenosti s přesností jedné mikrosekundy [3].

Vysílače jsou seskupeny ve skupinách, tzv. GRI (Group Repetition Interval), viz kapitola 2. V jedné skupině vysílačů (GRI) je jeden „master“ (M), který vysílá do všech směrů skupiny pulzů. V různých směrech od M jsou „slave“ (S) stanice, které vysílají rovněž skupiny pulzů. Vysílače M i S jsou časově synchronizovány.

Na rozdíl od Loranu-A je vysílání synchronizováno tak, že stanicí S je vždy přijat pulz ze stanice M. Vysílače S nevysílají současně s M, ale jsou zpožděny. To umožňuje zřetelnější určování časových rozdílů, a to i „vně“ soustavy stanic. Ze dvou měření z dvojic M-S₁ a M-S₂ určíme dvě hodnoty časových rozdílů. Při ručním určování zjistíme časový rozdíl mezi pulzy M a S. Tento časový (tj. dráhový) rozdíl se porovná s křivkou, zobrazenou ve speciální mapě (obrázek 5) pro danou hodnotu rozdílu. Čím blíže jsou křivky k vysílačům, tím jsou zakřivenější. Mapy, které se dříve používaly, měly zakreslených několik skupin vysílačů (většinou barevně rozlišených). Navigátor měl dále k dispozici tabulku „skywave corrections“, kde byly uvedeny korekce pro rozdílné časy šíření vlny povrchové a prostorové (popsáno v kapitole 5). Na základě předpokladu vlastní vzdálenosti ke konkrétní stanici vybral navigátor příslušnou korekci (hodnoty korekcí se pohybovaly přibližně do 30μs, kvůli různé výšce ionosféry se odlišovaly pro den a noc). Na obrázku 6 jsou na mapě vyznačena místa, kde převládá šíření povrchové, nebo prostorové vlny. Nejvyšší hodnoty korekcí jsou v případech, kdy se nacházíme blízko u jednoho vysílače z dvojice a zároveň daleko od druhého.

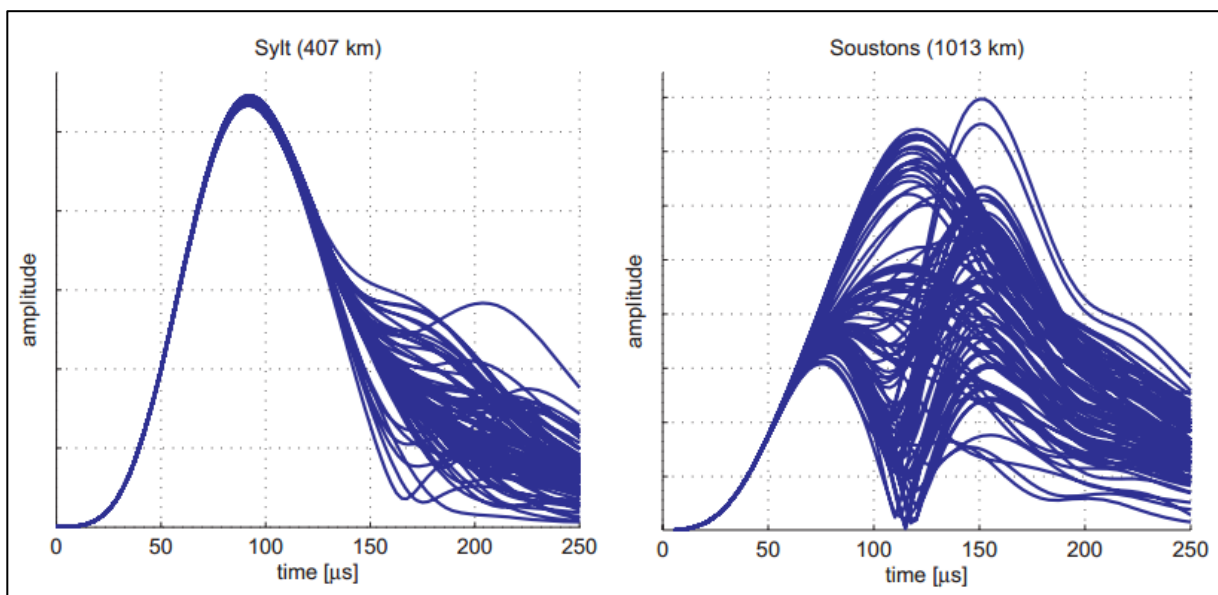


Obrázek 5: Mapa pro určování polohy Loranem, převzato z [4]



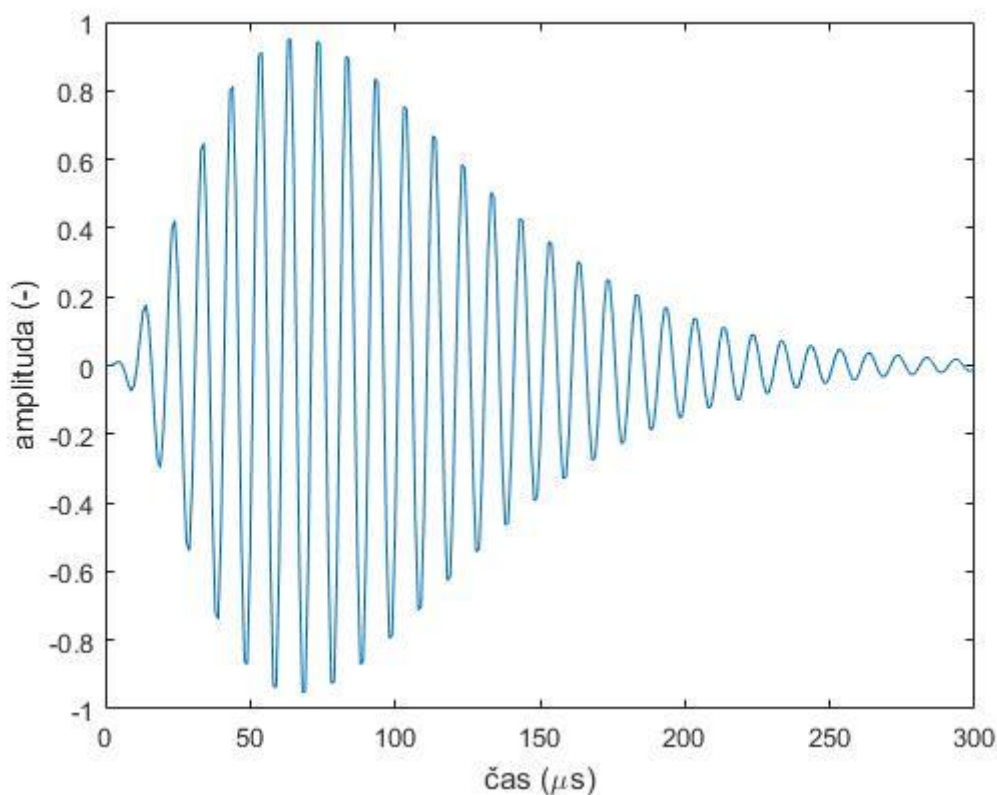
Obrázek 6: Vzdálenosti od různých vysílačů a oblasti kde převládá povrchová (groundwave), prostorová (skywave) vlna, a naopak, převzato z [4]

Stanice S obklopují stanici M, vzdálenost MS je přibližně do 1200 km. Stanice vysílají 8 pulzů (9 v případě M). Oproti Loranu-A měříme u Loranu-C i fázi nosné pulzů, kvůli přesnějšímu zjišťování časových rozdílů. Přesná synchronizace vysílačů je nezbytná k přesnému fungování systému. Devátý pulz stanic M plní mj. i tento účel. Nejsou-li stanice synchronizovány, automaticky změní vysílání pulzů tak, aby přijímač rozeznal, že daná skupina (GRI) není právě použitelná k určování polohy. Jak již bylo uvedeno, vysílače Loranu vysílají diskrétní pulzy (na rozdíl například od vysílačů DECCA), a to z důvodu zajištění větší přesnosti při šíření vln různými prostředím a na větší vzdálenosti při jednotném kmitočtu. Tvar pulzu byl vybrán s ohledem na zajištění maximální přesnosti navigace. Z důvodu znehodnocení přijímaného signálu prostorovou vlnou je žádoucí, aby měření proběhlo do prvních $30\mu\text{s}$. To vyžaduje, aby do této doby dosáhl pulz alespoň 50 % maximální amplitudy. Tato doba je označovaná SZC (Standard Zero Crossing), a je definovaná šestým překřížením nulové hodnoty amplitudy. Důvod volby $30\mu\text{s}$ je markantní na obrázku 7, kde jsou vykresleny obálky přijatých pulzů během 24 hodin. Rozvětvení průběhů indikuje příjem povrchové vlny a i vlny odražené a jejich vzájemnou interakci (viditelné zejména od přibližně $100\mu\text{s}$).



Obrázek 7: Obálky pulzů, přijatých za 24 hodin přijímači v Deftu. Jedna křivka je integrace příjmů za 15 minut. Vzdálenost od vysílačů je 407 km pro Sylt (vlevo), a 1013 pro Soustons (vpravo), převzato z [56]

Rychlý náběh pulzů vyžaduje široké kmitočtové pásmo, proto je volen tvar obálky podle obrázku 8. V úzkém kmitočtovém pásmu (90 – 110 kHz) se přenese 99% výkonu vysílače.



Obrázek 8: Tvar vysílaného pulzu Loranu (funkce $g(t)$)

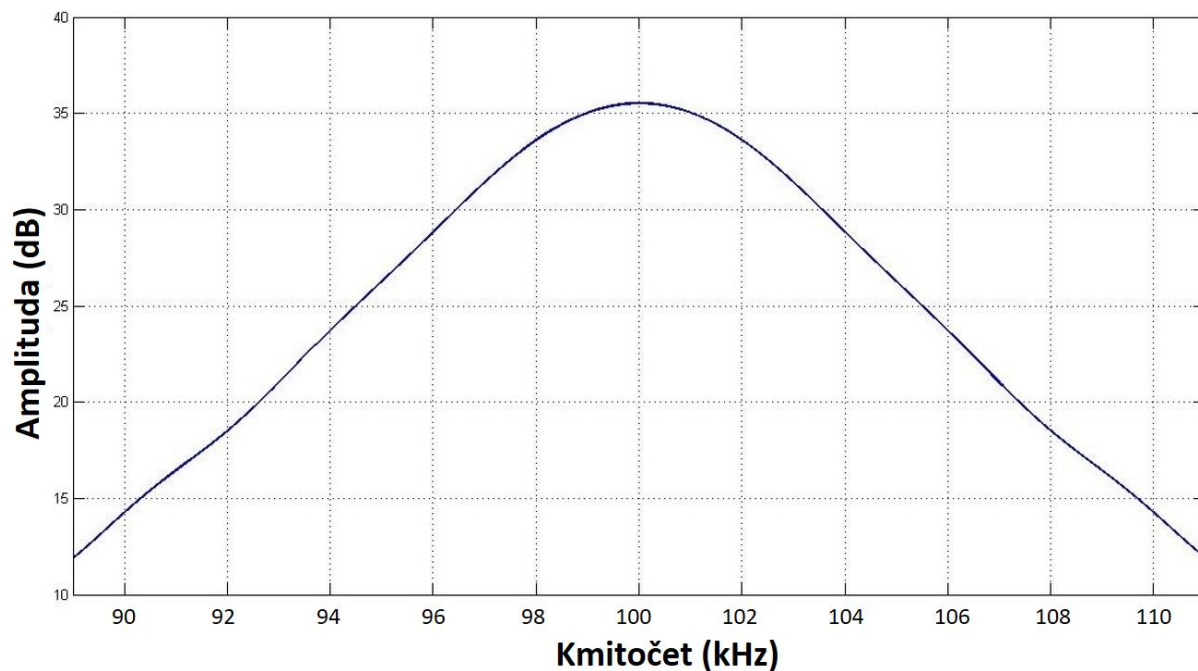
Zobrazený pulz je popsán vztahy (1) a (2):

$$f(t) = \left(\frac{t-ECD}{t_p}\right)^2 \cdot e^{2\left(1-\frac{t-ECD}{t_p}\right)} \quad (1)$$

$$g(t) = f(t) \cdot A \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \quad (2)$$

Ve vztazích (1) a (2) představují funkce $f(t)$ tvar obálky a $g(t)$ tvar pulzu v čase (t). ECD je Envelope-to-cycle difference, která představuje časový posun pro kompenzaci zkreslení tvaru signálu vlivem šíření prostředím. ECD se volí přibližně $0,5\mu\text{s}$, nicméně její hodnota neovlivňuje energii, ani fázi nosné ($f(t)$), a proto ji lze v tomto případě zanedbat ($ECD=0$).

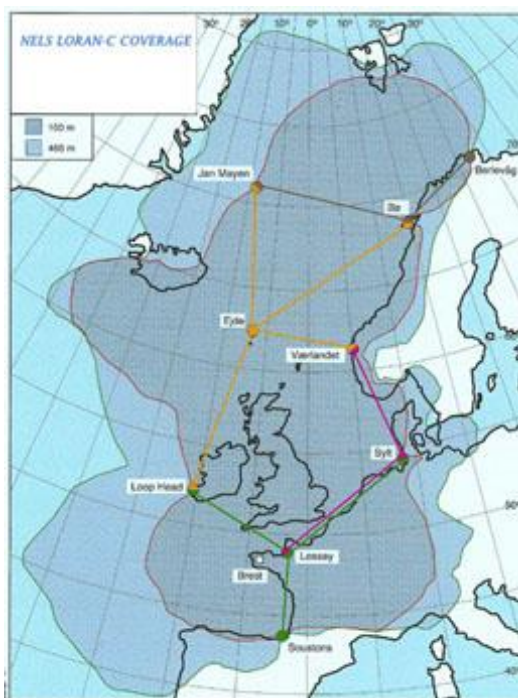
Čas, kdy je dosažena maximální amplituda A je t_p ($65\mu\text{s}$), f je kmitočet, tj. 100kHz . Na obrázku 9 můžeme vidět spektrum pulzu s energetickým rozdělením.



Obrázek 9: Spektrální rozložení energie pulzu

2.2.3 eLoran a Eurofix

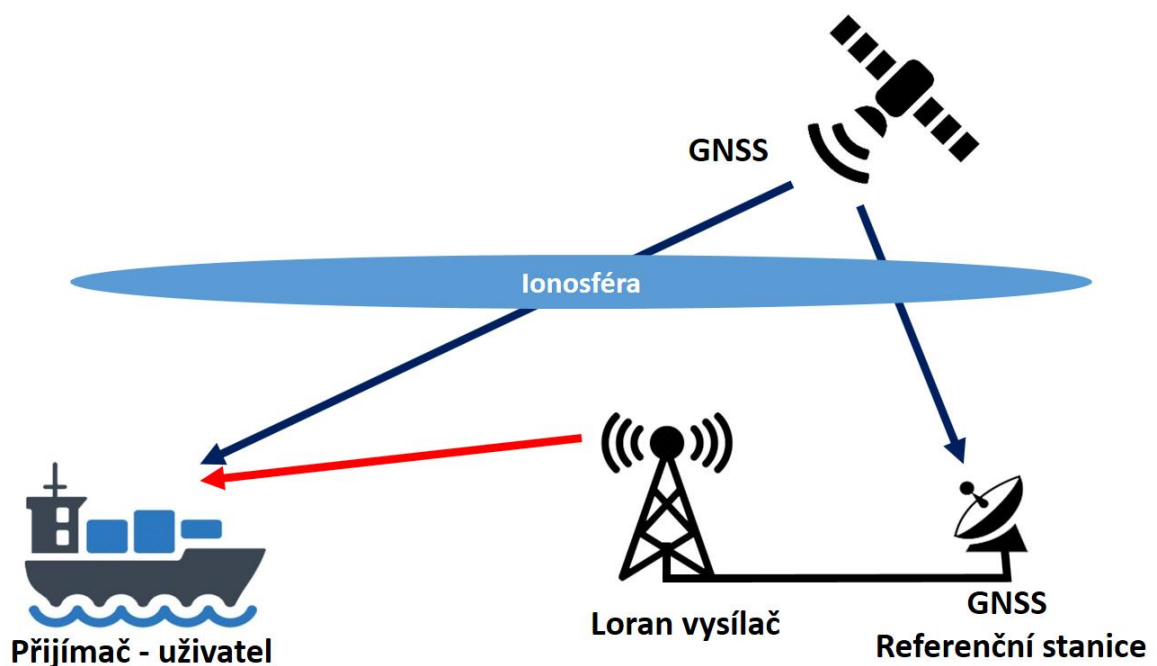
Systém eLoran (Enhanced Loran) je zdokonalený Loran C (viz [13]), který si klade za cíl přinést možnost určování polohy za výrazně menších nákladů, než je tomu u družicové navigace. Modernizace spočívá v zavedení datového kanálu (Loran data channel, dále LDC), a zlepšení přesnosti.



Obrázek 10: Northwest European Loran System (NELS)

Pro Loran-C byl před ukončením činnosti vysílačů NELS (Northwest European Loran System, obrázek 10) vyvinut nizozemskou Delft University of Technology systém Eurofix. Ten vycházel z konceptu „LORAN-COM“ ze šedesátých let, který ale nebyl realizován.

Šíření krátkých zpráv systémem Eurofix je dosaženo modulací vysílaných pulzů v dané GRI. Dosah Eurofixu je tedy přibližně shodný s dosahem navigačního signálu (dle [15] až do 1600 km nad mořskou hladinou). Aby nedošlo k deformaci navigačních signálů, byla volena modulace posledních, maximálně 6 z 8 (9) vysílaných pulzů jednoho vysílače. Šlo o posuvy pulzů v čase (PPM – pulse position modulation), který činil $\pm 1 \mu\text{s}$. Posuny byly voleny tak, aby byla zachována časová hodnota GRI pro zpětnou kompatibilitu starších přijímačů. Mezi lety 1992 až 2014 sloužil Eurofix hlavně pro šíření korekcí družicové navigace, a omezeně pro korekce Loranu a Čajky. Princip korekcí spočívá v referenční stanici, jejíž poloha je známá. Při měřeních se zjišťuje, o kolik se naměřená poloha odlišuje od známé a generují se korekce. Kromě odrazů je totiž signál z družic zatížen chybou, způsobenou nehomogenitami ionosféry. Princip šíření korekcí systémem Eurofix je znázorněn na obrázku 11.



Obrázek 11: Šíření GNSS korekcí systémem Eurofix

Na obrázku 11 je modrou barvou vyznačeno šíření signálu GNSS, červenou Loranu. Kromě Eurofix korekcí umožňoval LDC šířit další krátké zprávy, omezeně i koordinovaný čas. V případě poruchy (porucha synchronizace) bylo možné vysílat zprávu „Do not use me“ konkrétním vysílačem typu S. Jak již bylo uvedeno, LDC, tj. Eurofix, byl realizován tak, aby byly zejména první pulzy z 8 (9) neovlivněny, aby mohly se signálem pracovat i starší přijímače. To má za následek přenosovou rychlost LDC na úrovni 30 – 150 bps (hranice, kdy se již nedá používat signál pro navigování je

přibližně 180 bps). Běžně používaná rychlost přenosu zpráv činila 90 bps. Před ukončením činnosti NELS byly zprávy Eurofix dle obsahu:

1. Časové (krátkodobě i UTC)
2. Korekce (GPS a Loran, ev. GLONASS a Čajka)
3. Poloha, resp. ID vysílače
4. Zpráva o poruše vysílače, „Out of tolerance“ (OOT, [17])
5. Jiné krátké zprávy
6. Vyhrazeno pro vládní použití („Government use“)

LDC má být při eventuálním opětovném zprovoznění Loranu v Evropě klíčovým prvkem systému, zvyšujícím jeho přesnost. Poslední norma (z roku 2011, viz [16]) počítá s jedním slovem (během jedné GRI), které tvoří **4** bity, indikující typ zprávy, dále **52** bitů s tělem zprávy na konci **14** bitů cyklického redundantního součtu (dále CRC).

CRC slouží hlavně k indikaci chyb v přijaté zprávě. Minimální délka jedné Eurofix zprávy má být v eDLoranu **210** bitů, skládajících ze tří slov po **70** bitech ($4 + 52 + 14 = 70$ bitů).

Šíření přesného (UTC) času má být pravidelně synchronizováno časem z GPS. Robustnost přenosu je zajištěna samoopravným kódem FEC (forward error correction), konkrétně Reed Solomonovým kódem [20].

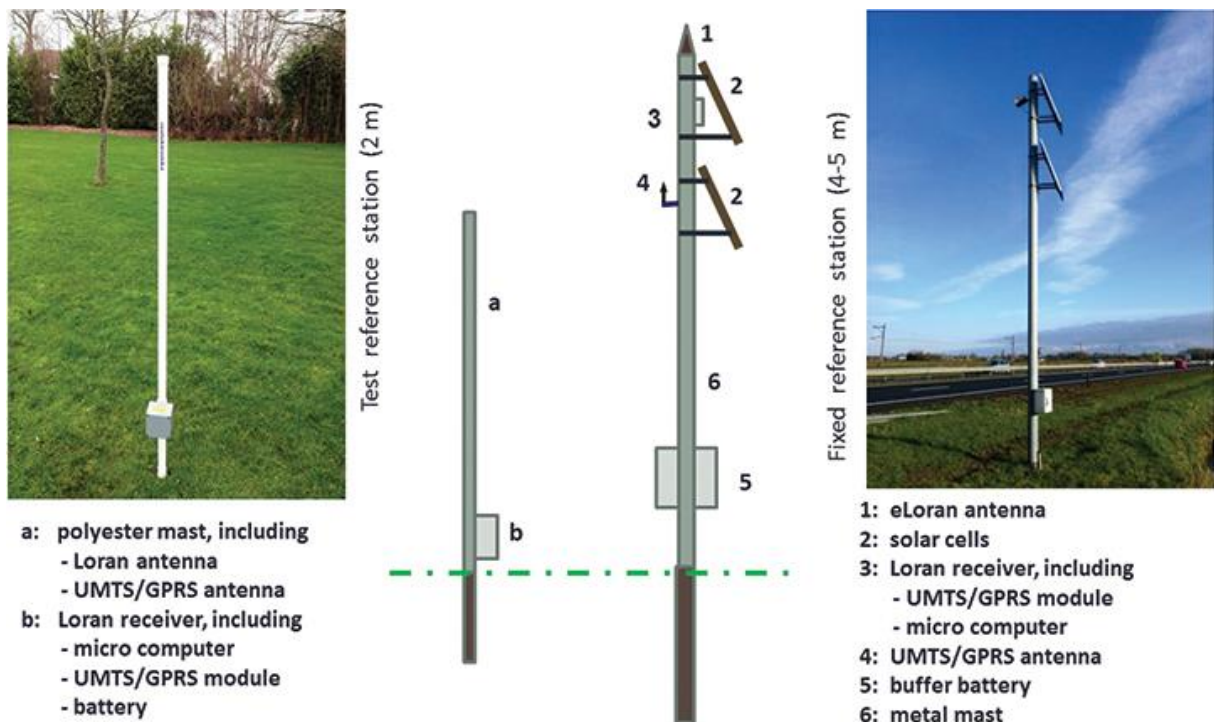
V roce 2014 proběhla rozsáhlá demonstrace možností systému eDLoran v Rotterdamském přístavu. Za použití Eurofixu byla vysílači v Anthornu, Syltu a Lessay (obrázek 12) navigována loď v bezprostřední blízkosti pevniny. Na obrázku 13 jsou výsledky experimentu.



Obrázek 12: Minimální počet vysílačů Loranu pro navigaci v Rotterdamském přístavu



Obrázek 13: Navigace plavidla pomocí eLoranu. Červená křivka je poloha určená základním eLoranem (bez korekcí), modrá je GPS s korekcemi, a bílá je výstup eLoranu (zároveň vyznačuje skutečnou trasu, převzato z [19])



Obrázek 14: Nízkopříkonová referenční stanice pro Loran a GNSS, převzato z [19]

Červená čára na obrázku 13 může být interpretována i jako pokusné měření Loranu-C. Pravděpodobnou příčinou oscilací hodnot pro DGPS (přibližně ± 5 m) jsou nežádoucí odrazy od zástavby v přístavu. Přesností vynikající výsledek eDLoranu byl zajištěn soustavou 14 diferenčních stanic Loranu v blízkosti přístavu (nejbližší 120m od přijímače). Přenos korekcí byl realizován v síti GSM. Referenční stanice, jejichž spotřeba je v desítkách wattů, je na obrázku 14. Problémem se ukázal být požadovaný tok dat korekcí, pro který je LDC nedostačující. Proto je při případné větší realizaci eDLoranu výhodnější ponechat LDC pro šíření krátkých zpráv, a korekce šířit prostřednictvím internetu, nebo sítě GSM. Korekce proto nebudou dostupné v celé oblasti GRI (více, než 5000km^2), ale pouze v blízkosti například přístavů (Eurofix totiž šířil korekce po celé GRI, a tedy i do míst, kde by bylo jejich použití zbytečné). Pro šíření korekcí jinak, než Eurofixem je i možnost většího datového toku (pro korekce Loran, Čajka a GNSS aspoň 150bps). Za zmínku stojí, že úpravy na vysílačích Anthorn, Sylt a Lessay z Loranu-C na eDLoran byly minimální, a za minimální náklady [19]. Důvodem je to, že pro šíření korekcí bylo použito sítě GSM. Nevýhodou eDLoranu je to, že předpokládá určování polohy v rovině, [22]. To způsobuje nepřesnosti při letecké navigaci, kde je kromě vyšší rychlosti i nenulová výška. Nejjednodušším řešením tohoto problému je integrace přijímače s přijímačem GNSS (ev. inerciální navigací). Při dostatečném počtu zachycených stanic (satelitů) lze výšku určit. V tabulce 2 je dle [12] znázorněna možnost určování výšky v závislosti na počtu stanic (satelitů), minimum je alespoň 2 satelity a 3 stanice eDLoranu.

Tabulka 2: Možnost určování výšky při kombinaci Loranu a GNSS (dle [12]).

| | → GNSS → | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------|----------|----|----|----|----|----|---|
| ↓ LORAN ↓ | | | | | | | |
| 0 | | - | - | - | 2D | 3D | |
| 1 | | - | - | - | 2D | | |
| 2 | | - | - | 2D | 3D | | |
| 3 | | 2D | 2D | 3D | | | |
| 4 | | 2D | 2D | | | | |

Čísla 0 až 5 představují počet dostupných stanic, vodorovně počet GNSS satelitů, svisle počet stanic eDLoranu

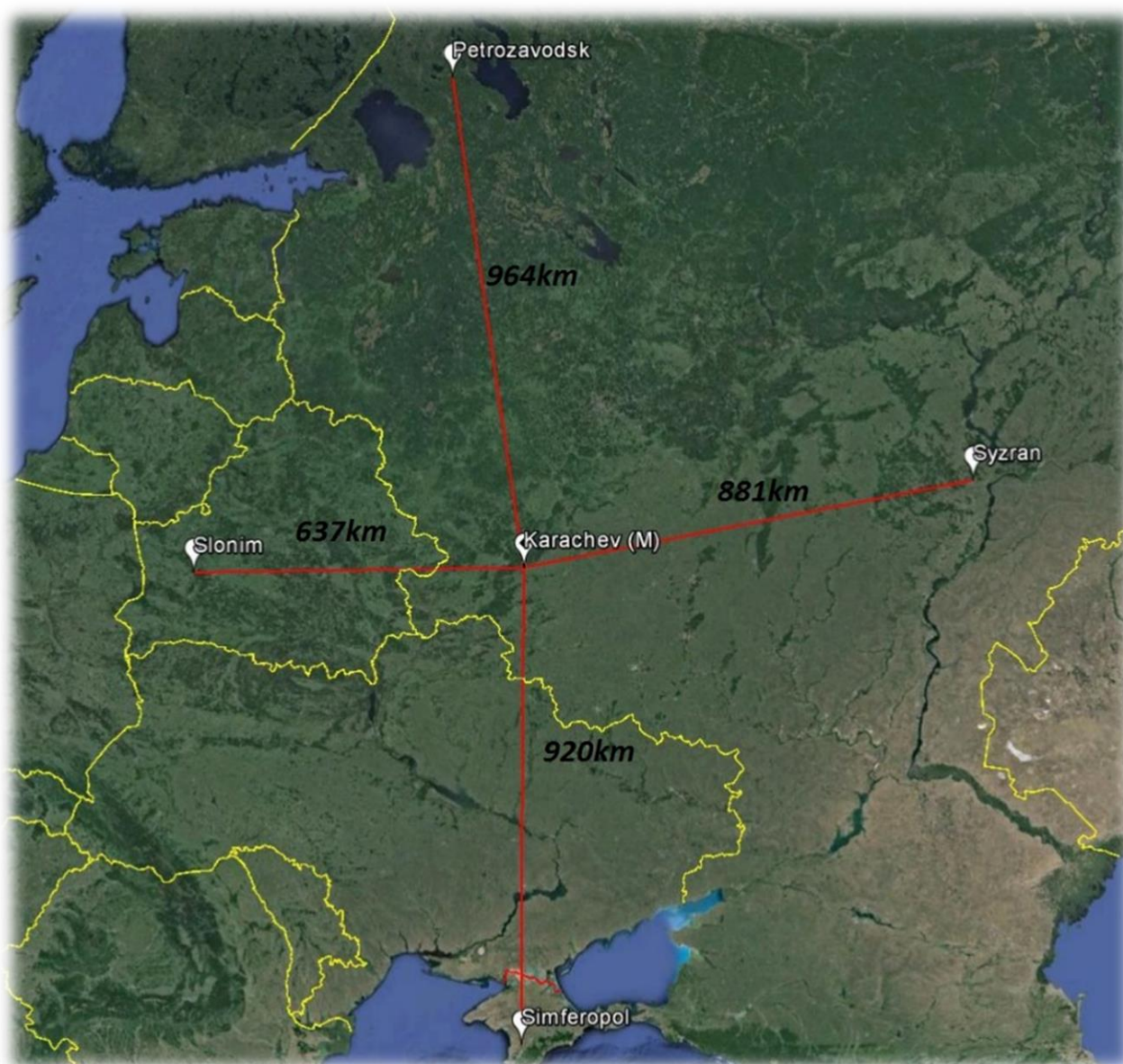
2D.....určení polohy v prostoru

3D.....2D + určení výšky

V kombinaci eDLoranu se sítí referenčních stanic, jak bylo demonstrováno v [19] byla dosažena odchylka menší než ± 10 m. V případě jednorázové investice do obnovy již zrušených stanic, a vybudování většího počtu referenčních stanic, lze očekávat přesnější a dlouhodobě levnější a centralizovanější systém, který by mohl sloužit pro horizontální leteckou navigaci při přiblížení na přistání. Šlo by o náhradu kombinace VOR/DME, používané v současnosti pro nepřesné přiblížení na přistání. Přesnost Loranu klesá se zvyšující se rychlostí přijímače.

2.2 Čajka

Sovětský a později ruský navigační systém Čajka byl v devadesátých letech upravován do té míry, že jde v současnosti o kompatibilní součást Loranu-C, od kterého se liší pouze tvarem svého pulzu (obrázek 16). Protože jde o jediný rozdíl oproti Loranu-C, vztahují se na Čajku všechny parametry Loranu-C (dělení na pásma „chains“ dle GRI, viz kapitola 2.1, apod.). Na rozdíl od Loranu-C, jehož stanice byly rozmístřovány především pro potřeby námořní navigace (tj. aby se vlna šířila co nejkratší dobu nad pevninou, a co nejděleší nad hladinou), jsou u Čajky některé stanice (dané GRI) rozmístěné i ve vnitrozemí. Příkladem může být GRI 8000 – západní Rusko, které je na obrázku 15.



Obrázek 15: GRI 8000 ruského systému Čajka

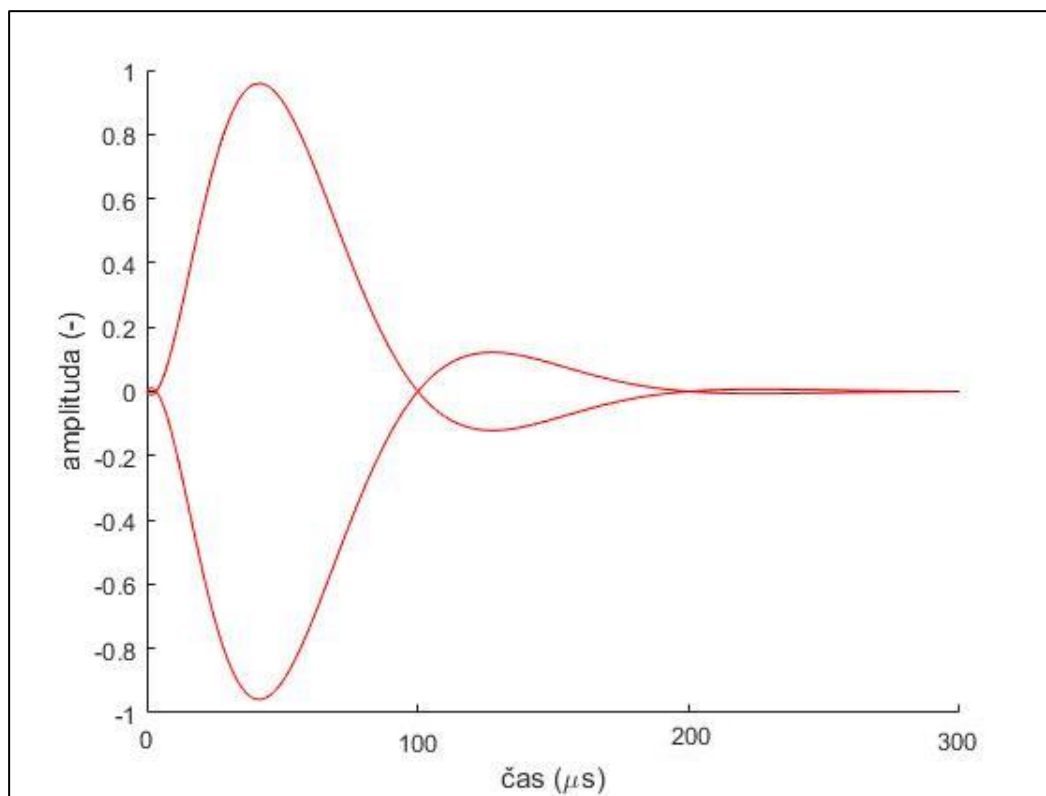
Stanice s touto hodnotou GRI mají udávané vyšší vysílací výkony (700kW), vyšší než u běžných stanic Loranu-C (300-400kW), a to z důvodu vnitrozemského umístění vysílačů. V současnosti je ale vysílání nepravidelné, probíhají totiž pravděpodobně přípravy eČajky (viz kapitola 2.3). Vztah (3) popisuje tvar vysílaných pulzů tohoto systému.

$$f(t) = (1 - b(t - \tau)) \cdot e^{a(\tau - t)} \cdot \sin(c - 2\pi f \cdot t) \quad (3)$$

Další kódování a změny tvaru pulzů definují parametry a, b, c, τ , kde:

- Posun τ je volen z intervalu $\langle -5, 5 \rangle$.
- Hodnota parametru a je 0,7 pro GRI 8000.
- Hodnota b je 5,6 pro GRI 8000.
- Parametr c může být 0, nebo π .

Pulz je modulován, tak jako u Loranu-C (vztah (2)). Na obrázku 16 je obálka pulzu.



Obrázek 16: Obálka pulzu Čajky

Podobnost tvarů pulzů Čajky a Loranu (obrázky 8 a 16), a to v důležité části do přibližně 30 μ s, umožnil vznik přijímačů, schopných pracovat s oběma systémy [21]. Nelze kombinovat pro účely určování polohy vysílače s různým GRI, a to jak u Loranu, tak u Čajky.

2.3 Současný stav a budoucnost Loranu a Čajky

V současné době představuje eLoran rozvinutou alternativu k družicové navigaci, která je pro některé aplikace nevhodná, finančně neefektivní, nebo nedostatečně robustní. Delší vlnová délka značně znesnadňuje úmyslné rušení Loranu-C, i eLoranu a eDLoranu. Zatím co 100 W rušičku signálů GPS lze opatřit za méně než 2 tisíc korun [14], v případě Loranu by musel být výkon aspoň ve stovkách kW. Rovněž by tento typ systému nebyl mobilní, a to kvůli velikosti antén (a požadovanému výkonu). Tato výhoda Loranu ale částečně zaniká v případě šíření korekcí jiným způsobem, než Eurofixem (internetem, GSM, ve VKV pásmu apod.).

Loran-C je v současnosti v provozu v Indii, Saudské Arábii, Jižní Koreji, Japonsku, Číně a Rusku (Čajka, [11]).

Spojené státy se nacházely v situaci, kdy kromě finančně náročné družicové navigace provozovaly i navigaci pozemní. Po vypnutí všech stanic Loranu-C v roce 2009 bylo v roce 2015 rozhodnuto, že se, do této doby nedemontované, stanice využijí na vysílání eLoranu. To má být zahájeno v roce 2018 [8].

Saudská Arábie, Čína, Indie, Japonsko a Jižní Korea používají v současnosti Loran-C pro námořní navigaci, a to kvůli jeho příznivější ceně vůči družicové navigaci a robustnosti. Všechny tyto státy zvažují v následujících letech plynulý přechod na eLoran.

V případě Jižní Koreje je rovněž důvod ten, že družicová navigace je v okolí Severní Koreje úmyslně rušená. V současnosti je pobřeží Jižní Koreje pokryto 5 stanicemi. U eDLoranu jich má být až 43 (ale včetně diferenčních), je totiž plánované pokrytí i vnitrozemí.

Ani výhoda nižších nákladů a menší rušitelnosti nestačila zabránit ukončování vysílání Loranu-C v Evropě. Do roku 2010 byly zrušeny (někdy i fyzicky) vysílače na pobřeží Středozemního moře. V roce 2008 začaly ze strany Velké Británie přípravy na výstavbu nových vysílačů eDLoranu, včetně referenčních stanic. Provoz měl být zahájen v roce 2020, ale ukončení podpory ze strany Dánska, Francie, Německa a Norska v roce 2014 znamenalo definitivní konec tohoto typu navigace v Evropě. Vysílání všech vysílačů bylo ukončeno, s výjimkou britského Anthornu [9]. Ten v současnosti vysílá časový signál, a měl by být využit na experimentální vysílání eDLoranu a šíření času. Evropa dala přednost vývoji vlastního, družicového navigačního systému. Argumentem pro investice do Loranu je to, že může posloužit jako doplněk a záloha systému Galileo, který ale není v současné době plně samostatný a činí Evropu závislou na GPS [10].

Systém Čajka má být vylepšen na eČajku, která by měla mít podobné vlastnosti, jako eDLoran. Naproti tomu není vysílání skupiny GRI 8000 v západním Rusku (obrázek 15) kontinuální.

V současnosti dochází údajně k vývoji nového systému, který (pod názvem „Skorpion“) možná eČajku nahradí. Záměry Ruské federace o budoucnosti Čajky nejsou v současnosti zveřejňovány, což brání jejímu využití pro navigaci v Evropě.

3 Přijímač Ettus N210

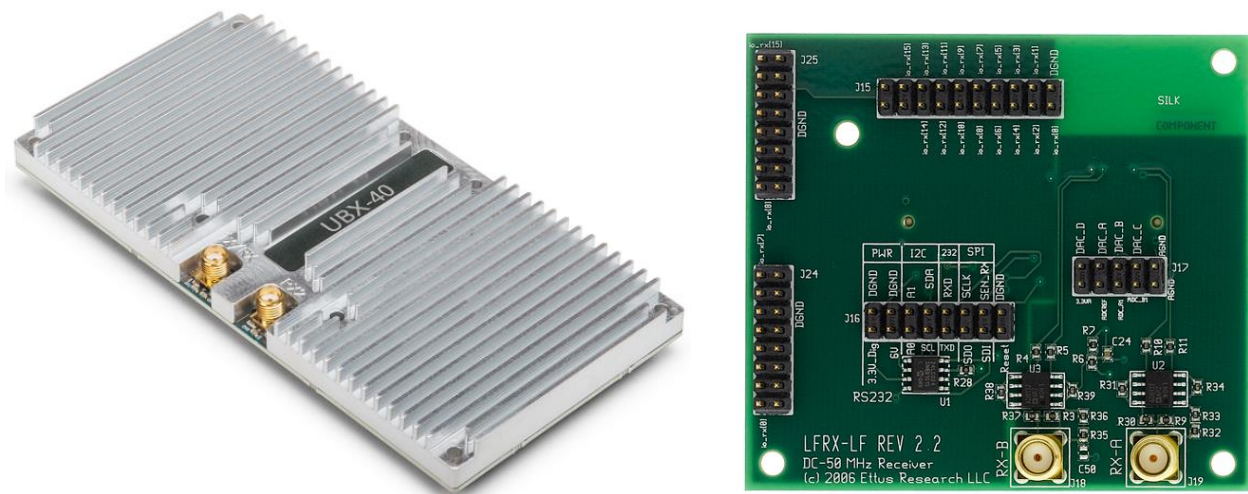
Veškeré experimentální příjmy signálů byly realizovány na přijímači Ettus N210, který je nabízen firmou Ettus Research (spadá pod National Instruments). Svými technickými parametry je jedním z mála přijímačů, schopných přijímat a zpracovávat velmi široké spektrum signálů. Propojení s počítačem je realizováno metalickým vedením ethernet. Přijímač N210 se chová jako součást sítě s pevnou IP adresou. Přijímač samotný se skládá ze základní, a měnitelné desky (mother a daughterboard). Měnitelná deska se nachází mezi anténou a základní deskou, která disponuje ethernetovým rozhraním. Existuje řada daughterboardů pro všeobecnější, nebo zcela specifické aplikace [23].

Na základní desce (motherboard) se provádí s již přijatým signálem z daughterboardu jeho vzorkování 14-bitovým převodníkem s kmitočtem vzorkování 100MHz, jeho decimace a externí časování. Směr převodu (A/D, nebo D/A) je určen tím, jsou-li právě signály přijímány, nebo vysílány. Navzorkovaná data jsou ve formě komplexních čísel, které se na základní desce transformují do paketů a následně jsou odesílána do ethernetového rozhraní. Na motherboard rovněž nahráváme různé verze firmwaru a FPGA. Na obrázku 17 můžeme vidět přední stranu přijímače. Obdélníkem jsou zde vyznačeny anténní konektory. Dále můžeme vidět konektor pro externí časování, napájecí konektor a ethernetovou zásuvku.



Obrázek 17: Přední strana přijímače

Jak již bylo uvedeno, daughterboard je měnitelná součást přijímače. V [23] můžeme najít přehled daughterboardů dle toho, požadujeme-li funkci přijímače, nebo vysílače. Existují desky, které mají jenom jednu z těchto funkcí, nebo desky, které dokáží v čase střídat funkci vysílače a přijímače. Další parametrem je zamýšlené kmitočtové pásmo a šířka pásma přijímaného signálu. Existují i speciální desky pro specifické aplikace typu GPS (L1, L2), LTE, apod. Pokusy byly realizovány pomocí desek *UBX-40* a *LFrx*, které můžeme vidět na obrázku 18. Jejich nejzákladnější parametry popisuje tabulka 3.



Obrázek 18: Deska UBX-40 (vpravo) a deska LFRX (převzato z [24])

Tabulka 3: Vybrané parametry desek UBX-40 A LFRX:

| Typ desky | Možnost přijímače | Možnost vysílače | Kmitočtový rozsah |
|---------------|-------------------|------------------|-------------------|
| UBX-40 | <i>ano</i> | <i>ano</i> | 10 MHz – 6 GHz |
| LFRX | <i>ano</i> | <i>ne</i> | do 30 MHz |

3.1 Propojení s počítačem

Počítač a Ettus N210 tvoří síť, kde Ettus má pevnou IP adresu 192.168.10.2, a počítač 192.168.10.1. Tuto IP adresu je nutné nastavit ručně v počítači. Veškeré zkušební příjmy byly realizovány prostřednictvím programu MatLab (ev. Simulink). Ve skriptu v MatLabu můžeme dále nastavovat dílčí parametry příjmu – zisk, kmitočet, délku jednoho rámce apod. (viz příloha 1). Pro některé aplikace, zejména při rychlém kontinuálním přenosu většího množství dat, lze použít pro přenos protokol UDP (User Datagram Protocol [28]), který oproti protokolu TCP nepožaduje od přijímací strany potvrzení o správném přijetí dat, včetně pořadí paketů. Dále lze nastavit decimální faktor, kterým definujeme šířku přijímaného pásma, která je ve vztahu (4) označena „B“. Horní hodnota 100MHz je vzorkovací kmitočet základní desky.

$$B = \frac{100 \text{ MHz}}{\text{decimální faktor}} \quad (4)$$

Minimální šířka pásma, kterou lze Ettusem N210 přijímat signály, je přibližně 200kHz. Před spuštěním skriptu v MatLabu je třeba v některých případech aktualizovat firmware a FPGA v přijímači [25]. To se dá nejjednodušeji realizovat prostřednictvím připojeného počítače [26].

Dále je třeba do MatLabu přidat speciální toolbox pro komunikaci s přijímačem [27]. Během chodu skriptu se data z přijímače ukládají do matice, vektoru, či jiné, definované struktury v MatLabu. Naměřená data lze i uložit pro pozdější zpracování. Na konci skriptu je nezbytné korektní ukončení relace, které zajišťuje bezproblémové další spojení [29]. V přílohách 1 a 2 jsou skripty jak pro jednorázové získání jedné sady vzorků, tak pro opakující se měření, včetně průběžného ukládání dat. Ve druhém případě, tj. opakující se měření byla ve skriptech použita metoda průměrování, kdy se všechna data před dalším zpracováním sečetla. Po ukončení příjmů nových vzorků se naměřená data podělila počtem průběhů. Průměrování bylo použito na přibližně 300 až 1000 cyklů. Motivací pro jeho implementaci do skriptu 2 bylo to, že ve spektru přijímaného signálu pak budou výraznější relevantnější hodnoty a zároveň dojde k eliminaci náhodného šumu.

3.2 GNU Radio

Další varianta komunikace počítače a rádia je soubor knihoven GNU Radio. Vzniklo v roce 2001 jako sjednocení různých programů, které si uživatelé Linuxu psali v jazyce C++ [58]. V současnosti disponuje GNU Radio i grafickým prostředím - „GNU Radio Companion“, které umožňuje práci se signály i bez znalosti jazyka Python, či C++. Soubor (projekt), vytvořený v tomto prostředí se při svém uložení (spuštění) převede do formy kódu. Lze jej tedy následně i modifikovat. V současné době je nabídka bloků ke zpracování signálů natolik rozsáhlá, že psaní vlastních bloků, či knihoven je nutné pouze pro velmi speciální aplikace. Bloky slouží například pro filtraci signálu, vykreslení spektra, generování referenčních signálů apod. GNU Radio je téměř celé koncipováno pro počítač s operačním systémem Linux, Ubuntu 14.05. Z tohoto důvodu byla většina experimentů prováděna na počítači s MatLabem (a operačním systémem Windows). V příloze 3 je ukázka z prostředí aplikace GNU Radio.

4 Digitalizace rozhlasového vysílání

Pro digitalizaci rozhlasového vysílání v současnosti nejdále pokročily standardy DAB a DRM.

4.1 DRM

4.1.1 Popis DRM

Digital Radio Mondiale³ je nový, digitální vysílací standard pro pásma dlouhých a krátkých vln. V současnosti je jediným, celosvětově definovaným standardem pro digitální vysílání jak v pásmu do 30MHz, tak v pásmu VKV. Oproti dosavadnímu vysílání počítá DRM s kompletně digitalizovaným vysílacím řetězcem, umožňujícím zvýšit počet vysílaných stanic, kvalitu a energetickou účinnost vysílání a kvalitu poslechu stanic (srovnatelné s CD kvalitou MPEG-4, AAC⁴). Současné, převážně analogové monofonní rozhlasové vysílání je zatíženo různými šumy, zkresleními, fázovými překmity apod. Digitalizace rozhlasového vysílání by měla umožnit pokrýt signálem minimálně stejnou plochu za použití menšího vysílaného výkonu ERP, i menšího počtu vysílačů. Další výhodou DRM je úspora kmitočtů. DRM je navrženo [31] jako systém menšího počtu všesměrových vysílačů vyšších výkonů, pokrývajících velké území (tisíce km čtverečních) jedním kmitočtem, SFN – single frequency network. SFN má tu výhodu, že umožňuje libovolné „dokrývání“, pro hlavní vysílač problematických, oblastí signálem. Kromě **DRM30** (do 30MHz, norma z roku 2003), bylo v roce 2009 dodatečně definováno **DRM+**, pokrývající kmitočtová pásma nad 30MHz (47 - 230MHz). Souhrnný název je **DRM (+)**, [32]. DRM30 je členěno dle OFDM parametrů na módy A, B, C, D, DRM+ má jediný mód E. Použité kódování je víceúrovňové, tj. ty bity, jejichž pozice je v konstelačním diagramu modulace náchylnější k vzniku chyb, jsou zabezpečeny vyšším stupněm ochrany. Je to umožněno použitím punktuovaných konvolučních kódů. Chybně přijaté bity opravuje přijímač Viterbiho algoritmem [68]. Ten je však citlivý na shluky chyb, proto jsou úniky kompenzovány časovým prokládáním. Další redundanci vysílaného signálu způsobuje kódování s přímou korekcí chyb (FEC – forward error correction). U DRM je použit kódovaný kmitočtově dělený multiplex (COFDM) s kvadrurně amplitudovou modulací QAM. Šířka kanálu je u DRM30 9, nebo 10kHz, u DRM+ 100kHz. Z důvodu protichybových kódování je možné u DRM+ vysílat ve VKV pásmu stanicemi s minimálním vzájemným odstupem [33]. Vícecestnému šíření je zabráněno použitím ochranného intervalu (OI), kterého délka je různá pro různé módy. Velká flexibilita a velký počet různých kombinací, jak vysílaný signál kódovat [31], představují sice větší nároky na dekodovací schopnosti přijímače, ale

³ Mondiale – svět, světový (fr.)

⁴ AAC – Advanced Audio Coding, vzorkovací kmitočet 12kHz

umožňují provozovateli optimalizovat vysílání pro konkrétní situace (v některých případech může být každá nosná kódována jiným kódováním). Zatímco u DRM30 se počítá s vyššími vysílacími výkony a všesměrovými vysílači, u DRM+ naopak s nižšími výkony a směrovými vysílači. Konkrétní informace o jednotlivých módech zobrazuje tabulka 4.

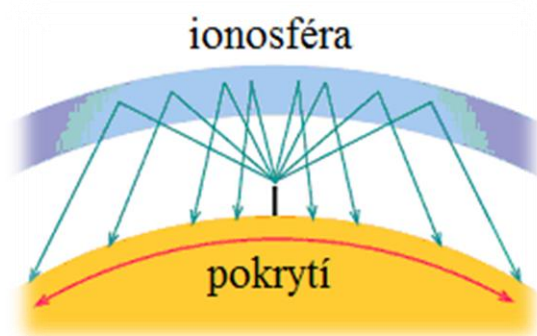
Tabulka 4: Vlastnosti přenosových módů u DRM (zpracováno dle [34] a normy [31]).

| Mód | Oddělení nosných v OFDM | Počet nosných dle šířky pásma kanálu | | | | | Délka symbolu | Délka OI |
|----------|-------------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------------|----------|
| | | 9 kHz | 10 kHz | 18 kHz | 20 kHz | 96 kHz | | |
| A | 41,66 Hz | 204 | 228 | 412 | 460 | - | 26,66 ms | 2,66 ms |
| B | 46,88 Hz | 182 | 106 | 366 | 410 | - | 26,66 ms | 5,33 ms |
| C | 68,18 Hz | - | 138 | - | 280 | - | 20 ms | 5,33 ms |
| D | 107,14 Hz | - | 88 | - | 178 | - | 16,66 ms | 7,33 ms |
| E | 444,44 Hz | - | - | - | - | 213 | 2,5 ms | 0,25 ms |

„-“ označuje stavy, které nejsou normou definovány

Poznámka: Délka symbolu je včetně OI, rozteč nosných tedy určíme jako převrácenou hodnotu rozdílu délky symbolu a délky ochranného intervalu.

- Mód **A** je určen pro vysílání na středních vlnách, kde je možno očekávat dominantnost povrchové vlny při šíření. Je navržen pro nejvyšší bitové rychlosti, viz tabulka 5.
- Mód **B** je pro vysílání s dominujícím šířením prostorové vlny, je určen pro krátkovlnné vysílání v Evropě [34], ev. jako noční alternativa módu **A**.
- Mód **C** je vhodný pro vysílání na kratších vlnách s dosahy tisíce km.
- Mód **D** představuje nejrobustnější variantu, využívající prostorové vlny [45]. Vysílače jsou směrovány „nahoru“, viz obrázek 19. Mód je navržen pro oblasti, kde není výhodné použít přízemní vlny. V Evropě se nepoužívá.
- Mód **E** (víceméně totožný s DRM+) je ze všech módů nejméně variabilní a je jako jediný určen pro kmitočty nad 30MHz.



Obrázek 19: Pokrytí signálem DRM vlnou, odraženou od ionosféry, převzato z [35]

Přenosové rychlosti pro jednotlivé třídy jsou v tabulce 5. Jsou samozřejmě mj. různé pro modulaci s různými počty stavů – 4, 16 a 64, a různé pro rozdílné šířky pásem kanálů. Mód **E** má dvě vlastní třídy zabezpečení.

Tabulka 5: Přenosové rychlosti v *kbit/s* pro různé módy přenosu, šířky kanálu a modulace

(zpracováno dle normy [31])

| Třída ochrany | Mód přenosu, šířka kanálu, a počet stavů modulace | | | | | | | | | |
|------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | A | B | | | C | | D | | E | |
| | 9 kHz | 9 kHz | 10 kHz | | 10 kHz | | 10 kHz | | 100 kHz | |
| | 64 QAM | 16 QAM | 16 QAM | 64 QAM | 16 QAM | 64 QAM | 16 QAM | 64 QAM | 4 QAM | 16 QAM |
| 0 | 19,6 | 7,6 | 8,7 | 17,4 | 6,8 | 13,7 | 4,5 | 9,1 | - | |
| 1 | 3,5 | 10,2 | 11,6 | 20,9 | 9,1 | 16,4 | 6,0 | 10,9 | | |
| 2 | 27,8 | - | - | 24,7 | - | 19,4 | - | 12,9 | | |
| 3 | 30,8 | - | - | 27,4 | - | 21,5 | - | 14,3 | | |
| Minimální | - | | | | | | | | 74,5 | 186,8 |
| Maximální | - | | | | | | | | 37,2 | 99,4 |

„-“ označuje stavy, které nejsou normou definovány

DRM obsahuje 3 datové kanály (platí pro DRM30, i pro DRM+).

- **MSC** – Main Service Channel - kanál hlavní služby, který obsahuje informace o všech (tedy i o těch aktuálně nepřijímaných) službách v multiplexu. Ten může obsahovat nejvíce 4 (hlasové) služby.
- **FAC** – Fast Access Channel – kanál rychlého přístupu, který jako jediný nepoužívá prokládání. Slouží k co nejrychlejší kmitočtové synchronizaci přijímače při ladění. V tomto kanálu jsou informace: mód přenosu, šířka kanálu, detaily o kódování, modulace v **MSC** a **SDC**. Dále zde mohou být informace o stanici, programu, jazyku apod.
- **SDC** – Service Description Channel – kanál popisu služby, který obsahuje fixní, periodicky se opakující informace o službě v **MSC** – název stanice (maximálně 16 znaků), dále popis multiplexu, signalizace alternativních kmitočtů, přenos času a dodatečné informace k dekódování audia. Některé přijímače nedekódují **SDC** v každém kroku [36], ale pouze při ladění, a v situaci, kdy je úroveň přijímaného signálu nedostatečná (přijímač „hledá“, jestli jsou k dispozici alternativní kmitočty).

4.1.2 Přijímače DRM

Diskvalifikací DRM(+) proti stávajícímu analogovému vysílání je nutnost složitějšího, digitálního a tedy i dražšího přijímače [36]. Existuje i možnost dekódovat přijatý signál v počítači. Signál se do počítače k dekódování [38] přivádí z antény buď zvukovou kartou, nebo je zachytáván a dekódován například USB přijímačem [37]. Tato možnost je prezentována minimálně jako náhrada poslechu přes počítač při výpadku internetového spojení. Krajní možností je úprava vícerozsahového přijímače vyvedením mezifrekvence a doplněním externího dekodéru (cena 1700 korun). Přijímačů vhodných pro tuto úpravu je minimum, například VEF 206. U antény, zejména u DRM30 závisí při nižších kmitočtech na její orientaci a vzdálenosti k vysílači. Většinou je u přijímačů volená prutová, nebo rámová anténa. Příjem se zhoršuje blízkostí neonových svítidel, nebo spínaných zdrojů, které produkují rušení. Poslech v místnosti je omezen na budovy, které nemají vlastnost Faradayovy klece. V tomto (statickém) případě se doporučují venkovní drátové antény délek do přibližně 20 m (nakloněny pod 45°).

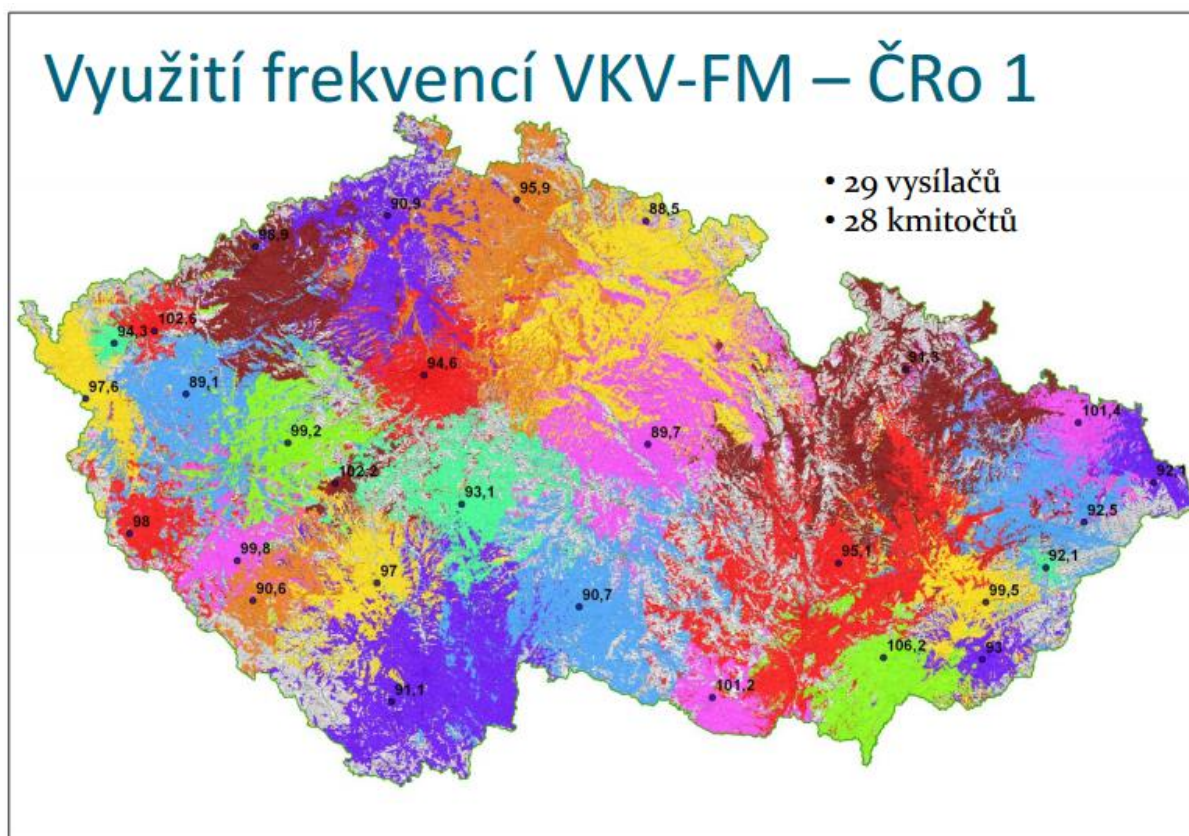
4.1.3 DRM(+) a T-DAB

Digital Audio Broadcasting (DAB) je konkurenční, a v současnosti i úspěšnější varianta rozhlasového vysílání. Malou výhodou méně rozšířeného DRM je menší náročnost dekódování, kdy se dekóduje jenom přijímaná stanice a velice stručné informace o okolních (MSC). U T-DAB, který je multiplexem více programů se širokými spektry kanálů se zpracovávají i stanice, které uživatel právě nepřijímá. DRM je stavěno „kanál vedle kanálu“.

4.1.4. DRM(+) dnes

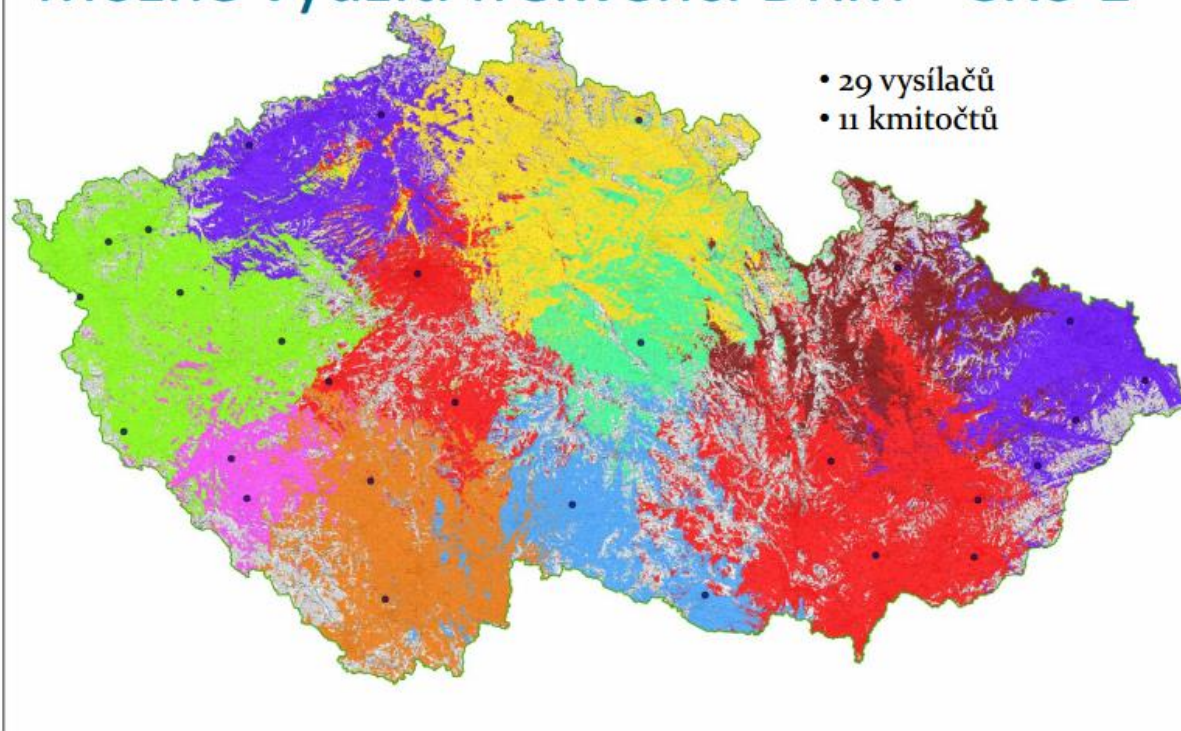
Do roku 2013 probíhaly testy vysílání DRM ve Francii, Norsku, Německu, Švédsku, Rusku, Jihoafrické republice a Slovensku. Z těchto zemí jedině Norsko deklarovalo v roce 2014 úmysl nahradit analogové vysílání DRM (v plánu je i souběžný provoz s DAB [39]). V Německu se postupně snižoval výkon vysílačů, začaly být úzce směrové na vyšších kmitočtech. Ukázalo se totiž, že výhoda DRM30 – dosah jedné stanice tisíce km nemá dostatečnou cílovou skupinu posluchačů, respektive, že internetové vysílání je na dlouhé vzdálenosti levnější. Původní ustanovení DRM zmiňuje pojmy „autorádio napříč Evropou“ a „vysílání bez hranic“, nicméně v době internetového vysílání je DRM v Evropě již pravděpodobně neatraktivní. Vysílání z Ruska a Iránu je v současnosti časově nestálé, oficiální programy vysílání DRM [40] nejsou v současnosti z finančních důvodů dodržovány. Na Slovensku probíhalo v roce 2012

testovací vysílání, nicméně protože, šlo o výkon 0,01kW v pásmu VKV v centru města, lze soudit, že šlo spíše o technickou demonstraci systému. Při eventuálním vysílání DRM v Evropě je vysoce pravděpodobné, že bude zvolen mód B, respektive jeho náhrada mód E, při kmitočtech nad 30MHz. V současnosti je jedinou, pravidelně vysílající stanicí v Evropě britská BBC, která vysílá v časných ranních hodinách hodinu denně. V Rusku se uvažuje o použití DRM na Sibiři na pokrytí vysíláním málo zalidněných oblastí (záměr DRM – posluchači jedné stanice jsou vzdáleni stovky kilometrů). Jednoznačně nejrozšířenější, a kontinuální vysílání mají v současnosti Indie a Pákistán. V Indii je již drtivá většina vysílání vysílána v DRM(+). Rovněž přijímače, schopné dekódovat DRM se, kromě výjimek vyskytují pouze na indickém trhu [36]. V Česku a Německu je pravděpodobnější, že při digitalizaci bude T-DAB upřednostněn před DRM. V [32] můžeme najít konkrétní situaci v Česku pro šíření českého rozhlasu. V současnosti je šířen na 28 kmitočtech 29 vysílači. Plný přechod na DRM by umožnil za použití stávající infrastruktury vysílat pouze na 11 kmitočtech, a to za lepšího pokrytí, viz obrázky 20 a 21.



Obrázek 20: Stávající pokrytí signálem ČRo 1, převzato z [32].

Možné využití frekvencí DRM+ ČRo 1

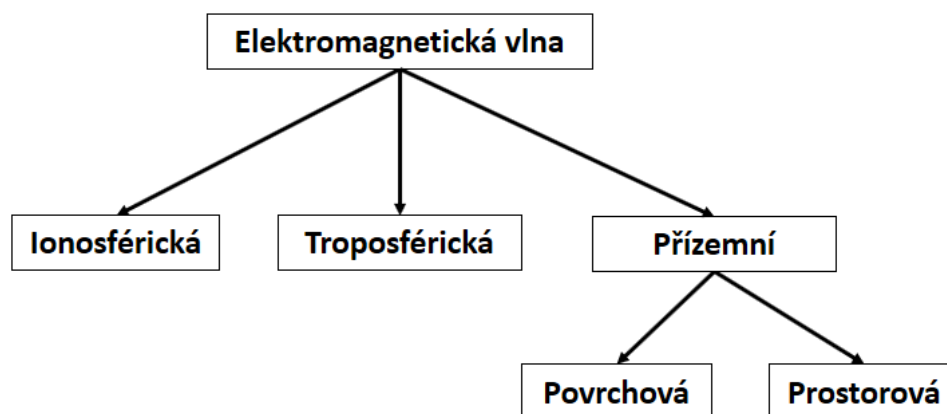


Obrázek 21: Možné pokrytí vysíláním DRM, převzato z [32].

5 Šíření vln

5.1 Úvod

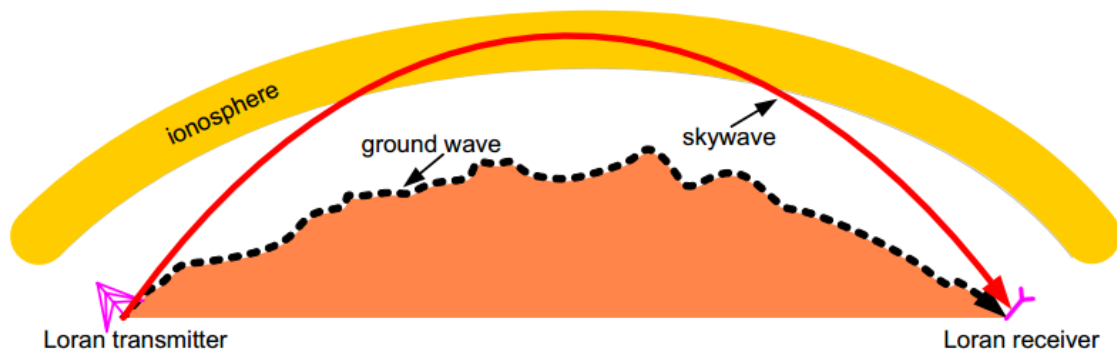
Mechanismy šíření elektromagnetických vln prostředím jsou ovlivněny velkým množstvím faktorů, na základě kterých můžeme pro konkrétní rádiový spoj vybrat vhodnou vlnovou délku a navrhnout optimální parametry vysílače (umístění, výkon, elevaci a další). Dle způsobu šíření vlny prostředím můžeme vlny pro pozemní rádiové spoje rozdělit dle [46] na vlnu ionosférickou, troposférickou a přízemní, viz obrázek 22.



Obrázek 22: Způsoby šíření vln pro pozemní rádiové spoje

Loran se šíří přízemní povrchovou vlnou, která se (resp. její energie) šíří podél rozhraní země - vzduch. Vlny na kmitočtu 100 kHz jsou díky své vlnové délce odolnější vůči útlumu, způsobeným vodivými překážkami. Tyto vyšší vlnové délky ale vyžadují rozměrnější anténní systémy, a větší výkony vysílačů (stovky kW u všesměrové antény). V takovém případě je použitelný dosah jednotky tisíc km [1]. Na této vzdálenosti již nastává ohyb vlny, která se šíří rovnoběžně s povrchem Země.

Díky odrazu vln jsou signály, hlavně nižších kmitočtů, zachytitelnými i na velké vzdálenosti, a to hlavně v nočních hodinách. Kromě interakcí s ionosférou se zde projevují i jevy odrazů - vícecestného šíření, a ohybů. Z důvodu proměnlivosti vrstev ionosféry během dnů a nocí jsou tyto vlny během dne výrazně tlumeny, a to přibližně na kmitočtech, menších než desítky MHz.



Obrázek 23: Šíření signálů Loranu (Čajky) povrchovou (ground wave) a odraženou vlnou (skywave), převzato z [56]

5.2 Útlumy

Útlumy představují nežádoucí degradaci vysílaného signálu, ke které dochází během šíření mezi vysílací a přijímací anténou. Na základě různých vlastností (kmitočtová selektivnost, časové trvání apod.) můžeme útlumy rozdělit do několika kategorií:

- **Ztráty šířením** („Free – space path loss“ - FSL) představují časově stabilní útlum. Vztah (5), který jej popisuje, platí pro šíření vlny na přímou vzdálenost homogenním prostředím. Na trase nejsou předpokládány žádné překážky, které by způsobovali odrazy, či difrakce.

$$FSL_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (5)$$

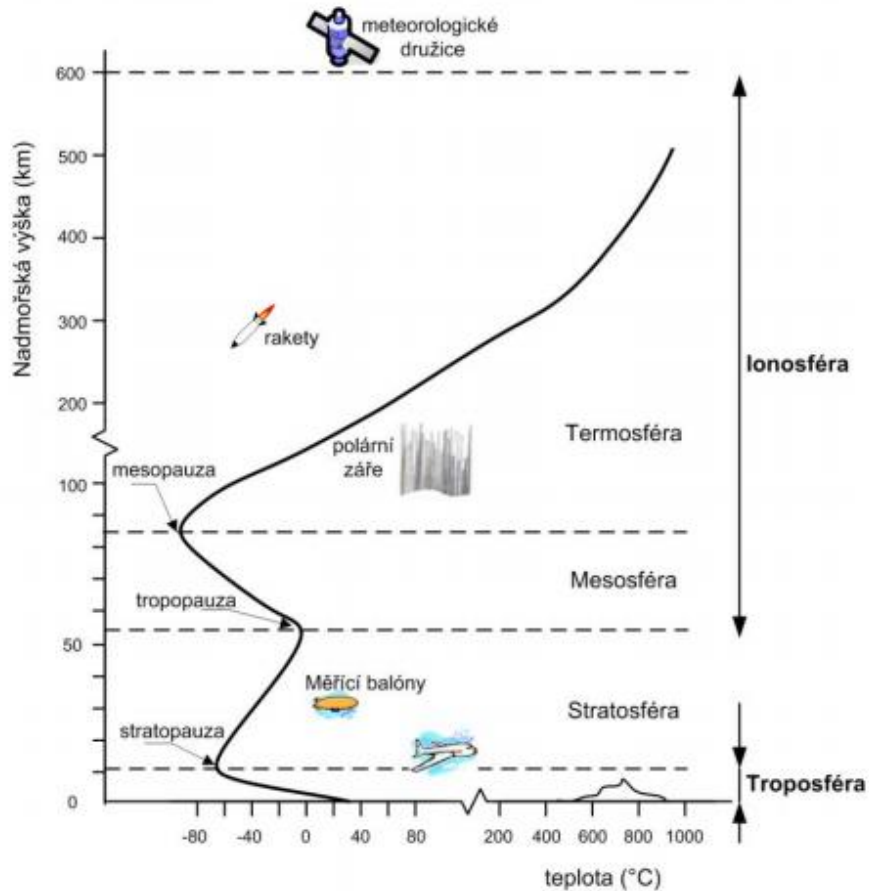
Vztah (5) vyjadřuje hodnotu FSL v dB, λ je vlnová délka a d je vzdálenost mezi přijímací a vysílací anténou (oboje v metrech). Hodnota FSL představuje při plánování pozemního spoje na přímou vzdálenost minimální hodnotu útlumu.

- **Pomalé úniky** jsou způsobeny zastíněním překážkou, která je řádově větší, než vlnová délka a způsobuje ohyby a rozptyl vln, co se projeví kolísající úrovní přijatého signálu.
- **Rychlé úniky** způsobují velké kolísání úrovně přijatého signálu v krátkém časovém intervalu. Jsou způsobeny tím, že složky vlny, které vzniknou odrazy v prostředí, mají různé časové zpoždění na přijímací straně. Kromě vícecestného šíření může být dalším důvodem vzniku různých zpoždění Dopplerův jev při pohybujících se anténách. Všechny tyto přijaté složky se pak v přijímací anténě vektorově sčítají. Při kolísání úrovně přijatého signálu je mezi maximy a minimy vzdálenost, odpovídající $\frac{1}{2}$ vlnové délky.

- **Frekvenčně selektivní úniky** jsou často způsobeny různými interferencemi, a většinou postihují jen malou šířku pásma.
- **Útlum hydrometeory** se projevuje hlavně při vyšších kmitočtech (GNSS), kde kromě útlumu mohou způsobovat i depolarizaci. V případě signálů GPS může způsobit tento útlum chybu určení polohy až do ± 20 m v horizontální rovině [43].
- **Šum** – teplotní, rádiový, blízkost člověka apod. Další šumy jsou oproti těmto minimální. Významné rušení u příjmu Loranu způsobují spínané zdroje, pracující v tomto pásmu, které zhoršují SNR. Řešením je upravit orientaci a stínění antény přijímače. Šumovými poměry se zabývá i doporučení ITU – R P.3722 [47].
- **Vícecestné šíření**, které je způsobeno interakcí vlny se zemským povrchem a se spodními vrstvami atmosféry (postupný ohyb, až „odraz“). To způsobuje, že se na místě příjmu sčítají vlny, které se šířily po různě dlouhých drahách. Při velmi malých vlnových délkách (oproti rozměrům překážek) je možné stanovit možnou dráhu pomocí paprskové optiky. Počet odrazů, a tedy i sekundárních vln dramaticky roste v zástavbě. Například u GSM (LTE) je problém vícecestného šíření řešen přidáním ochranného intervalu.
- **Útlum vegetací** je, podobně jako v zástavbě, výraznější u družicových spojů. U pozemních spojů tlumí vyšší vegetace (stromy) hlavně vertikálně polarizovanou vlnu (protože tvar kmenu stromů je ve vertikální rovině).

5.3 Složení atmosféry

Atmosféra hraje důležitou roli při šíření vln, a to jak pozemními, tak družicovými spoji.



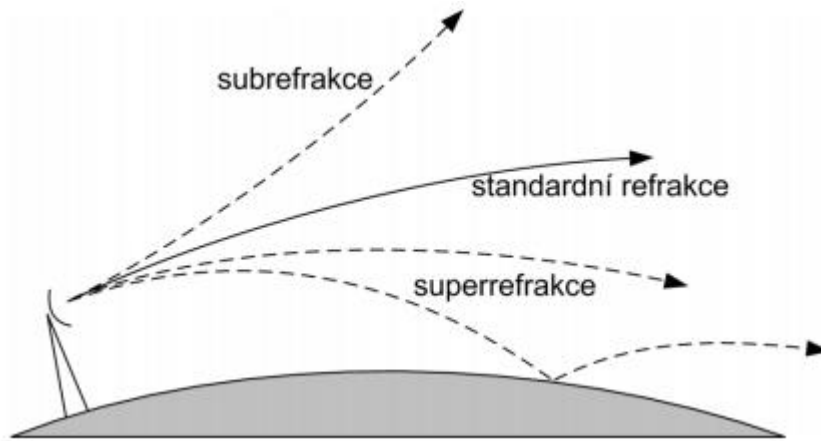
Obrázek 24: Složení atmosféry s vyznačenou změnou teploty, převzato z [42]

Z hlediska šíření vln jsou nejvýznamnějšími vrstvami troposféra a ionosféra.

5.3.1 Troposféra

Troposféra se nachází nejbližší zemskému povrchu, do výšky přibližně 10 km. Její složení je většinou homogenní, protože je promíchávána větrem, který ale také způsobuje malé lokální nesourodosti. Postupná změna indexu lomu (který klesá s rostoucí výškou) je příčinou vzniku atmosférickému lomu (refrakce).

Typy tohoto křivočarého šíření můžeme vidět na obrázku 25. Podmínkou pro lom vlny je právě hodnota výškové změny indexu lomu. Standardní refrakce je případ, kdy se paprsek, představující vlnu, pomalu ohýbá směrem k Zemi. Subrefrakce je případ, kdy dochází k pomalému ohybu, nebo až výraznému odklonu od Země. Při superrefrakci je naopak velké zakřivení vlny.

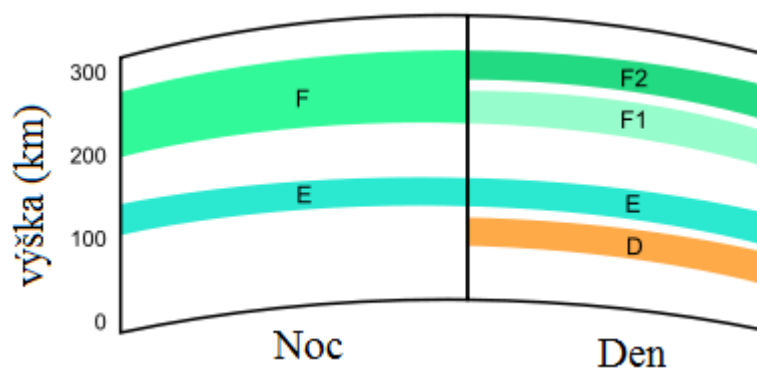


Obrázek 25: Různé typy troposférických refrakcí, převzato z [42]

Právě v troposféře dochází rovněž k únikům vlivem hydrometeorů. Kromě nich je šíření vln v troposféře je ovlivňováno i aktuální teplotou, vlhkostí vzduchu apod.

5.3.2 Ionosféra

Především sluneční záření způsobuje ionizaci molekul atmosféry, a tím i vznik ionosféry. Z tohoto důvodu je její složení různé v noci a ve dne (a obdobně i pro roční období). Ionosféra se nachází ve vzdálenosti přibližně od 60 do 500 km od zemského povrchu. Její jednotlivé vrstvy jsou na obrázku 26. Elektricky nabitě ionty různě ovlivňují vlny různých vlnových délek, které jsou ionosférou oslabovány, odráženy (postupně zakřívovány), nebo jí prostupují. To se děje v příslušné vrstvě ionosféry (v závislosti na vlnové délce). Oproti troposféře je ionosféra časově méně stabilnější (atmosférické poruchy apod., viz [43]).



Obrázek 26: Složení ionosféry, převzato z [48]

Jednotlivé vrstvy ionosféry byly definovány na základě měření.

- Vrstva **D** se nachází ve výškách od 60 do 90 km. Způsobuje (vysoce nežádoucí) absorpci vln na kmitočtech přibližně pod 10 MHz. Bez přítomnosti slunečního ionizujícího záření tato vrstva v noci zaniká. Vysílače v pásmu VDV, DV (DRM30) tak mají v noci stejný dosah při menším vysílacím výkonu.
- Podobně i vrstva **E** je během noci oslabena. Tato vrstva se nachází ve výškách od 90 do 150 km. Vrstva odráží vlny do kmitočtu přibližně 10 MHz. Ve zvláštních případech ionizace a významnému nárůstu hustoty elektronů, vzniká vrstva **E_s** (sporadická), která je tvořena tenkou oblačností. Tato vrstva dokáže odrážet vlny až do 50 MHz, v ojedinělých případech i více.
- Vrstva **F** se nachází ve výškách od 150 do 500 km, a je ze všech předchozích vrstev nejhustší. Nejvyšší hustota způsobuje, že vlny, které se dostanou do této vrstvy, většinou proniknou dále do kosmu. Podobně, jako u předešlých vrstev, se denní a noční složení vrstvy **F** odlišují. Vrstva **F₁** se nachází ve výškách od 150 do 210 km. Od vrstvy E se liší velmi silnou závislostí ionizace na denní době. Vrstva **F₁** splývá po západu Slunce s vrstvou **F₂**. Ta je tvořena plynným kyslíkem, který je ionizován ultrafialovým zářením. Na denní době a ročním období je závislá i vrstva **F₂**. Vlivem nízkého tlaku ve větších výškách zde probíhá rekombinace po západu Slunce o něco pomaleji než v nižších vrstvách. Jako jediná je vrstva **F₂** závislá i od toho, zda se pod ní nachází oceán, nebo pevnina.

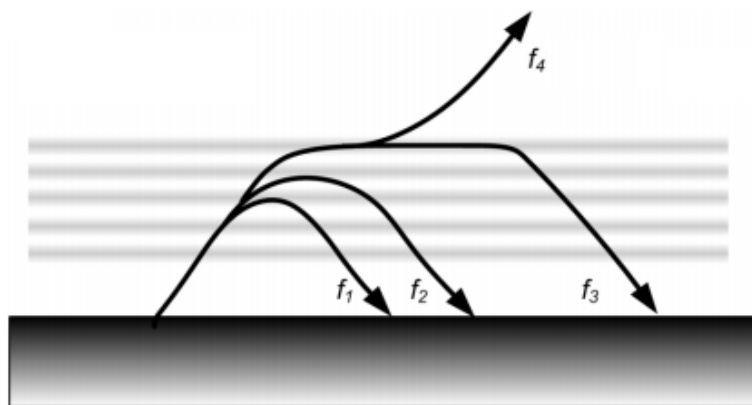
Aby nedošlo při pozemním spoji k úniku do kosmu, musí být vysílaná vlna menšího kmitočtu, než maximálního možného (f_{MAX}). Tento kmitočet je definován vztahem (6).

$$f_{MAX} = f_0 \sin(\varphi_d) \quad (6)$$

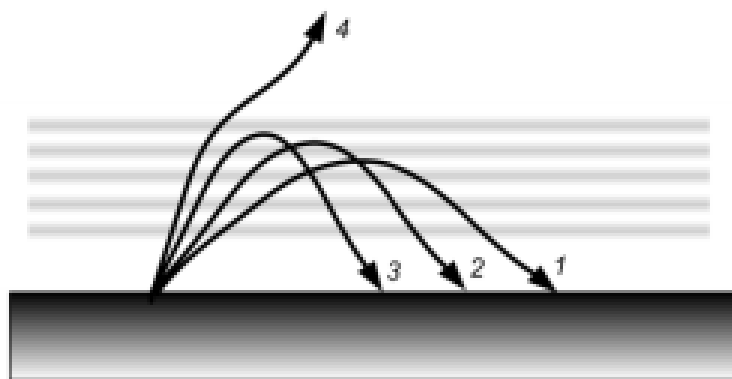
Za předpokladu rozdělení ionosféry na konečný počet horizontálních vrstev, které na sebe navazují, můžeme každou z nich charakterizovat konstantní koncentrací volných elektronů (N). Tato koncentrace je nenulová, a protože vyšší vrstvy jsou vystaveny více ionizujícímu záření, bude N stoupat s výškou. Dráha procházejícího paprsku se bude postupně zakřivovat, a na poslední vrstvě dojde k jeho odrazu. Z rovnic pro šíření vln je možné odvodit vztah (7) pro kritický kmitočet [42]. Tento kmitočet (f_0) udává maximální kmitočet, pro který se vlna od dané vrstvy ionosféry odrazí. Jeho hodnota je různá pro různé vrstvy (obecně od 1 do 15 MHz).

$$f_0 = \sqrt{80,6 N} \cong 9\sqrt{N} \quad (7)$$

Ve vztahu (6) je φ_d úhel dopadu na spodní vrstvu ionosféry. f_{max} bývá někdy označována **MUF** (maximum usable frequency) Na obrázku 27 jsou situace, kdy se pro různé kmitočty vlna buď odrazí od některé z vrstev ionosféry, nebo jí prostoupí. To závisí od toho, zda jsou vysílané kmitočty (f_1, f_2, f_3) větší, či menší než f_{max} (**MUF**). Vlny jsou ve všech případech vysílány pod stejným úhlem (elevací). V případě, který je na obrázku 28 vidíme, jakým způsobem ovlivňuje změna elevace šíření vlny (kde $f_1 = f_2 = f_3$). Vztah (6) je třeba v případech, kdy se vlna šíří skoky, delšími než 1000 km vynásobit empirickou konstantou. Důvodem je zakřivení Země (a tedy i ionosféry).



Obrázek 27: Interakce vln různých kmitočtů a ionosféry pro $f_3 = \text{MUF}$, $\text{MUF} > f_2 > f_1$, a $f_4 > \text{MUF}$, převzato z [42]



Obrázek 28: Interakce vln různých elevací a ionosféry, převzato z [42]

Rovněž můžeme z obrázků 27 a 28 vidět, že při spoji, využívajícím odrazu od ionosféry, existuje tzv. pásmo ticha v blízkosti vysílače. To je v případě potřeby pokryto přízemní vlnou. Ionosférickým spojem lze teoreticky propojit dvě libovolná místa na Zemi za použití vícenásobného odrazu (nepředvídatelné nehomogenity ionosféry ale neumožňují používat tento typ vlny pro účely určování polohy).

5.4 Odrazy vln od povrchu Země

Kromě odrazu (postupnému ohybu) vln od ionosféry, počítáme i s odrazem od zemského povrchu.

Při tomto odrazu hraje důležitou roli veličina, popisující vztah elektrické intenzity pole \mathbf{E} a elektrické indukce \mathbf{D} , tj. elektrická permitivita ε , která je definována vztahem (8), kde f je kmitočet vlnění. Tak jako fázory \mathbf{E} a \mathbf{D} , i permitivita je kmitočtově závislá. Pro harmonický průběh \mathbf{E} a \mathbf{D} se pracuje s komplexní permitivitou ε_k , viz vztahy (9 a 10).

$$\varepsilon(f) = \frac{\mathbf{D}(f)}{\mathbf{E}(f)} \quad [\text{F.m}^{-1}] \quad (8)$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon - j \frac{\sigma}{2\pi f} \quad (9)$$

Ve vztahu (9) je j imaginární jednotka a σ měrná vodivost (konduktivita – pokud bude nulová, permitivita již nebude komplexní). Vztah (9) se používá pro časový průběh elektrické intenzity pole, který je definován vztahem (10), kde φ_0 je počáteční fáze a E_0 je konstanta.

$$E(t) = E_0 \sin(2\pi f t + \varphi_0) \quad (10)$$

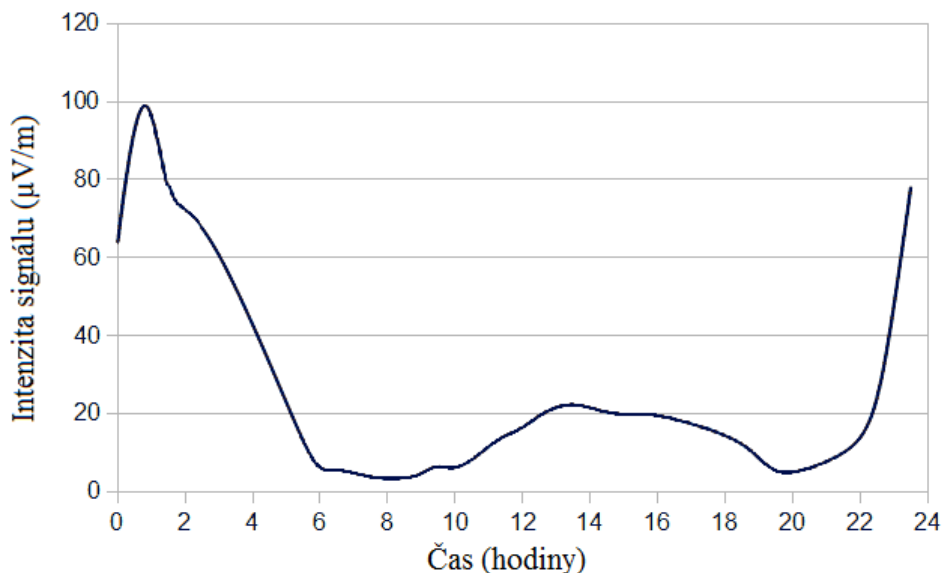
Hodnota permitivity vakua ε_0 je přibližně $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$. Pro popis materiálů se používá relativní permitivita ε_r (11).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (11)$$

Hodnota ε_r je pro vzduch přibližně 1,00054, pro vodu 81. Podrobnější, experimentálně měřené vlastnosti Zemského povrchu lze nalézt v [49]. Atlas vodivostí, resp. konduktivit můžeme nalézt v [50].

5.5 Shrnutí

Přesnost určení polohy, ať už se jedná o Loran, GNSS, či DRM, závisí od míry degradace vlny, přijaté z vysílače. U pozemní navigace na kmitočtu 100 kHz je vhodné použít přízemní povrchové vlny, a to nejlépe nad vodní hladinou, která má, na rozdíl od pevniny stálější hodnotu vodivosti. Troposférická, či ionosférická vlna sice umožňují při vícenásobném odrazu velký dosah jednoho vysílače, ale šíření časové informace tímto způsobem je nepřesné. Důvodem je časová nestabilita a nehomogenita ionosféry, která se dramaticky mění mj. při východu a západu Slunce (soumrakový jev), nebo při atmosférických poruchách. Tyto faktory totiž výrazně ovlivňují míru ionizace molekul ionosféry. Takto se signály Loranu, DRM30 či „AM stanic“ sice mohou šířit na velmi velké vzdálenosti, ale jejich úroveň často kolísá i o 60 dB během jedné vteřiny vlivem proměnlivosti úniků [43]. Obrázek 29 zobrazuje závislost průměrné hodnoty přijaté intenzity signálu na denní době pro krátkovlnný vysílač, vzdálený 1700 km od přijímače.

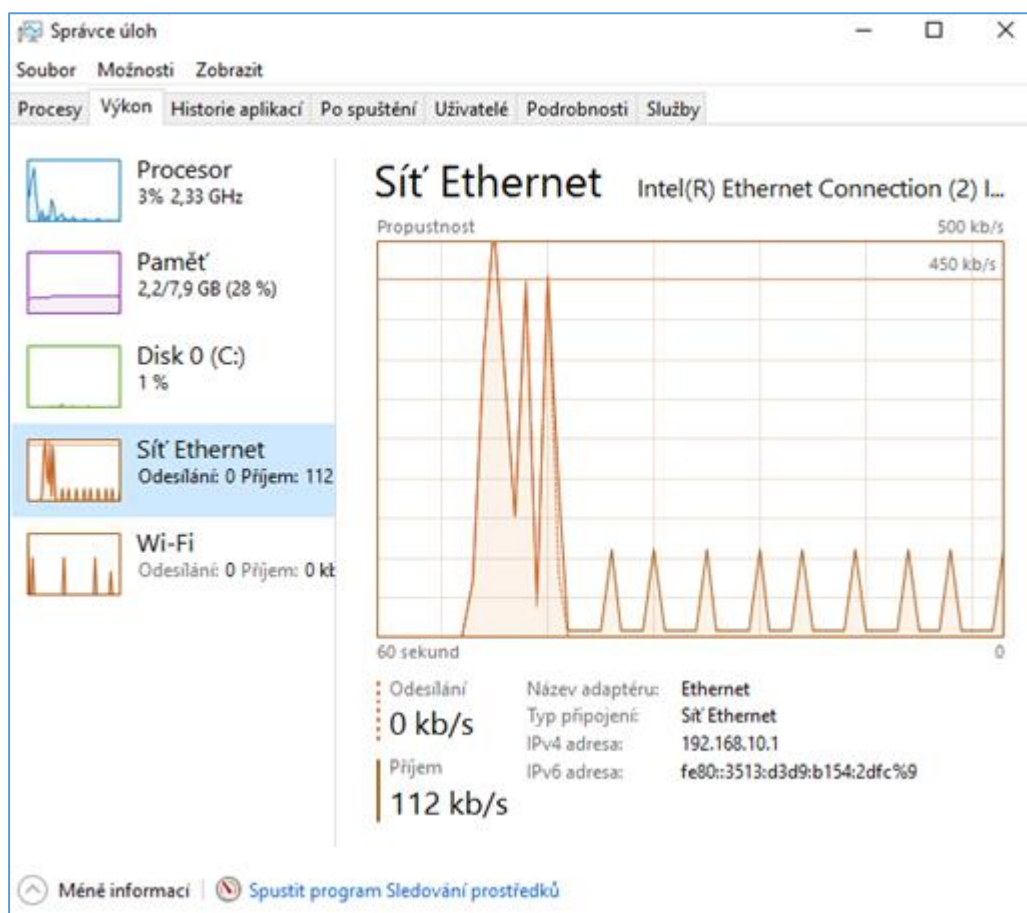


Obrázek 29: Závislost síly signálu na denní době pro vysílání na 77,5 kHz. Vzdálenost přijímače od vysílače je 1700 km, vysílání má konstantní výkon, převzato z [57]

Vysílaný kmitočet ovlivňuje i to, ve které vrstvě ionosféry se vlna odrazí (nižší vrstvy odrážejí nižší kmitočty). Pro šíření času odrazem vln je ionosféra nevyhovující, rozdíl jedné μs může způsobit odchylku stovky metrů. Právě v ionosféře dochází k nežádoucímu rozptylu signálů družicové navigace (možná kompenzace je například oprava výsledné polohy korekcemi, viz kapitola 2.2.3). Loran má oproti GNSS i lepší šumovou imunitu, navíc u něj výkyvy, způsobené počasím a hydrometeory ovlivňují pouze amplitudu signálů. Oproti GPS má i zmiňovanou menší zaručitelnost a schopnost šířit se v prostředí s překážkami, které díky své velikosti blokují signály GNSS. Hyperbolická navigace u Loranu umožňuje i efektivně rozmístit vysílače, a tím regulovat poměr přesnosti a pokrytí, resp. počtů vysílačů.

6 Pokusné příjmy

Pokusy probíhaly s přijímačem Ettus N210 a počítačem s MatLabem. Ve skriptu (přílohy 1 a 2) jsou hodnoty na svislé ose převedeny na výkonovou úroveň přijatého signálu v dB, což lépe umožňuje srovnávat poměrové výkony vysílačů. Nastavením parametrů, které jsou popsány v příloze 1 můžeme ovlivňovat velikost datového toku v čase mezi přijímačem a počítačem. Nevhodná konstelace může způsobit „zmrznutí“ MatLabu. Na obrázku 30 je zachycen časový průběh komunikace.



Obrázek 30: Možný časový průběh komunikace přijímače a počítače

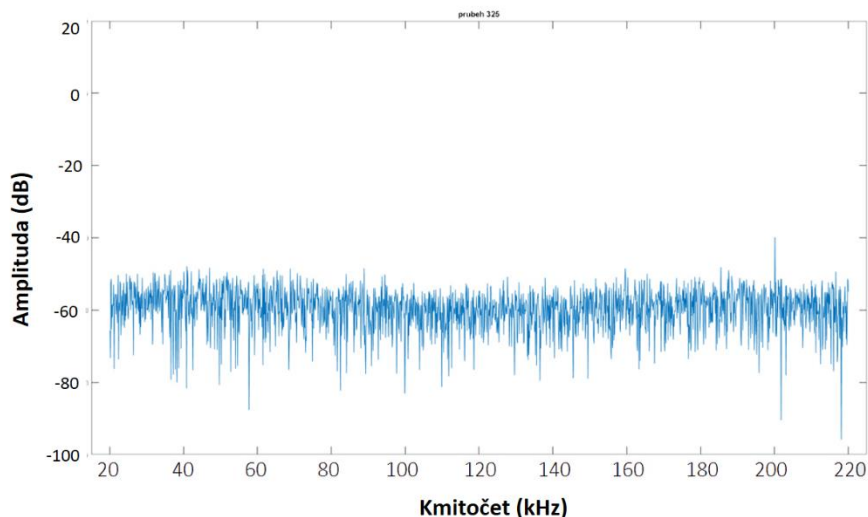
6.1 Příjem Loranu

Pro příjmy bylo použité aktivní vícezávitové rámové antény, viz obrázek 31. Tato anténa byla umístěná v laboratoři v 8. patře a posléze nad kovovou střechou budovy FEL v Dejvicích. Cílem bylo zachytit signál z vysílače v Anthornu a ev. vysílání Čajky v GRI 8000, viz obrázek 15.



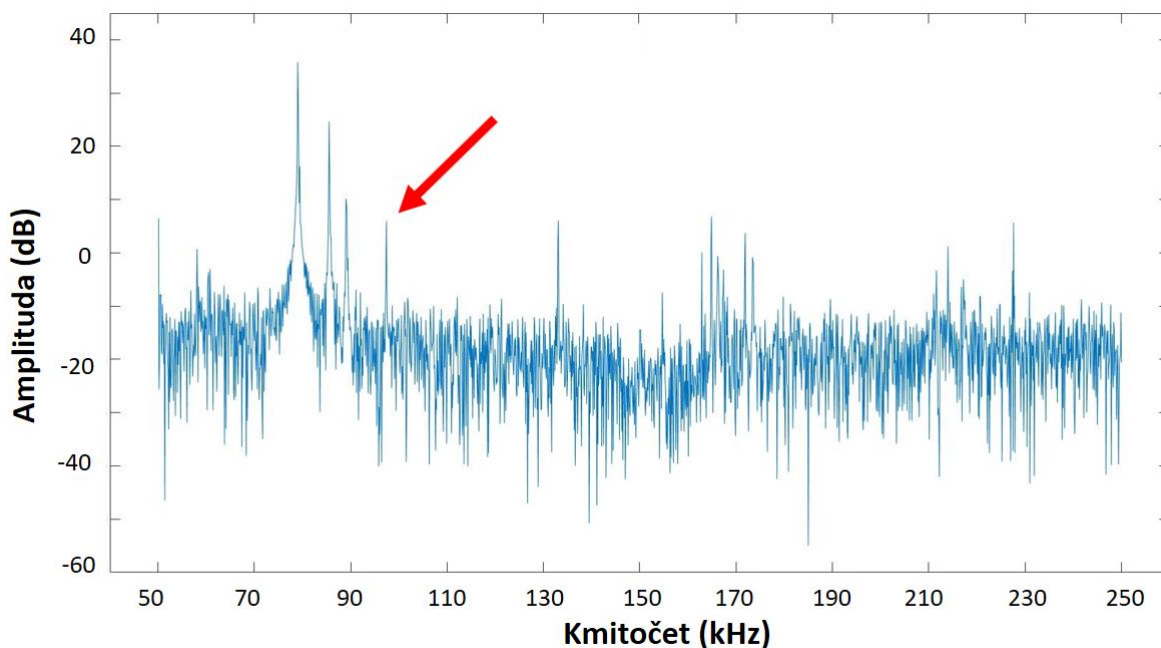
Obrázek 31: Použitá rámová anténa

Přijatá data byla automaticky ukládána a vykreslována v kmitočtové ose. To sloužilo k prvotní indikaci zachycení signálu. Uložená data lze později vykreslit v MatLabu v časové ose, která je vhodná pro detekci časového rozdílu, který odpovídá dráhovému rozdílu. Jenom pro detekci signálu je možné použít průměrování – nejdřív nás zajímá, vysílá-li nějaká stanice na 100 kHz za celý čas měření. Rozsah 20-220 kHz, resp. 50–250 kHz (200 kHz) byl volen z důvodu příznivých podmínek datového toku při kontinuálním měření. Zároveň je střední kmitočet (120 či 150 kHz) mimo sledované pásmo, což eliminuje chybné hodnoty na okrajích, které se příkazem „*fftshift*“ dostávají do středu. Měření probíhala dvakrát za vteřinu, data se odesílala do počítače v paketech přibližně 15 krát za minutu. Pětiminutová měření tedy sestávala z přibližně 6000 průběhů, které se sčítaly a následně podělily hodnotou 6000. Průměrování je popsáno i v příloze 2. Při měření uvnitř laboratoře se s největší pravděpodobností uplatnily rušivé vlivy a útlumy (okna s hliníkovými fóliemi, kovovými rámy apod.). Výsledek těchto měření je na obrázku 32.



Obrázek 32: Měření s anténou uvnitř laboratoře

Další měření byla proto prováděna s anténou umístěnou nad střechou. To se projevilo pouze nepatrným zvětšením amplitud (rozdílů) signálů, které se ale dostaly po průměrování na přibližnou úroveň signálů měření v místnosti. Jediným rozdílem byla slabá viditelnost časového signálu DCF77 (380 km vzdálené vysílání od místa měření o výkonu 50 kW). Další měření bylo proto prováděné během západu slunce, kdy lze díky soumrakovému jevu očekávat větší fluktuace signálu, které se zobrazí ve výsledném průběhu. Ten můžeme vidět na obrázcích 33 a 34.

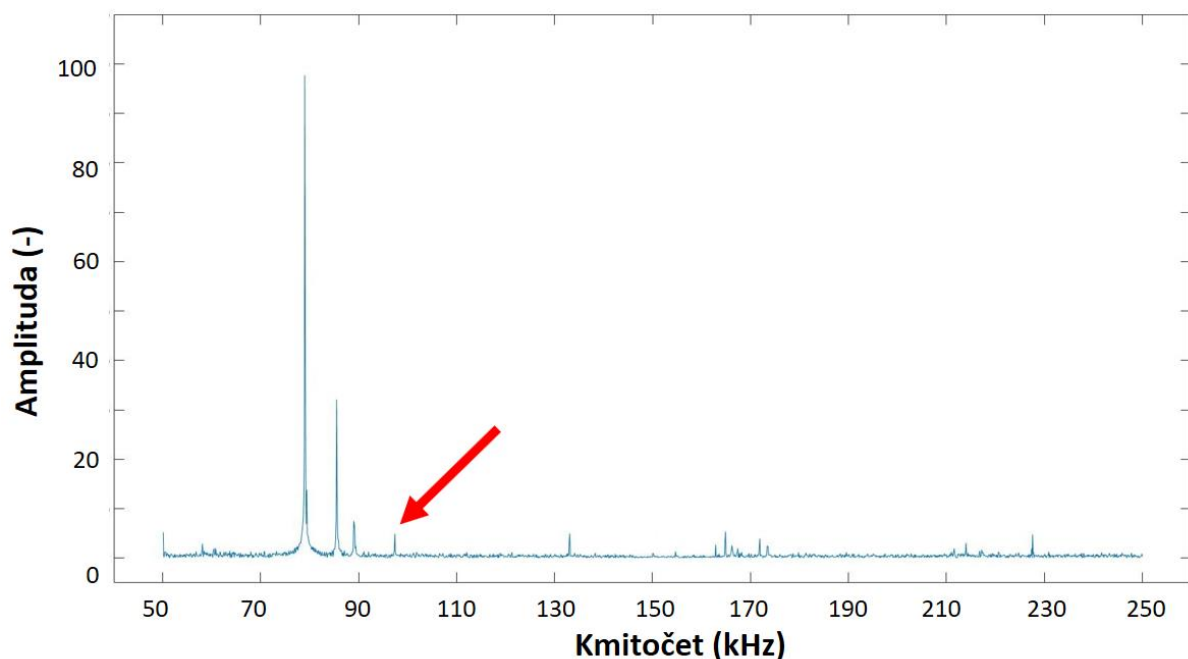


Obrázek 33: Měření s anténou vně laboratoře, během západu slunce, přibližně 40 minut.

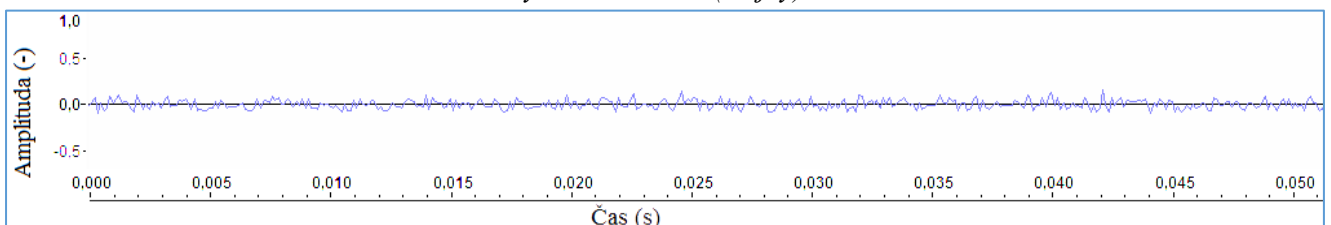
Hodnoty na ose y převedeny na dB.

Šipkou je označeno pravděpodobné vysílání Loranu (Čajky).

Doba měření byla přibližně 40 minut, čemuž odpovídal vysoký počet průběhů – 50 000. Signály, jejichž příjem byl časově stabilní (DCF na 77,5 kHz) tím získaly ve spektru dominantní tvar. Kromě jiných zachycených signálů (amatérské vysílání na 135 kHz, [52]), můžeme vidět i Loran, resp. Čajku (označeno šipkou). Jejich signály ale nejsou natolik výrazné, aby šly i po filtraci demodulovat. Průměrování takto vysokého počtu průběhů dokáže degradovat časovou informaci signálu, nezbytnou pro navigaci. Tomu lze zabránit tak, že nastavíme čas jednoho průběhu v MatLabu shodný s časem T_{GRI} , případně jeho celočíselným násobkem. Tento postup ale v sobě nese to úskalí, že signály jiné skupiny GRI jsou libovolně „porozhazovány“. Výsledek z obrázků 33 a 34 lze v časové oblasti vykreslit kromě MatLabu i například v programu Audacity [54], viz obrázek 35.



Obrázek 34: Měření s anténou vně laboratoře, během západu slunce, přibližně 40 minut. Hodnoty na ose y převedeny poměrově k největší (DCF). Šipkou je označeno pravděpodobné vysílání Loranu (Čajky).

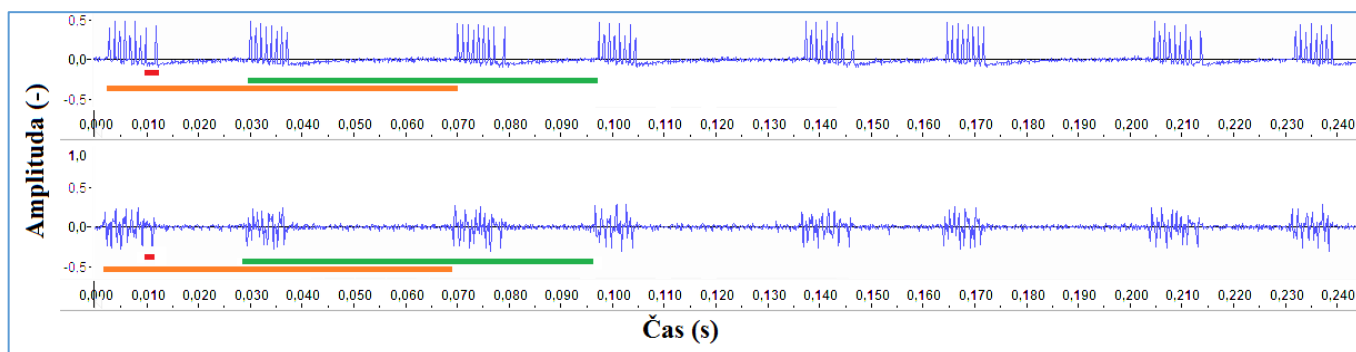


Obrázek 35: Část časového průběhu signálu

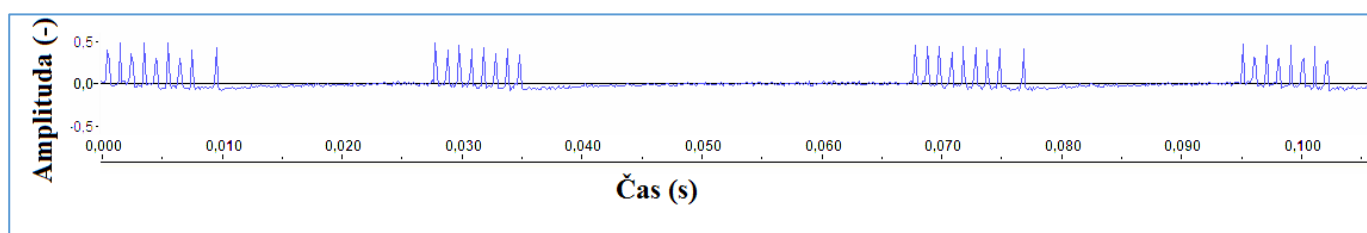
Kvůli neznalosti časů $\tau_{ED,1}$, $\tau_{ED,2}$ atd. (viz obrázek 3), tj. časů, o které se zpožďuje vysílání stanic S za stanicí M, nebylo možné detekovat vysílání s využitím autokorelační funkce. I po filtraci a normalizaci nebyly jednotlivé pulzy spolehlivě detekovatelné.

6.1.1 Měření pomocí vzdálených přijímačů

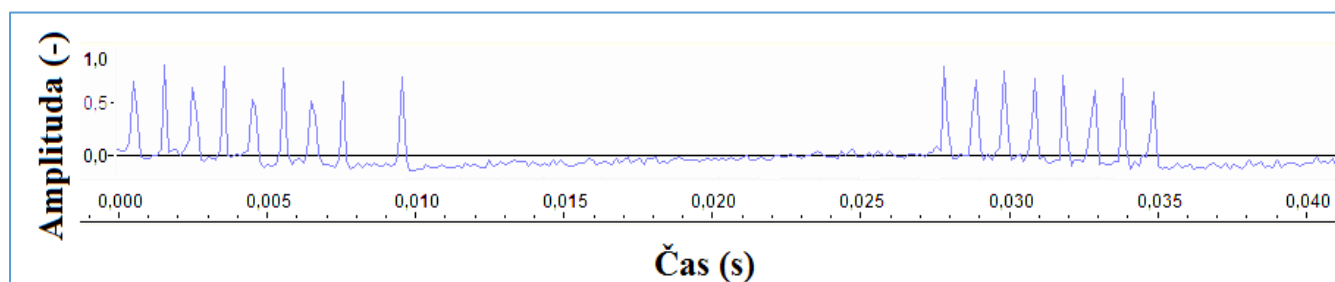
Obdobná metoda analýzy byla proto využita na datech, získaných z přijímačů, které jsou dostupně laditelné na internetu [53]. Pro srovnání jsou na obrázku 36 zpracována data z přijímačů v Southamptonu a Petrohradu.



Obrázek 36: Příjem na vysílačích v Southamptonu (nahore), a Petrohradu (dole). Časové úseky, vyznačeny zeleně a oranžově, byly po srovnání identifikovány na 0,067 s, červený úsek byl z horního průběhu odečten 0,1 s. U obou průběhů je stejná perioda vysílání.



Obrázek 37: Seskupení pulzů (8, či 9) u průběhu, měřeného přijímačem v Southamptonu, (jde o výseč z obrázku 36).



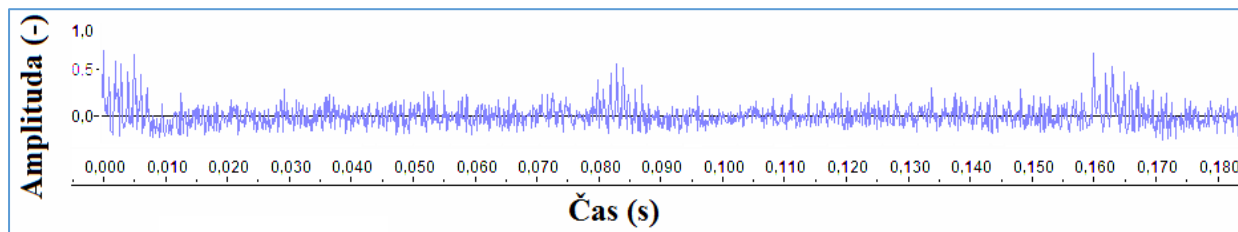
Obrázek 38: Přiblížení průběhu z obrázků 37 (a 36).

Vidíme dvě skupiny pulzů, první jich má 8+1, druhá 8.

U záznamů příjmu ze Southamptonu se po přiblížení dají rozeznat jednotlivé pulzy pro jedno vysílání, viz obrázek 37. Jejich vzájemná vzdálenost je 1 ms (od počátku jednoho k počátku dalšího). Jasně viditelný devátý pulz je od posledního ze skupiny 8 pulzů vzdálen 2 ms. Tyto vzdálenosti odpovídají standardu pro Loran-C, kde délka M pulzu je $8 \cdot 1\text{ms} + 2\text{ms} = 10\text{ms}$ a délka S pulzu $8 \cdot 1\text{ms} = 8\text{ms}$.

Ačkoliv jsou pulzy, vysílané z Anthornu, jasně identifikovatelné i na petrohradském přijímači, který je vzdálen od Anthornu přibližně 2000 km, pulzy Čajky tam vidět nejsou (přímá vzdálenost Petrohrad – Petrozavodsk je přibližně 272 km).

Posléze se podařilo zachytit i Čajku, výsledek je na obrázku 39, kde je ale i po filtraci a normování signálu patrné, že vysílá pouze jedna stanice z GRI.



Obrázek 39: Zachycené vysílání pouze jedné stanice z GRI 8000, vzdálenost počátku pulzů je 80 ms.

6.1.2 Měření přijímačem Reelektronika LORADD

Další měření [69] probíhalo na komerčním přijímači Reelektronika LORADD [51]. Jde o přijímač, kombinující signály GNSS a eLoranu (ev. eDLoranu), který dokáže dekódovat zprávy Eurofix a GNSS korekce, šířené vysíláním Loranu (popsáno v [19]). Schopnost dekódovat Čajku je omezená pro specifické případy, kdy je jí možno zpracovávat jako Loran-C (bez GNSS korekcí, Eurofixu apod., pouze hyperbolická navigace na základě časových poměrů v dané GRI). Výstup se může získávat například prostřednictvím Ethernetového kabelu do počítače s příslušným softwarem [55]. Část přijímače s konektory je na obrázku 40:



Obrázek 40: Strana přijímače Reelektronika LORADD s konektory pro napájení, antény GPS a Loranu, a ethernetovým rozhraním pro spojení s počítačem, převzato z [51]

Při měření, provedeném v Týně nad Vltavou [69], byl přijímač schopen zachytit (?) signál všech vysílačů Čajky ze skupiny GRI 8000 (obrázek 15), a dva signály vysílače Anthorn (M a S). Výstupní data jsou v tabulce 6:

Tabulka 6: Neupravovaná výstupní data pro měření s přijímačem Reelektronika LORADD:

| Stanice | | TOA (μs) |
|--------------------|----------|------------|
| Poloha | Označení | |
| Anthorn | 6731 M | 32520,6897 |
| | 6731 Y | 59820,5057 |
| Bryansk / Karachev | 8000 M | 58390,2740 |
| Petrozavodsk | 8000 1 | 72761,9303 |
| Slonim | 8000 2 | 3469,8840 |
| Simferopol | 8000 3 | 31652,1077 |
| Syzran | 8000 4 | 49327,9150 |

Poznámka: TOA označuje indikovaný čas příchodu signálu přijímačem

Přijímač disponuje databází, na základě které přiřadí skupině pulzů znak „M“ pro master (konkrétně pro skupinu pulzů, přesahující 8 ms), a znaky „X,Y,Z, 1,2,3,4“ pro stanice Slave. Jim se přiřazuje identifikátor (číslo a jméno – poloha) na základě toho, že přijímač zachytí pulzy stanice M. Z jejich opakování určí čas GRI (T_{GRI}), a dle databáze (časy $\tau_{ED,1}$, $\tau_{ED,2}$ atd., viz obrázek 3) přijímač automaticky rozhodne kdy má přibližně očekávat další pulzy S za pulzem M. U vysílání Loranu je schopen dekódovat zprávy Eurofix. Pulzy, přijaté z Anthornu, korespondují s příjmem z obrázků 36, 37 a 38, což je vyjádřeno v rovnici 12, která vyjadřuje čas $\tau_{ED,1}$.

$$\tau_{ED,1} = |TOA_M - TOA_Y| = 2 \text{ ms} + 8 \cdot 1 \text{ ms} + 17,2 \text{ ms} \quad (12)$$

Hodnoty $TOA_{M,Y}$ jsou časový rozdíl přijatých pulzů z tabulky 6. Druhým způsobem vyjádření času $\tau_{ED,1}$ je součet délky pulzů M, a mezery mezi pulzy M a Y (viz obrázek 3). Odchylna měření je v tomto případě přibližně 55 ms, což může způsobit odchylku až 16 km. Protože se vysílá z jednoho místa, není v tomto případě hyperbolická navigace proveditelná.

U příjmů Čajky je situace složitější. Vzhledem k tomu, že přijímač pracuje s pevnou databází, nedovede u Čajky odhalit například prohození stanic Simferopol a Syzran. Hodnoty $\tau_{ED,2,3,4}$ se dají vyjádřit pomocí vztahů (13), (14) a (15).

$$\tau_{ED,2} = |TOA_M - TOA_1| + \tau_{ED,1} \quad (13)$$

$$\tau_{ED,3} = |TOA_2 - TOA_3| + \tau_{ED,2} \quad (14)$$

$$\tau_{ED,4} = |TOA_3 - TOA_4| + \tau_{ED,3} \quad (15)$$

Způsob výpočtů zpoždění vysílačů je patrný i z obrázku 3. Protože se ale čas TOA pro Slonim (8000 2) značně odlišuje od ostatních časů, vypočtené hodnoty $\tau_{ED,X}$ se značně deformují, a to natolik, že překračují i hodnotu T_{GRI} (!). Mohlo by se tedy zdát, že chybnou je hodnota pro Slonim, nicméně po provedení výpočtu pro kruhovou navigaci, jako jediná má menší odchylku, než 1000 km. Poslední možností je to, že oproti Slonimu jsou ostatní vysílače zachyceny o čas T_{GRI} později (ev. o celočíselný násobek T_{GRI}). Ale ani různé tyto kombinace nepřinesly po vyzkoušení lepší výsledky. Kvůli statickému měření můžeme vyloučit i negativní vliv Dopplerova jevu. U vysílání z Anthornu je čas $\tau_{ED,1}$ dohledatelný, nicméně u Čajky tyto hodnoty zveřejněny nejsou. Jsou voleny s ohledem na geometrickou konstelaci stanic, výkony vysílačů apod. (viz kapitola 2). Srovnáním s hodnotami vysílání stanic Loranu-C ve Spojených státech se můžeme domnívat, že jde o hodnoty z rozmezí 6,5 – 8,5 ms (rozdíl 600 km). Důležité je podotknout, že tyto časy se mohou měnit, nevysílají-li všechny stanice. U pokusů o výpočet pro hyperbolickou navigaci vycházejí při použití hodnot z tabulky 6 dráhové rozdíly až o 1900, či 2500 km různé, než hodnoty očekávané. Pro úplnost je třeba dodat, že ani software přijímače nedovedl na základě přijatých dat detekovat polohu přijímače (indikovaným důvodem byl nedostatek použitelných dat).

6.1.3 Loran a Čajka – shrnutí

Měřeními bylo dokázáno, že vysílání signálů navigačních systémů na 100 kHz je na území České republiky s mírnými obtížemi detekovatelné. Velkou roli při příjmech sehrává anténa a (většinou negativní) vlivy okolí (rušení, spínané zdroje, monitory, apod.). Pro další měření byly použity online dostupné přijímače, které měly jednak vhodnější anténní systém v méně zarušeném prostředí. Rovněž byly tyto přijímače blíže k vysílačům, než Praha, anebo se k nim šířil signál převážně nad vodní hladinou. U signálu Loranu, vysílaného z Anthornu se povedlo zachytit, a detekovat pulzy které odpovídaly očekávaným předpokladům. Z důvodu pouze jednoho vysílače na území Evropy je v současnosti jeho využití pouze pro případné šíření zpráv Eurofix, a šíření času (s přesností 100ns, viz [56]). U Čajky se někdy pulzy zachytit povedlo a někdy ne, což potvrzuje nepravidelnost jejího vysílání. Z důvodu nedostatečných informací o nových systémech „eČajka“, či „Skorpion“ a vysoké pravděpodobnosti pouze testovacího vysílání, jsou i tyto signály v současné době k navigaci nepoužitelné. Může zde být i snaha Ruské federace o to, aby se i drobnou změnou, například změnou rozmístění stanic v GRI, zamezilo používání Čajky civilním uživatelům (v kombinaci s rušením signálů GNSS na Ukrajině). Tuto skutečnost potvrzují i pokusné příjmy (s online přijímači, i s přijímačem Reelektronika LORADD) a jejich číselné výsledky. Budoucnost této navigace v Evropě spočívá především v ekonomické a politické vůli, mít k dispozici navigační systém, splňující například kritéria pro námořní plavbu, který by ale nebyl založen na družicové navigaci. Současné vysílání Loranu z Anthornu nemá pro českou republiku většího významu, analogický signál DCF má na jejím území mnohem lepší parametry pro příjem.

6.2 Příjem DRM

Měření proběhlo v místnosti 436 budovy FEL v Dejvicích. Tato místnost je vybavena vnější vodorovnou drátovou anténou o délce 25 m, nataženou ve volném prostoru. Vzhledem k časové nepravidelnosti vysílání [41] byl vybrán čas experimentů tak, aby vysílaly stanice v blízkosti a zároveň s vyššími výkony. Při experimentech byly použity skripty v MatLabu (přílohy 1 a 2), které se liší tím, že skript 1 průběhy nesčítá a následně neprůměruje, ale každý ukládá do samostatného souboru (pro delší příjmy je vhodnější použít modifikaci pro postupné ukládání do jednoho souboru). Pro účely navigace pouze podle síly signálů více vysílačů není třeba signály dále dekódovat. V takovém případě je metoda průměrování velice vhodná na určení přijatých výkonových poměrů více vysílačů. Dekódování lze v případě potřeby provést pomocí softwaru DREAM [38], který byl vyvinut Darmstadskou univerzitou k demodulaci DRM signálů. Vybrané stanice pro pokusný příjem jsou v tabulce 7.

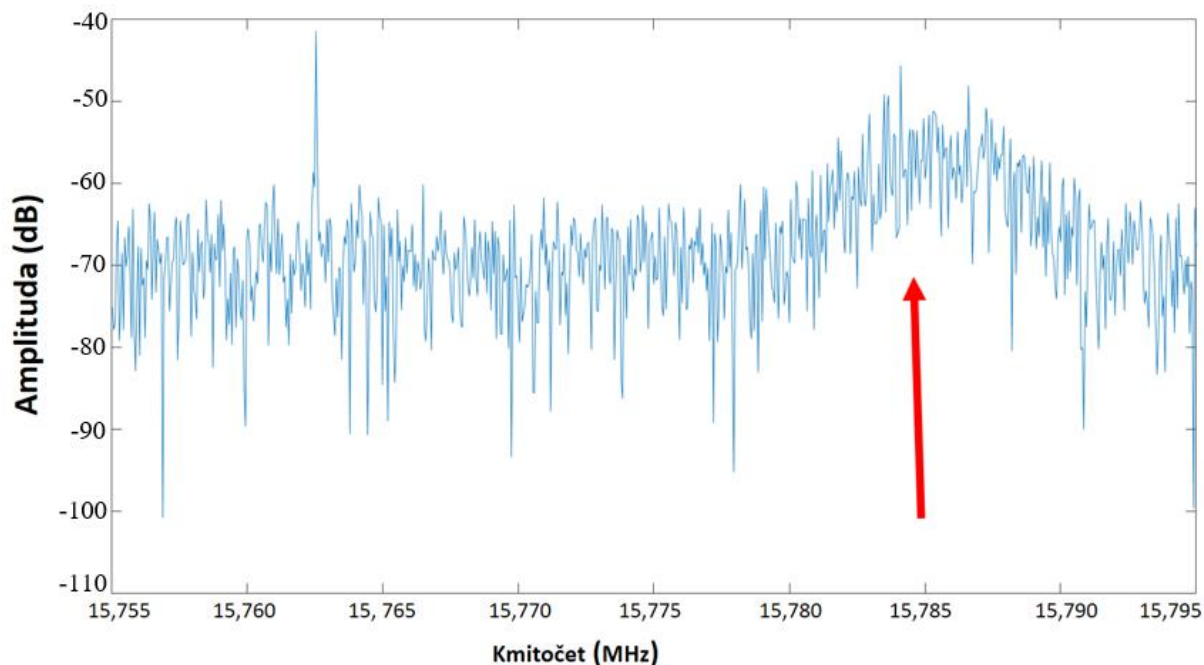
Tabulka 7: očekávané stanice DRM, dle kritéria polohy a výkonu

| Kmitočet | Výkon | Přibližná poloha vysílače, krajina |
|-----------|--------|---------------------------------------|
| 15,785MHz | 1,0 kW | Německo |
| 26,045MHz | 0,1 kW | Německo |
| 26,010MHz | 0,1 kW | Itálie (sever) |
| 26,060MHz | 0,1 kW | Itálie (sever) |
| 3,965MHz | 1,0 kW | Francie (jihovýchod) |

Šířka sledovaného pásma byla vždy 200 kHz, což dostatečně pokrývá všechny módy vysílání DRM, a zároveň zabraňuje dvěma chybným hodnotám z okrajů spektra znehodnocení měření⁵. Vzhledem ke současnému, minimálnímu rozšíření DRM v Evropě, a tedy i jeho menší atraktivnosti pro provozovatele, jsou často informace o vysílačích (výkon, směrování, módy přenosu DRM apod.) nepřesné a neaktuální, či zpětně aktualizované. To má velice neblahý účinek na pokusy o zachycení signálů a determinaci polohy na jejich základě.

⁵ Příkaz v MatLabu „*fftshift*“ definuje, sledujeme-li spektrum v intervalu $\langle -\frac{f_s}{2}, \frac{f_s}{2} \rangle$, nebo $\langle 0, f_s \rangle$. Hodnota f_s je ve vztahu (4) označena písmenem „B“.

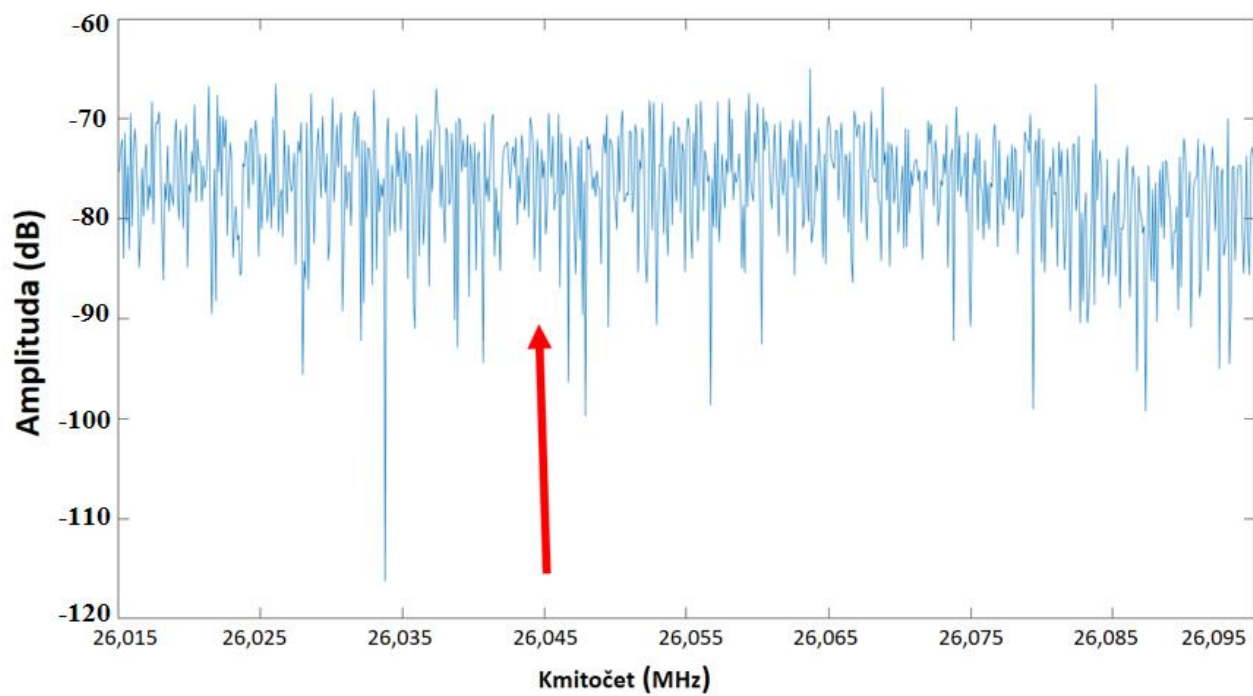
Při jednom z pokusných měření se dokonce ukázalo, že vysílání se sice nacházelo na deklarovaném kmitočtu, ale dle spektra šlo o AM modulaci a při pozdějších pokusech o zopakování měření již stanice pravděpodobně nevysílala vůbec. Při většině z měření stanic z tabulky 7 se signál DRM zachytit nepovedlo, viz následující obrázky.



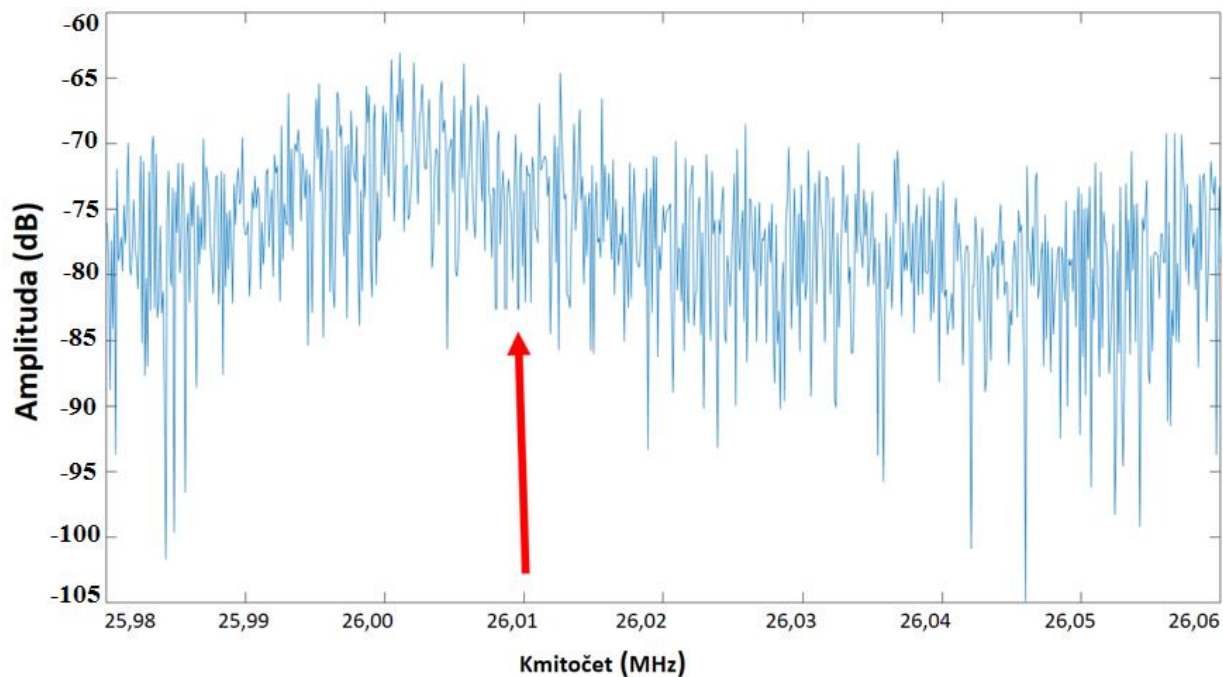
Obrázek 41: Očekávána stanice na kmitočtu 15,785 MHz

Vysílač stanice německého rádia „BitExpress“ se nachází v Erlangen (vzdušnou čarou přibližně 250 km od Prahy). Při opakovaných pokusech se vysílání podařilo zachytit pouze v jediném případě, který je na obrázku 41. Amplituda přijímaného signálu byla velmi proměnlivá, a to do té míry, že program DREAM nebyl schopen signál demodulovat, ani zobrazit jeho podrobnější parametry. Dle [53] je pravděpodobně zachycené vysílání na 15,763 MHz „rozhlasová komunikace pro necivilní využití“.

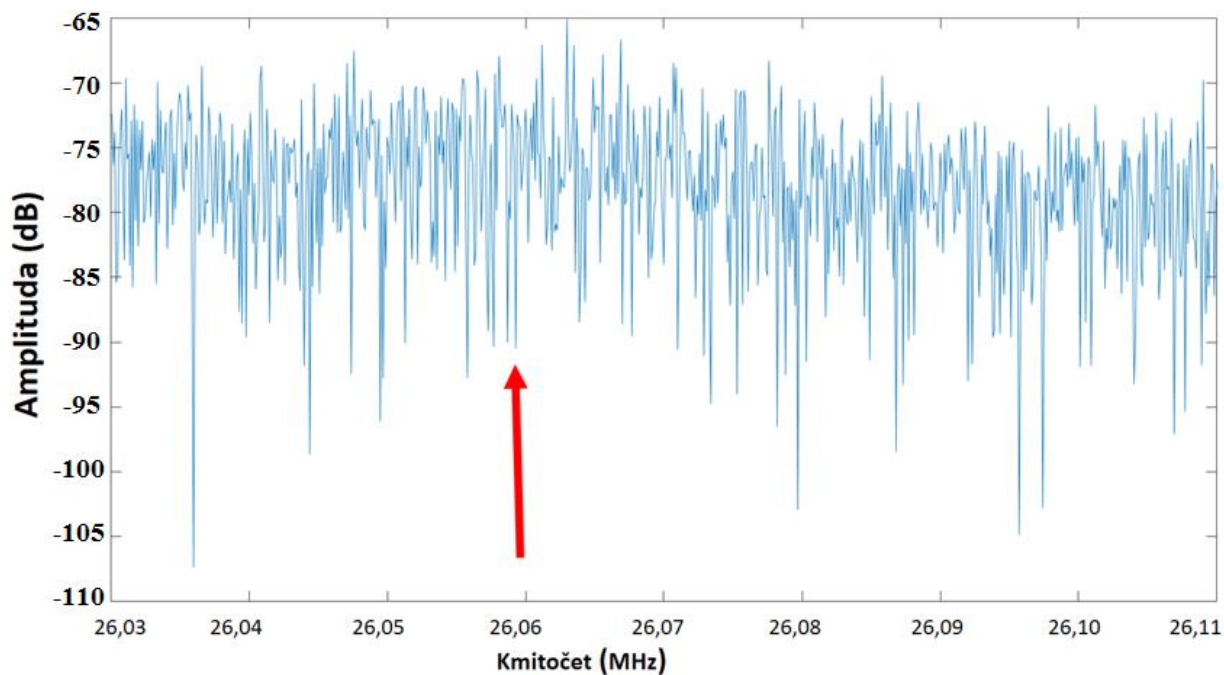
Další stanice se zachytit nepovedlo, viz obrázky 42,43,44 a 45.



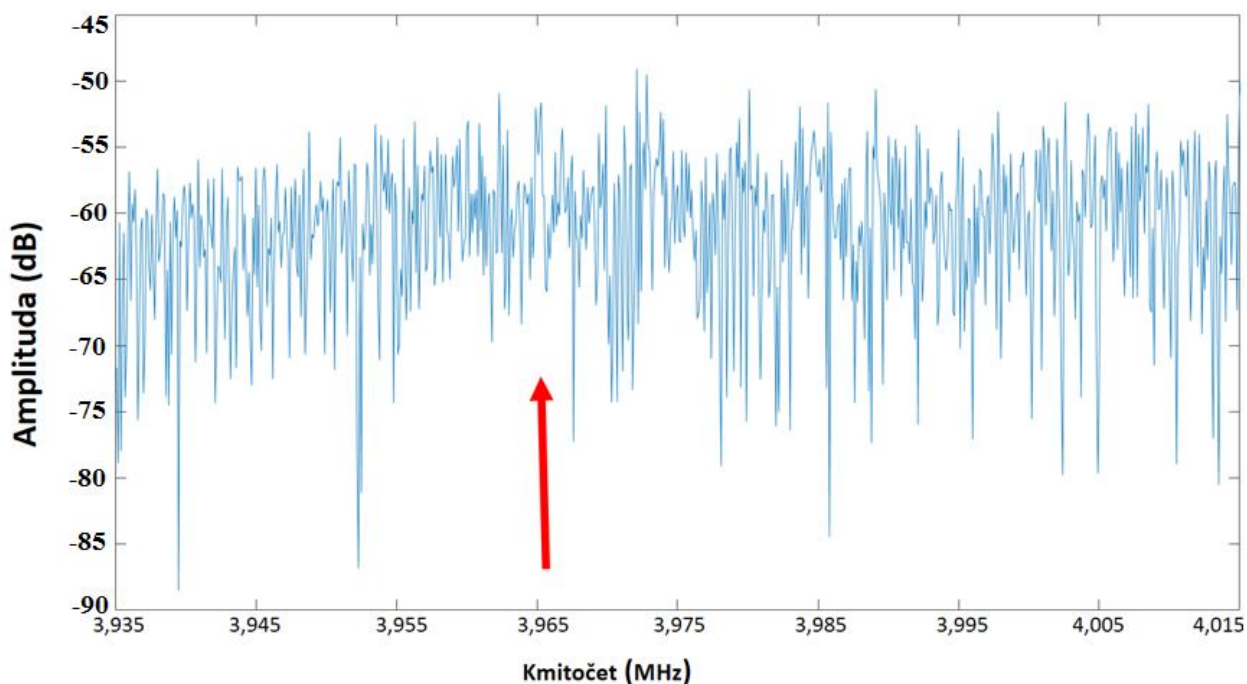
Obrázek 42: Očekávána stanice na 26,045 MHz



Obrázek 43: Očekávána stanice na 26,01 MHz



Obrázek 44: Očekávána stanice na 26,06 MHz



Obrázek 45: Očekávána stanice na 3,965 MHz

6.2.1 DRM – Shrnutí

Z obrázků 41, 42, 43, 44 a 45, které představují příjmy nejblížešších stanic relevantního výkonu (tabulka 7), můžeme vidět, že ani vyzářený výkon vysílače 1 kW nezaručuje minimální úroveň přijímaného signálu k tomu, aby jej bylo možné demodulovat, nebo stabilně přijímat.

7 Signály LTE

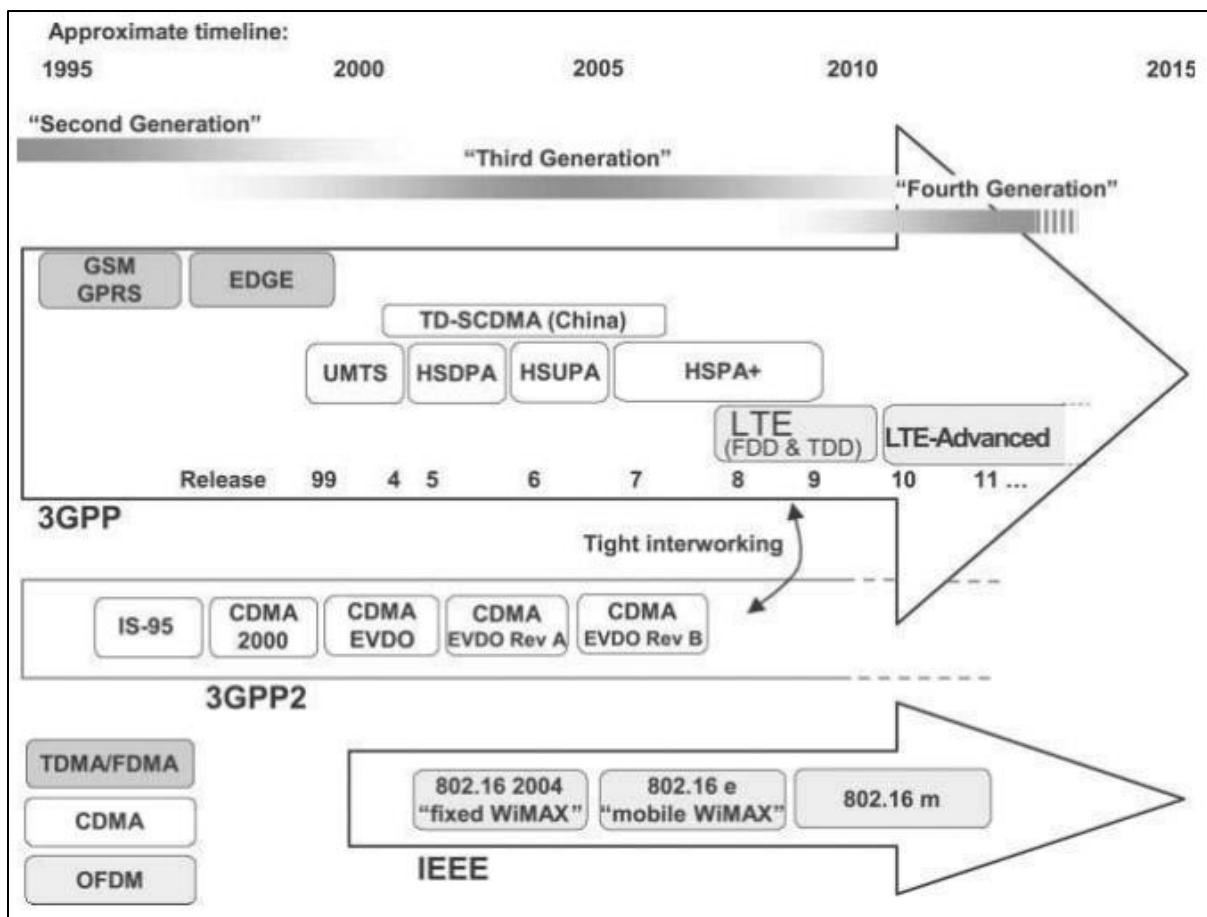
7.1 Úvod k LTE

Dalšími vysílanými signály, vhodnými pro navigaci, jsou signály Long Term Evolution – LTE. LTE je standard vysokorychlostního internetu v mobilních sítích GSM (Global System for Mobile communications). Standardem je 3G, nebo 4G v případě LTE Advanced. Důležitým rozdílem oproti předešlým standardům je to, že LTE již nepočítá se samostatným přenosem hlasu, ale jeho integraci s datovým spojením. Současný stav pokrytí území České republiky můžeme nalézt například v [59]. Ke dni 1.2.2017 je LTE v komerčním provozu i ve všech sousedních zemích. UMTS (Universal Mobile Telecommunications Systems) můžeme pokládat za předchůdce současného LTE, který byl v době vzniku LTE blízko svých technických limitů. 3GPP (Third Generation Partnership Project [60]) kompletně přepracoval celý stávající systém, čím vzniklo dnešní LTE.

7.2 Od analogových telefonů k LTE

První mobilní systémy jsou datovány již v konci 80. let minulého století, avšak kvůli jejich vysokým cenám a energetické náročnosti dosáhla globálního rozmachu až druhá generace, tj. GSM (Groupe Spécial Mobile, či Global System for Mobile Communication). **První generace** používala analogovou technologii, a více roztržštěných standardů (AMPS, TACS, NMT a další, souhrnně označovány 1G). Přírnos **druhé generace** je proto nejen i digitalizace, ale i celosvětové sjednocení rámcového standardu, co ve spojení s vývojem méně výkonově náročných, menších a cenově dostupnějších mobilních telefonů umožnilo jejich dnešní široké rozšíření. Rovněž zajistilo komunikaci v místech, kdy by bylo náročné, nebo nerentabilní budovat a udržovat fixní vedení. Vývoj systémů je na obrázku 46, kde jsou různými odstíny vyznačeny systémy přenosu s časovým, kmitočtovým, či kódovým dělením.

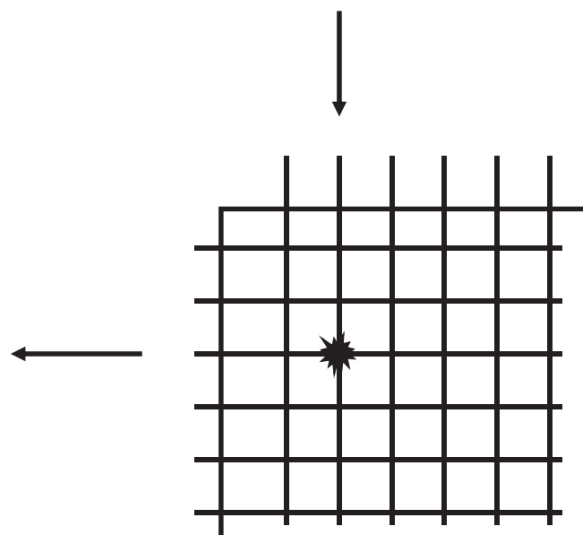
Vývoj GSM probíhal pod záštitou „European Telecommunications Standards Institute“ (ETSI). Prvním záměrem byl přenos hlasové komunikace, pak přenos textových zpráv, a později i datové přenosy. Od počátku devadesátých let začalo zavádění digitalizace přenášeného signálu. První komerční provoz byl zahájen ve Finsku v polovině roku 1991. Síť GSM pozůstává z velkého množství přepojovacích středisek, z nichž každé pokrývá zařízení v svém okolí. Oproti metalickým vedením musí řídicí software při navazování spojení vyhledat aktuální pozici adresáta a flexibilně upravovat spojení v případě, že koncové stanice nejsou statické.



Obrázek 46: Vývoj telekomunikačních standardů převzato z [61]

V Evropě bylo prvotní GSM dimenzováno pro pásmo 890–915 MHz (uplink), a 935–960 MHz (downlink). Uplink označuje veškerou komunikaci ve směru mobilní zařízení – síť, downlink naopak. Pásmo 890–915 MHz je rozděleno na 125 kanálů (šířka jednoho kanálu je 200kHz). S rostoucím počtem zařízení se, hlavně v Evropě postupně přidávala další kmitočtová pásma (ve Velké Británii se v roce 1993 začalo používat pásmo v okolí 1800MHz), což vedlo k rozšíření na 75MHz (uplink i downlink). Při zachované šířce jednoho kanálu tedy vzroste jejich počet na 375 (75:0,2). Na obou pásmech (tj. 900 i 1800MHz) je identický typ provozu GSM. Mimo Evropu se mohou standardy mírně lišit (např. odlišná kmitočtová pásma 850 a 1900 MHz v Americe).

GSM používá k zajištění komunikace přepojování (tzv. circuit switching), podobně, jako metalická vedení. Systém přepojovací matice je znázorněn na obrázku 47 (převzato z [61]).



Obrázek 47: Přepojování v síti GSM, převzato z [61]

V sítích GSM je možná i komunikace pod protokolem IP, tj. pomocí paketů. V „řečišti“ s velkou šířkou pásma se přenášejí pakety všech komunikací. Každý paket je mj. vybaven i adresou cíle, na základě které je síť směřován. Provoz sítě přepojovací a sítě směřované IP vyžaduje pro své fungování dvě samostatné infrastruktury (hlasové a internetové služby). Tento způsob je však neefektivní, řešením je náhrada spínací matice ve spínací stanici propojovací bránou (media gateway). Její hlavní úlohou je konverze a transkódování, dále potlačení ozvěn a DTMF. I hlasové hovory se tedy transformují do paketů (IP). Použití propojovací brány sjednocuje síťovou infrastrukturu, založenou na transportu IP paketů (není potřebná paralelní přepojovací infrastruktura). Tento standard je nazýván „Bearer-Independent Core Network“ (BICN). Pro mobilní (tj. koncová) zařízení je informace, je-li síť typu BICN irelevantní (a to hlavně při nižších datových tocích).

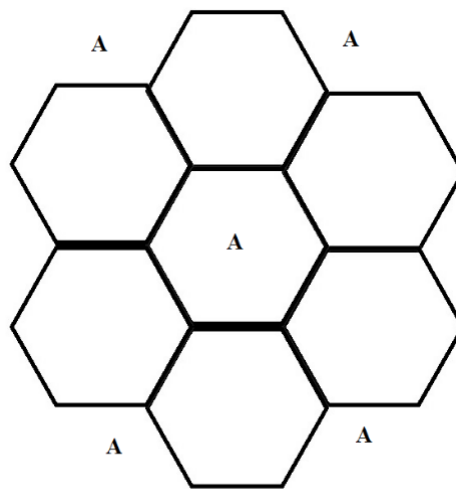
7.2.1 Base Transceiver Station

Base Transceiver Station (BTS) představuje náhradu metalického vedení rádiovým vysíláním, [30]. Operátoři si pomocí těchto stanic budují infrastrukturu pokrytí. Například v Německu je počet BTS jednoho operátora přibližně 20 tisíc [61]. Na obrázku 48 je příklad antény pro BTS [62].



Obrázek 48: Anténa pro BTS (převzato z [62])

Hustota stanic je dána předpokládanou hustotou zařízení (město vs. venkov). Maximální dosahy se pohybují do 30 km, avšak v hustě zalidněných oblastech se používají stanice nižších výkonů s dosahem stovek metrů. Dosah tvoří buňku této stanice. Standardem mimo město je přibližný dosah 15 km (vysílací výkon mobilních zařízení je přibližně 1 až 2 W [61]). Sousední stanice (buňky) pracují z důvodu zamezení interferencí na různých kmitočtech. Na obrázku 49 vidíme, že buňka, označena kmitočtem „A“, nemá žádnou přímou hranici s buňkou, pracující na stejném kmitočtu. Ačkoliv jsou vzájemné hranice buněk na obrázku „ostře“ vyznačeny, je ve skutečnosti přechod mezi buňkami plynulý.



Obrázek 49: Buňky různých kmitočtů („A“)

Zvýšení přenosové kapacity může rovněž přinést rozdělení samotné buňky na 2, či 3 sektory (vytvoří se „podbuňky“). Těmito opatřeními se šetří přidělené kmitočtové pásmo. Komunikace BTS a zařízení využívá TDMA, nebo FDMA (časové a frekvenční dělení). Interference se omezují zavedením ochranného intervalu. Mohou vznikat jako důsledek vícecestného šíření, odrazy, různým pohlcováním apod. V BTS se rovněž využívá prokládání ke zlepšení parametrů přenosu. Vysílá se sekvence, která je přijímači známá, a přijímač je tedy porovnává. Kanály jsou rovněž děleny do logických úrovní, dle toho, zda se přenášejí data pro jednoho, nebo pro více uživatelů. Příklady druhé skupiny jsou kanály FCCH – vysílání frekvenčních korekcí (frequency correction channel), nebo BCCH (broadcast common control channel), který mj. vysílá informace o síti. Těmito kanály rovněž procházejí informace, nezbytné pro dohled nad spojením (například handover – viz 7.3.2.) a jeho navázání a rozvázání.

7.2.2 Base Station Controller

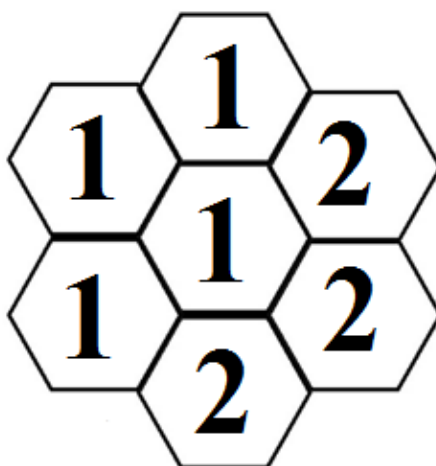
Base station controller (BSC) zodpovídá za navázání, udržování a ukončení všech spojení dané BTS, která představuje rozhraní mezi koncovým zařízením a BSC.

7.2.2.1 Handover

Udržování spojení se z důvodu mobility uživatelů provádí pomocí tzv. handoveru. Ten je iniciován, opustí-li (například během hovoru) uživatel buňku, ve které bylo spojení navázáno. Úlohou BSC je v tomto případě přesměrování hovoru do vhodnější buňky. Parametrem je síla signálu – handover je iniciován, poklesne-li pod určitou úroveň. Vyžadujeme tedy, aby byla síla signálu měřená jak BTS, tak mobilním zařízením. Během hovoru jsou do zařízení posílány kmitočty sousedních buněk, od kterých se určuje síla signálu. Mezi nejběžnější typy patří „hard“ a „soft“ handover, které se liší tím, zda je nové spojení navázáno před (soft), nebo až po (hard) ukončení předešlého spojení. Rozhodnutí, kdy se handover vykoná je tedy na BSC, který vydá příslušný pokyn pro zařízení (handover command message).

7.3 Poloha zařízení v síti GSM

Při navazování spojení je nezbytné znát polohu adresáta – nemusí jít o přesnou polohu, ale o informaci, ve které buňce se adresát nachází (nacházel). Po zapnutí koncového zařízení se odešle informace o přítomnosti zařízení do sítě. Seskupení vícero buněk (location area – LA) snižuje objem přenášených dat (počtem signalizací) v síti v situaci, kdy se zařízení pohybuje na vzdálenost delší jedné buňky (obrázek 50). Seskupování buněk má rovněž příznivý vliv na baterii telefonu, protože se snižuje počet přihlášení do sítě. Nevýhodou je, že disponujeme pouze informací, ve které LA se uživatel nachází, ale nevíme, ve které buňce. Proto je nutné při například doručení SMS zprávy dohledat zařízení mezi buňkami dané LA (paging). Velikost LA je dána konkrétní aplikací, většinou jde o seskupení 20 až 30 buněk. Na obrázku 50 jsou buňky reprezentovány šestiúhelníky, čísla „1“ a „2“ udávají dvě různé LA. Přejde-li zařízení z buňky označené „1“ do jiné buňky, označené „1“, nemusí se provádět nové přihlášení (location area update). Při přechodu buňkami různých čísel dochází k změně LA, a location area update je tedy nevyhnutný. Pro zajištění komunikace je optimální úroveň přijatého výkonu od -100 dBm do -60 dBm (v blízkosti BTS). V sítích LTE je použitý časový i kmitočtový multiplex



Obrázek 50: Seskupování sousedních buněk do location area.

7.3.1 Možné metody určování polohy v mobilních sítích

Různé metody stanovování polohy se liší měřenou veličinou (čas, síla signálu) a tím, provádí-li výpočet polohy zařízení, nebo síť. Některé metody vyžadují podrobné informace o síti, nebo sadu referenčních měření. Metody jsou následující:

- **Měření vzdáleností** – poloha je výsledkem průsečíků geometrických útvarů (kružnice, či hyperboly). Tyto útvary jsou stanoveny na základě měření vzdáleností (časů) od vysílacích stanic. Časová chyba (odchylka) znamená chybu ve vzdálenosti. Měření časů může být prováděno absolutně (TOA), nebo relativně (TDOA). Pro tuto metodu je nutná synchronizace vysílačů.
- **Měření úhlu příchodu signálu (AOA)**. Tato metody vyžaduje zachycení alespoň dvou vysílačů a znalost konstelace jejich antén přijímačem. Úhel se získává z rozdílu fází přijatých signálů z prvků anténní řady. Vícecestné šíření signálů, například v zástavbě, tuto metodu značně znevýhodňuje.
- **Blížkost** – poloha je určena známou polohou buňky (Cell Id), nebo Location area. Tato metoda je často používána, přesnost je ale dána velikostí dosahu LA, či buňky.
- **Fingerprinting** – poloha se určuje pomocí výkonových úrovní přijatého signálu od obsluhujícího vysílače a vysílačů sousedních. Tato metoda může být prováděna i v rámci jedné LA.
- **Porovnávací analýza** – tato metoda je často kombinována s metodou předešlou. Proveďte se referenční měření, a přijímač získána data porovná s daty z databáze měření

Výše popsané metody se v praxi kombinují (poslední tři). Vesměs jde o určování polohy z dat, kterými disponuje operátor, či správce sítě (cell Id, LA, vysílací výkony, tabulky referenčních měření, apod.). Přesnost závisí mj. i na hustotě rozmístění vysílacích stanic. V dnešní době umožňuje drtivá většina zařízení i možnost použití GNSS.

7.3.2 Poloha v sítích LTE

Komunikace v sítích LTE probíhá výhradně prostřednictvím IP paketů. Koncové zařízení je bezdrátově propojeno se skupinou vysílačů (označováno u LTE jako e-NodeB). Pro určování polohy je definován kanál downlink (LTE Release 9 [64]). Standard LTE definuje 4 typy přenášených signálů:

1. Synchronizační signály
2. Referenční signály
3. Řídící signály
4. Datové signály

První dva typy signálů v některých případech zařízení „zná“ (jsou v databázi zařízení), proto jsou vhodné k určování polohy. Synchronizační údaje přenášejí mj. i informaci o CELL ID, či LA. Referenční signály přenášejí pomocná data pro synchronizaci a demodulaci signálů. Speciální signál PRS (Positioning Reference Signal) je určen pro zjišťování polohy (vzdálenosti k vysílači) pomocí časových zpoždění.

1. Prvním krokem je nalezení počátku symbolu, které může být provedeno například Van de Beekovým algoritmem [63], který identifikuje redundantní informaci a z ní ochranný interval (cyclic prefix). Tento algoritmus ale vyžaduje kontinuální tok dat, přičemž u LTE vysílá základnová stanice na vyžádání přijímače. Při statickém uživateli (tedy spojení bez Dopplerových jevů), lze použít i průměrování bez toho, aby došlo k degradaci signálů PRS [65].
2. Dalším krokem je nalezení Cell ID obsluhující buňky a s ní spojená synchronizace rámce LTE.
3. Nyní je možné získat časové rozdíly (absolutní, či relativní) ze signálů PRS.

U zjišťování vzdáleností pomocí časových rozdílů je minimální možná chyba způsobená časovým rozlišením na celočíselný počet vzorků.

Minimální chybová vzdálenost, která odpovídá jednomu vzorku, je popsána vztahem (17), kde d_ε je chybová vzdálenost, f_{vz} je vzorkovací kmitočet, a c rychlost šíření vln prostředím, v jednotkách SI.

$$d_\varepsilon = \frac{c}{f_{vz}} \quad (17)$$

Generování signálů LTE je možné například prostřednictvím [66].

7.4 LTE - Shrnutí

Svoji dostupností a parametry jsou signály LTE vhodné pro navigaci s vyšší přesností (desítky metrů). Nejpřesnější metodou je měření vzdáleností (navigace kruhová, či hyperbolická). Získání časových rozdílů z LTE (signálů PRS) je rámcově popsáno v kapitole 7.3. Oproti signálům GNSS má LTE výhody možnosti lepšího plánování pokrytí, a to, že signály neprocházejí na cestě k přijímači ionosférou, kde dochází k degradaci časové informace signálu. Signály LTE jsou i hůře rušitelné, než GNSS, protože obě strany spojení mění dynamicky kmitočty (rušení by tedy muselo být na více kmitočtech). Je definován i sled řídicích signálů, který přesune probíhající komunikaci na jiné kmitočty v případě detekovaného rušení (nebo obecně zhoršení podmínek příjmu) na daném kmitočtu [64]. Díky datům operátora, posílaným v paketech, je velmi obtížné vysílat „falešnou“ komunikaci. K úmyslné sabotáži sítě LTE je tedy třeba kromě rušiček adekvátních výkonů na více kmitočtech i detailní informace o síti. Cíleným znehodnocením signálů lze tedy datový tok sítě LTE sice zpomalit, ale u vyššího pokrytí (vyšší počet vysílačů, zejména v městech), jej úplně utlumit nelze [67]. Mezi systémy Loran, DRM, a LTE, se právě poslední jmenované jeví jako nejperspektivnější možnost pro navigaci na území ČR. V budoucnosti bude proto přistoupeno k realizaci kroků, které byly rámcově popsány v kapitole 7.3.

8 Závěr

Motivací pro využití tzv. „Opportunity signals“ k navigačním účelům jsou některé negativní jevy, ovlivňující šíření signálů GNSS (popsáno v kapitole 5, [44]). Pro přezkoumání možností příjmů těchto signálů byly vyvinuty algoritmy pro program MatLab, spolupracující s přijímačem Ettus N210 (kapitola 3, přílohy 1 a 2). Ze zkoumaných signálů se podařilo zachytit jenom některé. Stav zachycených signálů neumožňoval určení polohy.

Signály Loranu se v současné době vysílají v Evropě ve velmi omezené formě, nedostatečné pro určování polohy. Nepravidelnost současného vysílání v Evropě činí i systém Čajka nepoužitelným k určování polohy. Parametry těchto systémů byly popsány v kapitole 2.

Standard DRM se zpočátku jevil jako vhodný „Opportunity signál“, nicméně v současnosti je jeho vysílání v Evropě buď malým výkonem, nebo nepravidelné. DRM je popsáno v kapitole 4.

Jako nejperspektivnější „Opportunity signal“ se jednoznačně jeví LTE, které je v ČR v současnosti vysíláno v pásmu 800 MHz. V kapitole 7 jsou rámcově popsány kroky, umožňující různé metody navigace v sítích LTE, resp. GSM. Kromě lepších podmínek pro šíření oproti signálům družicové navigace (kapitola 5), mají signály LTE i výhodu přesně plánovatelného pokrytí.

8.1 Směr další činnosti

Na základě měření, popsaných v kapitole 6, bude v budoucnosti při další činnosti přistoupeno k použití signálů LTE pro podporu signálů GNSS v místech jejich problematického pokrytí. V současnosti je již velká část území ČR pokryta LTE na kmitočtu 800MHz [59].

9 Seznam použité literatury

- [1] THE LORAN-C SYSTEM OF NAVIGATION. *Loran-History.info* [online]. Washington, D. C.: U.S. Coast Guard, 1962 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.loran-history.info/Loran-C/Jansky%20%20Bailey%201962.pdf>
- [2] Loran-history.info [online]. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://loran-history.info/>
- [3] Timing Potentials of LORAN-C, R. H. Doherty et al, Proceedings of the IRE, Vol. 49, No. 11, November, 1961
- [4] Hyperbolic navigation. *Loran in Japan* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://www.jproc.ca/hyperbolic/>
- [5] *Matematika.cz - hyperbola* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://www.matematika.cz/hyperbola>
- [6] ŠAFÁŘ, Jan. *Analysis, modelling and mitigation of cross - rate interference in enhanced LORAN*. Praha, 2014. Doctoral Thesis. ČVUT, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce prof. Ing. František Vejražka, CSc.
- [7] Atlantic area Loran-C coverage. In: *Wikimedia* [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/NGA-Atlantic_Loran.png
- [8] DIVIS, Dee Ann. PNT ExCom Backs eLoran as a Step to Full GPS Backup System. *Inside GNSS* [online]. 2015 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://www.insidegnss.com/node/4760>
- [9] Europe Gives Up on eLoran. *The Maritime Executive* [online]. 2016 [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: <http://www.maritime-executive.com/article/europe-gives-up-on-eloran>
- [10] ANTHONY, Sebastian. Our terrifying reliance on GPS, and the need to develop a ground-based alternative. *Extreme Tech* [online]. 2014 [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <https://www.extremetech.com/extreme/193571-our-terrifying-reliance-on-gps-and-the-need-to-develop-a-ground-based-alternative>
- [11] BASS, V, P EFREMOV a S ZARUBIN. *Present Status and Future Developments of the Russian Radionavigation System Chayka and Joint Chayka/Loran-C Radionavigation Chains* [online]. 2008 [cit. 2016-06-15]. Dostupné z: <http://loran.org/Meetings/Meeting008/Papers/Tsarev-Reverse.pdf>
- [12] KÜGLER, DIRK. Integration of GPS and Loran-C / Chayka: A European Perspective. *Navigation*. 1999, 46(1), 1-11. DOI: 10.1002/j.2161-4296.1999.tb02391.x. ISSN 00281522. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/j.2161-4296.1999.tb02391.x>
- [13] Evolution from Loran-C to eLoran. *Research & Radionavigation* [online]. 2010 [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: https://rntfnd.org/wp-content/uploads/evolution_from_loran_c_to_eloran_v11.pdf

- [14] eLoran: Securing Positioning, Navigation and Timing for Europe's Future. *European eLoran Forum* [online]. 2008 [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <https://www.nlb.org.uk/InformationCentre/News/Documents/Securing-Positioning,-Navigation-and-Timing-for-Europe-s-Future/>
- [15] CURRY, Charles. *DELIVERING A NATIONAL TIMESCALE USING eLORAN* [online]. 2014 [cit. 2017-01-22]. Dostupné z: <https://rntfnd.org/wp-content/uploads/Delivering-a-National-Timescale-Using-eLoran-Ver1-0.pdf>
- [16] *Recommendation ITU-R M.589-3 - Technical characteristics of methods of data transmission and interference protection for radionavigation services in the frequency bands between 70 and 130 kHz*. 2011. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.589-3-200108-I!!PDF-E.pdf
- [17] *Specification of the eLoran System: Preliminary, Rev 4.0*. 2009.
- [18] DANEŠ, Josef a kol. *Amatérská radiotechnika a elektronika*. 1. Praha: Naše vojsko, 1984. Dostupné z: http://pr-22.nazory.cz/uschovna/amaterska_radiotechnika_1.pdf
- [19] VAN WILLIGEN, Durk, Cees DEKER a Wim VAN BUUREN. EDLoran: The Next-Gen Loran: Potential GNSS Back-up Improves to GPS-Level Accuracy. *GPS WORLD* [online]. 2014 [cit. 2017-01-22]. Dostupné z: <http://gpsworld.com/edloran-the-next-gen-loran/>
- [20] *Reed-Solomon Codes: An introduction to Reed-Solomon codes: principles, architecture and implementation* [online]. Dostupné z: https://www.cs.cmu.edu/~guyb/realworld/reedsolomon/reed_solomon_codes.html
- [21] Loran-C and eLoran Timing Receiver. *UrsaNav* [online]. [cit. 2017-01-22]. Dostupné z: <http://www.ursanav.com/product/un-152b/>
- [22] ŠEBESTA, Jiří. Elektronická navigace od lodní přes leteckou po GPS – principy, vlastnosti, technické prostředky: Současný stav a výhledy digitálních komunikací. In: *Specializovaný kurs U3V* [online]. 2017 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/U3V/U3V_T11.pdf
- [23] Selecting an RF Daughterboard. *Ettus Research* [online]. [cit. 2016-06-16]. Dostupné z: https://kb.ettus.com/Selecting_an_RF_Daughterboard
- [24] *UBX 40 USRP Daughterboard - Product details* [online]. [cit. 2016-06-16]. Dostupné z: <https://www.ettus.com/product/details/UBX40>
- [25] *USRP Hardware Driver and USRP Manual* [online]. [cit. 2016-06-16]. Dostupné z: http://files.ettus.com/manual/page_usrp2.html#loadWithTheWimagesWonto
- [26] *NI - USRP update* [online]. [cit. 2016-06-16]. Dostupné z: <http://www.ni.com/download/ni-usrp-1.2/3696/en/>

- [27] USRP® Support Package from Communications System Toolbox. *MathWorks* [online]. [cit. 2016-06-16]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/hardware-support/usrp.html>
- [28] *The User Datagram Protocol (UDP)* [online]. [cit. 2016-06-16]. Dostupné z: <http://www.erg.abdn.ac.uk/users/gorry/course/inet-pages/udp.html>
- [29] Common Problems and Fixes. *MathWorks* [online]. [cit. 2016-06-16]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/supportpkg/usrpradio/ug/common-problems-and-fixes.html>
- [30] SAUNDERS, Simon R. a Alejandro. ARAGÓN-ZAVALA. *Antennas and propagation for wireless communication systems*. 2nd ed. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2007. ISBN 978-0-470-84879-1.
- [31] ES 201 980 V4.1.1. *Digital Radio Mondiale (DRM): System Specification*. ETSI, 2014. Dostupné z: http://www.etsi.org/deliver/etsi_es/201900_201999/201980/04.01.01_60/es_201980v040101p.pdf
- [32] MIKULÁŠTÍK, Karel. *Systém pro digitální rozhlasové vysílání DRM+ v kontextu roku 2015* [online]. In: . Pardubice, 2015 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://readgur.com/doc/900533/syst%C3%A9m-pro-digit%C3%A1ln%C3%AD-rozhlasov%C3%A9-vys%C3%ADl%C3%A1n%C3%AD-drm--v-kontextu-..>
- [33] DIGITAL RADIO MONDIALE - minimum receiver requirements. *DRM.org* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.drm.org/uploads/files/DRM_Minimum_Requirements.pdf
- [34] *DRMradio: COFDM* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.drmradio.co.uk/drm_007.htm
- [35] *Digital Radio Mondiale: Úvod do technologie DRM* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://digitalradiomondiale.wz.cz/>
- [36] Avion DRM Digital Radio DRM/AM/FM/M&M. *Amazon.in* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.amazon.in/Avion-DRM-Digital-Radio-AM/dp/B017C0OQ28/ref=pd_sbs_23_1?encoding=UTF8&psc=1&refRID=1FH3V4P4YB61W0TWGM43
- [37] Digital World Traveller DRM Receiver. *РАДИОБЕЩАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://www.radiostation.ru/drm/drm_usb_receiver.pdf
- [38] *Dream AM/DRM Receiver: A software radio for AM and Digital Radio Mondiale (DRM)* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <https://sourceforge.net/projects/drm/>
- [39] NORWAY TO CONSIDER OTHER TECHNOLOGIES INCLUDING DRM FOR MIGRATION TO DIGITAL RADIO BROADCASTING. *DRM.org* [online]. 2016 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.drm.org/norway-to-consider-other-technologies-including-drm-for-migration-to-digital-radio-broadcasting/>

- [40] *Global DRM Transmissions Schedule* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.hfcc.org/drm/>
- [41] 2016 - 17 SCHEDULE FOR DRM. *DRM.org* [online]. [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: <http://www.drm.org/wp-content/uploads/2016/10/BBC-DRM-Schedule-2016-Europe.pdf>
- [42] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [43] *Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure*. Royal Academy of Engineering, 2013. ISBN 19-034-9695-0.
- [44] FORTE, Biagio, Chris COLEMAN, Susan SKONE, et al. Identification of scintillation signatures on GPS signals originating from plasma structures detected with EISCAT incoherent scatter radar along the same line of sight. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2017, **122**(1), 916-931. DOI: 10.1002/2016JA023271. ISSN 21699380. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/2016JA023271>
- [45] *ELEKTRONIKA: Šíření vlnění* [online]. [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: http://elnika.sweb.cz/radia/el_vlny.html
- [46] PECHAČ, Pavel. *Modely šíření vln v zástavbě*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0186-1.
- [47] *RADIO NOISE: Recommendation ITU-R P.372-8*. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-8-200304-S!!PDF-E.pdf
- [48] *Ionosphere_Layers_en.svg*. In: *En.wikipedia.org* [online]. [cit. 2017-01-17]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere#/media/File:Ionosphere_Layers_en.svg
- [49] *ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE OF THE EARTH: Recommendation ITU-R P.527-3*. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-3-199203-I!!PDF-E.pdf
- [50] *WORLD ATLAS OF GROUND CONDUCTIVITIES: Recommendation ITU-R P.832-4*. 2015. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.832-4-201507-I!!PDF-E.pdf
- [51] LORADD series: Integrated GPS/eLoran receiver Installation and operational manual. *Reelektronika: eLoran Receivers LORADD-SP series* [online]. 2009 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: https://www.reelektronika.nl/manuals/reelektronika_LORADD_Manual_v1.2.pdf
- [52] VYUŽITÍ RÁDIOVÉHO SPEKTRA. *Český telekomunikační úřad* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://spektrum.ctu.cz/>
- [53] *Websdr.org* [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://websdr.org/>
- [54] *Audacity®: Free, open source, cross-platform audio software for multi-track recording and editing* [online]. [cit. 2016-09-05]. Dostupné z: <http://www.audacityteam.org/>

- [55] Downloads: LERXANALYSER. *Reelektronika* [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.reelektronika.nl/downloads/downloads/>
- [56] WOUTER JOHAN PELGRUM. *New potential of low-frequency radionavigation in the 21st century*. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 978-908-1119-818.
- [57] Síla signálu DCF Nerja. In: *En.wikipedia.org* [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99%C3%ADjem_sign%C3%A1lu_DCF77#/media/File:S%C3%ADla_signalu_DCF_Nerja.png
- [58] *GNU Radio* [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <https://www.gnuradio.org/>
- [59] Veřejné širokopásmové mobilní sítě LTE: Pokrytí. *Český telekomunikační úřad* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://lte.ctu.cz/rk/>
- [60] *3GPP: The Mobile Broadband Standard* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/>
- [61] SAUTER, Martin. *From GSM to LTE: an introduction to mobile networks and mobile broadband*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011. ISBN 9780470667118.
- [62] *Ace Technologies Corp.: RF Antennas* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: http://offset.gobizkorea.com/blog/en_catalog_view.jsp?blog_id=aceantenna&obj_id=823532&co_lang=2
- [63] VAN DE BEEK, Jan-Jaap. *Synchronization and Channel Estimation in OFDM Systems*. Lulea, Sweden, 1998. Vedoucí práce Professor Per Ola Borjesson.
- [64] *LTE: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 9.1.0 Release 9)*. 2010.
- [65] Positioning Reference Signals (PRS) in LTE. *Http://lteuniversity.com* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: http://lteuniversity.com/get_trained/expert_opinion1/b/nishithtripathi/archive/2010/12/09/positioning-reference-signals-prs-in-lte.aspx
- [66] *LTE Resource grid* [online]. [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: http://niviuk.free.fr/lte_resource_grid.html
- [67] GOMPA, Neal. LTE can be disabled with a \$650 jammer, but not really. *Extreme Tech* [online]. 2012 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <https://www.extremetech.com/electronics/140587-lte-can-be-disabled-with-a-650-jammer-but-not-really>
- [68] The Viterbi Algorithm. *Centre for Intelligent Machines (CIM)* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://www.cim.mcgill.ca/~latorres/Viterbi/va_alg.htm
- [69] ŠAFÁŘ, Jan. *dotaz k bp* [elektronická pošta]. Message to: juraj.recka@fel.cvut.cz. [cit. 2017-15-13].

10 Přílohy

10.1 Seznam příloh

Příloha 1 – skript 1

Příloha 2 – skript 2

Příloha 3 – ukázka z grafického prostředí GNU Radio Companion

10.1.1 Příloha 1 – skript 1

Tento skript stáhne vzorky (z již nakonfigurovaného přijímače) a provede jejich uložení a zobrazení. Změnou žlutě vyznačených parametrů lze modifikovat část spektra, kterou sledujeme (zde od 88 do 108 MHz). Parametr „FrameLength“ (zeleně zvýrazněn) označuje počet hodnot v jednom rámci. Těch je zde 1000.

```
%% Resetování parametrů uzavření oken apod.:
clc; clear all; close all;

%% Nastavení vybraných parametrů přijímače, označeného "hSDRu":

hSDRu = comm.SDRuReceiver('IPAddress','192.168.10.2', ...
    % IP adresa přijímače Ettus N210
    'CenterFrequency', 98e6, ...
    % střední kmitočet
    'DecimationFactor', 5, ...
    % decimační faktor
    'Gain', 0, ...
    % zisk v decibelech
    'FrameLength', 1000, ...
    % délka rámce, tj. počet hodnot na kmitočtové ose po Fourierově
    transformaci
    'OutputDataType', 'double');
% formát výstupních hodnot

%% Příprava matice nul pro zápis hodnot z měření:

v = zeros(1000,100); % 1000 řádků a 100 sloupců

i = 1; % pomocná proměnná pro inkrementaci

%% Cyklus přenosu dat

while(1)
% podmínka je splněná vždy => nekonečná smyčka (ukončení dále jiným
způsobem)
    [x, LEN] = step(hSDRu);
% samotný přenos vzorků z přijímače, dočasné uložení do proměnné
"x"
    if LEN==1000
% překročí-li počet vzorků počet míst ve sloupci, přeskočí zápis
na další sloupec matice
        v(:,i)=x;
% zápis hodnot z proměnné "x" do i-tého sloupce matice
        i=i+1;
% inkrementace proměnné "i" (číslo sloupce)
    end
    if i ==100 % indikace kompletního zaplnění matice daty
        break;
% přerušování cyklu, všechna naměřená data jsou nyní v matici "v"
```

```

    end
end

%% Ukončení relace:

release(hSDRu) % Uvolnění objektu "hSDRu"

%% Zpracování dat:

v=v(:);
% sloupce matice se upraví do sloupcového vektoru

dlmwrite('nezpracované.dat',v,',');
% zápis "syrových" dat do souboru

figure(1); % okno pro vykreslení
plot(20*log10(abs(fftshift(fft(v)))));
% VYKRESLENÍ, předtím: převední osy y na dB, provedení rychlé
Fourierovy transformace, a posunu tak, aby byl zobrazován interval
<0,fs>, kde fs je předvoleně 1 MHz

% Parametry vykreslení:
title('výsledky'); % označení grafu
grid on; % zapnutí mřížky
xlabel('Kmitočet (Hz)6'); % označení osy x
ylabel('Amplituda (dB)'); % označení osy y
xlim([0 1000]); % minimální a maximální hodnoty
na ose x (analogicky lze i pro osu y), většinou lze vynechat

```

⁶ Na kmitočtové ose x budou numerické hodnoty z intervalu $\langle 0, 1000 \rangle$. Fyzikálně odpovídající hodnoty jsou $\langle 98 - \frac{1}{2}(\frac{100}{5}), 98 + \frac{1}{2}(\frac{100}{5}) \rangle$ v MHz, tj. $\langle 88, 108 \rangle$ MHz viz vztah (4).

10.1.2 Příloha 2 – skript 2

Skript 2 vychází do značné míry ze skriptu 1, proto zde nejsou společné části podrobněji popsány. Tento skript provádí průměrování (označeno žlutě), které je vhodné pro časově delší měření, jehož cílem je zachytit dané vysílání. I zde se provádí uložení vzorků. Zobrazení výsledků se obnovuje, dojde-li k níže popsaným podmínkám. Je nutné podotknout, že samotným průměrováním dochází k degradaci časové informace, což znemožňuje dále pracovat se signály, které jsou na stejných kmitočtech a jsou oddělené v čase (Loran). Tyto časové změny můžeme sledovat v aktualizujícím se okně.

```
clc; clear all; close all;

%% Nastavení vybraných parametrů přijímače, označeného "hSDRu":

hSDRu = comm.SDRuReceiver('IPAddress','192.168.10.2', ...
    'CenterFrequency', 98e6, ...
    'DecimationFactor', 5, ...
    'Gain', 0, ...
    'OverrunOutputPort', 1, ...
    'FrameLength', 2000, ...
    'OutputDataType', 'double');

%% Pomocné parametry:

f=figure; % vytvoření okna pro vykreslení AKTUÁLNÍHO
průběhu
i = 1; % pomocná proměnná pro počet SAD vzorků
ii=1; % pomocná proměnná pro počet průběhů
v1=zeros(2000,1); % prázdný sloupcový vektor, do kterého se
budou ukládat jednotlivé průběhy

%% Získávání a zpracování dat:

while(1)
    [x, LEN] = step(hSDRu);
    if LEN==2000 % indikace přijetí jedné sady vzorků
        i=i+1; % inkrementace
    end
    if i ==100 % nastavení vykreslování
        % Číslo 100 určuje, kolik sad vzorků je
        třeba pro jedno vykreslení (snižováním hodnoty bude vykreslování
        méně přesné, ale častější -> rychlejší)

        drawnow; % nastavení okna
        v2=20*log10(abs(fftshift(fft(x))));
        % do proměnné "v2" se uloží AKTUÁLNÍ průběh a převede se na dB
        v1=v1+v2;
        % do proměnné "v1" se sčítá aktuální průběh s předešlými
        plot(v1)
        % vykreslení aktuálního průběhu
```

```

        title(sprintf('Zobrazen prubeh cislo %d', ii))
% očíslování průběhu
        dlmwrite(sprintf('Prubeh_cislo %d.dat', ii),v2,',');
% aktuální průběh se uloží do jednoho souboru s názvem, obsahujícím
číslo průběhu. Průměrování lze pak provádět později s vybranou
sadou soborů. Provádíme-li měření s počte sad například 10 000, je
vhodné tento příkaz vynechat a uložit pouze výsledný průběh

        i=0;                % resetování
        ii=ii+1;           % inkrementace počtu průběhů
    end

%% Program lze ukončit tím, nastavíme například 150 průběhů, po
kterých dojde k ukončení programu a uložení dat. Druhá možnost je,
že uživatel zavře okno, kde se vykreslují průběhy (metody lze
kombinovat - program se ukončí po 150 cyklech, nebo dřív, ukončí-
li jej uživatel zavřením okna).

        if not(ishandle(f)) || ii==150;
% indikace toho, že uživatel zavřel okno, nebo, že bylo již
zobrazeno 150 průběhů ("||" značí operátor logického součtu - OR)

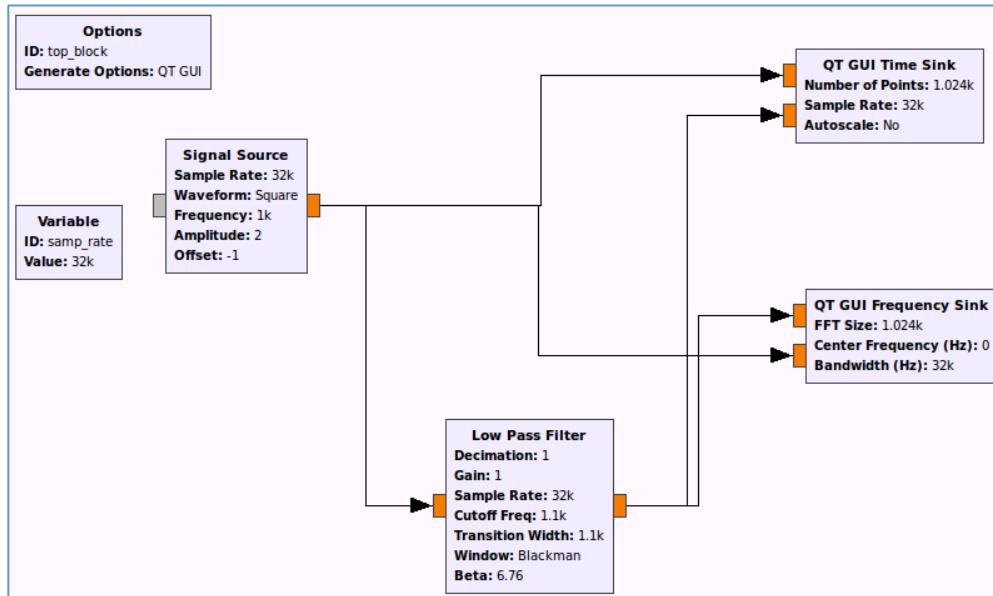
        release(hSDRu);
        close all;
        v1=v1/ii;
% samotné průměřování - podělení nasčítaných průběhů jejich počtem
("normování osy y")

        dlmwrite('vystup',v1,','); % uložení výsledků měření
        break;
    end
end

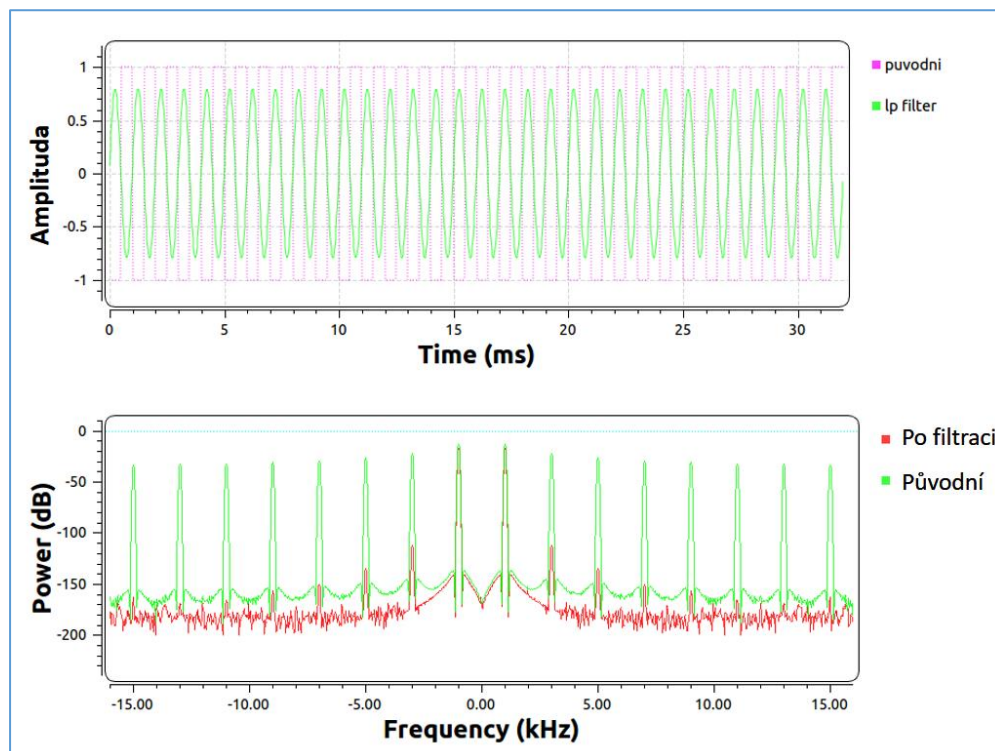
```

10.1.3 Příloha 3 – ukázka z aplikace GNU Radio Companion

Kvůli výpočtové náročnosti, a komplikovanosti instalace a propojení s přijímačem, nebylo toto prostředí nakonec použito pro měření. Na obrázku je ukázka grafického prostředí, ve kterém je vizualizován skript, který filtruje harmonický signál a zobrazuje jej v časové a kmitočtové oblasti.



Obrázek 51: Ukázka grafického prostředí GNU Radio



Obrázek 52: Výsledek provedení skriptu z obrázku 51 – harmonický signál a jeho filtrovaná replika, zobrazené v časové a kmitočtové oblasti