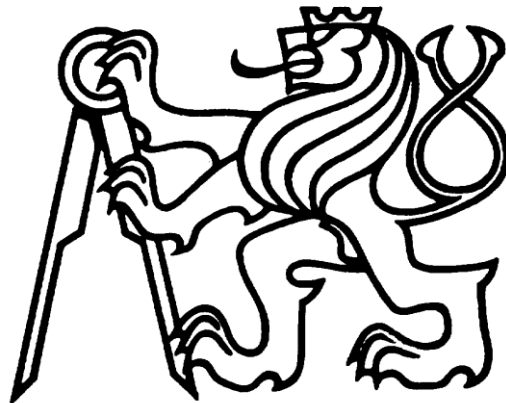


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole



Diplomová práce

Určování polohy s využitím tzv. „Opportunity Signals“

Opportunity Signals procesing for position determination

Autor: Bc. Juraj Rečka

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

2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rečka** Jméno: **Juraj** Osobní číslo: **434964**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Rádiová a optická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Určování polohy s využitím tzv. 'Opportunity Signals'

Název diplomové práce anglicky:

Opportunity Signals processing for position determination

Pokyny pro vypracování:

Stručně se zabývejte metodami určení polohy s využitím zpracování rádiových signálů. Pomiňte signály rádiových navigačních systémů, a všimněte si signálů rádiových systémů, které nejsou pro tento účel určeny, ale jejichž signálů lze k určování polohy využít. Navrhněte a příp. realizujte experimenty, jimiž tuto možnost ověříte. Zpracujte studii v rozsahu do 80 stran, v níž osvětlíte nezbytné teoretické základy těchto metod, popíšete provedené experimenty. Přílohou práce by měly být popisy algoritmů zpracování a příp. výpisy programů v jazyce MatLab, příp. C.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hein, G. a kol.: The digital TV case - Positioning using signals-of-opportunity based on OFDM modulation. Inside GNSS, 2011, 6 (6), pp 54-62.
[2] Nikookar, H.: An Introduction to Radio Locationing with Signals of Opportunity. Journal of Communication, Navigation, Sensing and Services (CONASENSE), 2016, No 1, pp 1 - 10.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **07.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

prof. Ing. František Vejražka, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval sám dle zadání a za použití podkladů, které jsem uvedl v příloženém seznamu v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne *května 2019*

.....
Juraj Rečka

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce prof. Ing. Františku Vejražkovi, Csc za jeho vstřícnost, podporu, odborné vedení a vytvoření vhodných pracovních podmínek.

Za nemalé množství cenných rad, trpělivost a pomoc při řešení dílčích problémů děkuji Ing. Jiřímu Svatoňovi.

Děkuji také Ing. Václavu Navrátilovi za přínosné rady při řešení problému výpočtu polohy.

Děkuji Ing. Petru Svobodovi ze společnosti T-Mobile Czech Republic a.s. za zpřístupnění vybraných informací o sítích LTE.

Poděkování patří mojí rodině a nejbližším za podporu a vytvoření podmínek, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

Abstrakt

Tato práce se zabývá možností určování polohy za použití signálů, které nejsou k tomuto účelu primárně vysílány. Byly vybrány signály mobilních sítí IV. generace. V následujících kapitolách je popsán vývoj těchto sítí a významné systémové aspekty z hlediska jejich použití jako „*signals of opportunity*“. Dále jsou prezentovány výsledky experimentů, proběhnuvších na signálech z certifikovaného generátoru, a na signálech mobilních sítí třech českých operátorů. Algoritmy, vyvinuté za účelem řešení zadání, jsou součástí příloh této práce.

Klíčová slova

LTE, určování polohy rádiovými signály, signals of opportunity, OFDM, TDoA, synchronizace, pilotní symboly, buňkové mobilní sítě, jednofrekvenční síť

Abstract

This diploma thesis deals determining location using signals that are not transmitted for this purpose. Mobile network signals of the IV. generation were chosen. Following chapters describe development of these networks and their relevant parameters from the perspective of using them as signals of opportunity. Experiments results are further presented. These experiments were performed on signals from certified generator and real signals of mobile networks of three czech wireless service providers. Algorithms, developed with the aim of solving the assignment, are enclosed in this diploma thesis.

Keywords

LTE, position determination using radio signals, signals of opportunity, OFDM, TDoA, synchronization, pilot symbols, mobile cellular networks, single frequency network

OBSAH

1 Úvod	3
1.1 Signals of opportunity	3
1.2 Seznam obrázků	4
1.3 Seznam tabulek.....	5
1.4 Význam vybraných pojmů a zkratek.....	6
1.5 Cíl práce	7
2 Vývoj a historie mobilních sítí	8
2.1 První generace	8
2.2 Druhá generace.....	8
2.3 Třetí generace	10
2.4 Čtvrtá generace.....	10
2.5 Pátá generace.....	12
3 Určování polohy v mobilních sítích	12
3.1 Ortogonální kmitočtové dělení.....	15
3.2 Vybrané parametry vysílání	18
3.2.1 Časová hierarchie	19
3.2.2 Kmitočtová hierarchie	21
3.2.3 Zdrojová mřížka	22
3.2.4 Datový tok	22
3.2.5 Signály sestupného směru vysílání.....	23
3.2.6 Fyzické kanály.....	23
3.2.7 Fyzické signály	24
3.2.8 Synchronizační signály.....	24
3.2.9. Primární synchronizační signály	27
3.2.10 Sekundární synchronizační signály	29
3.2.11 Referenční signály.....	31
4 Příjem signálů LTE	33
4.1 Přijímač	33
4.2 Kmitočtová a časová synchronizace.....	35
4.3 Identifikace stanic.....	41
4.4 Problém detekce Cell Id Group	47
4.5 Odhad polohy přijímače	49
4.5.1 Souřadnicové systémy	50
4.5.2 Výpočet polohy	52
4.5.3 Příjem signálů mobilních operátorů	54

5 Shrnutí dosažených výsledků a další vývoj	57
5.1 Chybové aspekty experimentů	57
5.2 Mobilní sítě další generace.....	59
5.3 Dosažené výsledky a další pokračování	62
6 Seznam použité literatury	63
7 Přílohy	66
7.1 Příjem signálu.....	66
7.2 Hlavní program.....	66
7.2.1 Algoritmus hrubé časové synchronizace	66
7.2.2 Algoritmus průměrování	66
7.2.3 Algoritmus průběžného výpočtu funkce $\gamma(m)$	66
7.2.4 Algoritmus detekce počtu zachycených stanic	66
7.2.5 Algoritmus generování indexů	66
7.2.6 Algoritmus výpočtu maximálního indexu	67
7.2.7 Algoritmus odhadu kmitočtového offsetu	67
7.2.8 Algoritmus korekce kmitočtového offsetu	67
7.2.9 Algoritmus doladění časového offsetu.....	67
7.2.10 Algoritmus detekce synchronizačních signálů	67
7.2.11 Algoritmus odhadu Cell Id	67
7.2.12 Algoritmus korelační funkce synchronizačních signálů.....	67
7.2.13 Algoritmus výpočtu hyperbol.....	67
7.2.14 Algoritmus filtrace.....	67
7.2.15 Algoritmus výpočtu jedné hyperboly	67
7.2.16 Algoritmus hledání průsečíků hyperbol	67
7.2.17 Algoritmus transformace souřadnic	67
7.2.18 Algoritmus odhadu polohy	67
7.3 Přehled varovných a chybových hlášek programů	68
7.4 Seznam příloh.....	69

1 Úvod

Znalost polohy (ev. přesného času) je v současnosti základním požadavkem nespočetného množství aplikací nejen každodenní potřeby. Pravděpodobně první datovaný pokus o stanovování polohy pomocí rádiových signálů je pokus Heinricha Hertze z roku 1888, který stanovoval směr příchodu signálu natáčením smyčkové antény (základ pozdějších radiokompasů) [20], [22]. V průběhu první poloviny 20. století a po II. světové válce vznikaly terestriální navigační systémy, jako například britský hyperbolický systém Gee, americký Loran apod. Významným datem bylo vypuštění první umělé družice *Sputnik 1* na oběžnou dráhu Země v roce 1957. Od počátků sedmdesátých let byl Spojenými státy pro vojenské účely vyvíjen navigační systém, stanovující polohu uživatele na základě signálů z družic (GPS). Až do 1. 5. 2000 byly signály GPS dostupné veřejnosti v omezené a méně přesnější formě, tzv. *Selective availability* [37]. Souběžně probíhal vývoj (a zprovožňování) dalších družicových navigačních systémů – BeiDou v Číně, GLONASS v Rusku a Galileo v Evropě.

V budoucnosti lze předpokládat růst počtu požadavků na přesné určení polohy (resp. času). Navzdory různým podpůrným technikám, jako například diferenční GNSS [34] existují určité limity, degradující přesnost GNSS systémů. Mezi ně patří vliv ionosféry, příjem odražených signálů, či slabá výkonová úroveň signálu v místě příjmu. Důsledky jsou mj. relativně snadná zarušitelnost GNSS signálů [35], či značné zvýšení nepřesností v místech s malou viditelností oblohy (například místa s hustou vegetací, či ulice ve městech).

I ze strategického hlediska je vhodné disponovat navigačním systémem, který je z fyzikálního a funkčního hlediska částečně odlišný (například eDLoran). Další řešení je využití tzv. „*signals of opportunity*“.

1.1 Signals of opportunity

Při určování polohy pomocí rádiových signálů lze využít signály, které jsou primárně k tomuto účelu vysílány (výše uvedené systémy GNSS, eLoran, apod.). Druhým přístupem je využití tzv. „*signals of opportunity*“, tedy signálů, které nejsou primárně vysílány za účelem určování polohy, ale některé jejich vlastnosti je k tomu dovolují využít. Příkladem jsou systémy digitální televize DVB-T [4], nebo IV. a ev. i V. generace mobilních sítí (4G, resp. LTE a 5G, resp. NR). Všechny zmiňované systémy používají multiplexní modulaci OFDM¹. Tato práce se zabývá použitím druhého zmiňovaného systému k účelu stanovování polohy.

¹ Z angl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením

1.2 Seznam obrázků

2.2.1: Architektura sítě II. Generace	9
2.3.1: Architektura sítě III. Generace	10
2.4.1: Architektura sítě IV. Generace	11
3.1.1: Grafická ukázka výsledné křivky pro metodu TDoA	13
3.1.2: Ilustrace metody ECID	14
3.1.3: Ilustrace mezisymbolové interference	16
3.1.4: Blokové schéma vysílače OFDM	16
3.1.5: Ilustrace spektra OFDM	16
3.1.6: Obálka výkonového spektra OFDM.....	17
3.1.7: Přehled přidělených kmitočtů pro vysílání LTE.....	17
3.1.8: Příklad vysílání pilotů na daných subnosných.....	18
3.2.1: Časové dělení vysílání	19
3.2.2: Ilustrace vytváření OI	20
3.2.3: Doby trvání symbolů.....	20
3.2.4: Zdrojová mřížka	22
3.2.5: Zdrojová mřížka pro šířku pásma 10 MHz	25
3.2.6: Zdrojová mřížka pro pásmo 10 MHz, výseč z kmitočtové oblasti	25
3.2.7: Tvorba fyzické adresy	26
3.2.8: Možné podoby PSS.....	27
3.2.9: Korelační vlastnosti PSS.....	28
3.2.10: Vliv šumu na autokorelační funkci PSS	28
3.2.11: Konstelace SSS, příklad výstupní sekvence	30
3.2.12: Vliv šumu na autokorelační funkci SSS.....	31
3.2.13: Mapování referenčních signálů	32
4.1.1: Přijímač N210, generátor R & S SMBV100A	33
4.1.2: Ukázka nastavení generovaného signálu	34
4.1.3: Ukázka výkonového spektra signálu operátora O ₂	34
4.2.1: Příklad průběhu funkce $\gamma(m)$	35
4.2.2: Grafická interpretace algoritmu výpočtu funkce $\gamma(m)$	36
4.2.3: Detail jednoho z vrcholů funkce $\gamma(m)$	36
4.2.4: Ukázka dvojice špiček funkce γ	36
4.2.5: Funkce γ , vypočtená z měřeného signálu	38
4.2.6: Data z obrázku 4.2.5 po průměrování.....	38
4.2.7: Výsledná funkce γ	38
4.2.8: Převodní charakteristika detekce hodnoty θ	39
4.2.9: Převodní charakteristika detekce kmitočtového offsetu	39
4.2.10: Příklad konstelace signálu pro jeden symbol.....	40
4.3.1: Sekvence symbolů měřeného signálu	41

4.3.2: Příklad vyhodnocování podmínky detekce BPSK	42
4.3.3: Příklad vyhodnocování podmínky detekce SSS	42
4.3.4: Část analyzovaných symbolů	43
4.3.5: Korelace přijatého PSS.....	44
4.3.6: Korelace přijatého SSS	44
4.3.7: Určení Cell Id	45
4.3.8: Ukázka nastavovaných parametrů vysílání.....	46
4.3.9: Anténa, použita při měření signálů operátorů	46
4.4.1: Vzájemné korelace všech možných průběhů SSS	47
4.4.2: Grafické znázornění algoritmu detekce Cell Id	48
4.5.1: Ukázka hyperboly	49
4.5.2: Odhad polohy přijímače na základě plochy, vymezené průsečíky hyperbol	50
4.5.3: Souřadnicové soustavy XYZ a LLA na referenčním elipsoidu	50
4.5.4: Souřadnicové soustavy XYZ a ENU na referenčním elipsoidu	51
4.5.5: Mapa stanic operátorů T-Mobile a Vodafone (1).....	51
4.5.6: Mapa stanic operátorů T-Mobile a Vodafone (2).....	52
4.5.7: Hyperboly, spočtené na základě měření sítě operátora T-Mobile (1).....	54
4.5.8: Hyperboly, spočtené na základě měření sítě operátora T-Mobile (2).....	54
4.5.9: Hyperboly, spočtené na základě měření sítě operátora Vodafone	55
4.5.10: Tři výsledné odhady polohy přijímače	55
4.5.11: Chyba odhadu polohy	56
5.1.1: Mapa databází mobilních operátorů – ilustrace opakujících se hodnot Cell Id.....	59
5.2.1: Kmitočtová pásma systémů IV. a V. generace	59
5.2.2: Modelování pokrytí sítě buňkami různých velikostí	60
5.2.3: Časový vývoj penetrace sítí IV. generace	61
5.2.4: Podíl zastoupení LTE jako přístupové metody na internet	61
5.2.5: Časový vývoj podílů různých mobilních technologií.....	61

1.3 Seznam tabulek

2.2.1: Vybrané registry sítě GSM	9
3.2.1: Možné doby trvání symbolů	19
3.2.2: Základní parametry LTE pro sestupný směr vysílání.....	21
3.2.3: Základní typy fyzických kanálů	23
3.2.4: Typy referenčních signálů.....	24
4.5.1: Výsledky vybraných experimentů	55

1.4 Význam vybraných pojmů a zkratek

<i>Zkratka</i>	<i>Význam</i>	<i>Zkratka</i>	<i>Význam</i>
<i>3GPP</i>	<i>3rd Generation Partnership Project</i>	<i>LLA</i>	<i>Latitude Longitude Altitude</i>
<i>4G</i>	<i>IV. Generation</i>	<i>LTE</i>	<i>Long Term Evolution</i>
<i>ACK / NACK</i>	<i>ACKnowledgement / Negative ACK</i>	<i>LTE-A</i>	<i>LTE-Adanced</i>
<i>A-GNSS</i>	<i>Assisted GNSS</i>	<i>MBSFN RS</i>	<i>Multicast-Broadcast Single-Frequency Network RS</i>
<i>AoA</i>	<i>Angle of Arrival</i>	<i>MIB</i>	<i>Master Information Block</i>
<i>ARQ</i>	<i>Automatic Repeat Request</i>	<i>MIMO</i>	<i>Multiple-input multiple-output</i>
β_{PAPR}	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>	N_{fft}	<i>N point FFT</i>
<i>Cell Id</i>	<i>Cell Identity</i>	<i>NR</i>	<i>NewRadio</i>
<i>CRS</i>	<i>Cell – specific Reference Signal</i>	<i>OFDM</i>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<i>CSI RS</i>	<i>Channel State Information RS</i>	<i>OFDMA</i>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
Δf	<i>(OFDM) Subcarrier spacing</i>	<i>GI / CP</i>	<i>Guard Interval / Cyclic Prefix</i>
<i>D2D</i>	<i>Device-to-device (communication)</i>	<i>PBCH</i>	<i>Physical Broadcast Channel</i>
<i>DAC</i>	<i>Digital-to-Analog Converter</i>	<i>PCFICH</i>	<i>Physical Control Format Indication Channel</i>
<i>E911</i>	<i>Enhanced 911</i>	<i>PDSCH</i>	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
<i>ECEF</i>	<i>Earth-Centered, Earth-Fixed</i>	<i>PHICH</i>	<i>Physical HARQ Indicator Channel</i>
<i>ECID</i>	<i>Enhanced Cell Id</i>	<i>PRS</i>	<i>Positioning Reference Signal</i>
<i>eDLoran</i>	<i>enhanced Differential Loran (Long Range Navigation)</i>	<i>PSS</i>	<i>Primary Synchronization Signal</i>
<i>eNB</i>	<i>enhanced Node B</i>	<i>QAM</i>	<i>Quadrature amplitude modulation</i>
<i>ENU</i>	<i>East North Up</i>	<i>QoS</i>	<i>Quality of Service</i>
<i>(E)PDCCH</i>	<i>(Enhanced) Physical Downlink Control Channel</i>	<i>RACH</i>	<i>Random-Access Channel</i>
<i>ETSI</i>	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>	<i>RTT</i>	<i>Round-Trip Time</i>
f_{cfo}	<i>Carrier Frequency Offset</i>	<i>S/P</i>	<i>Serial / Parallel</i>
f_s	<i>Sampling frequency</i>	<i>SC-FDMA</i>	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>

Zkratka	Význam	Zkratka	Význam
<i>GLONASS</i>	<i>ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система</i>	<i>SS</i>	<i>Synchronization Signal</i>
<i>GNSS</i>	<i>Global Navigation Satellite System</i>	<i>SSS</i>	<i>Secondary Synchronization Signal</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>	<i>T</i>	<i>Sampling period</i>
<i>HARQ</i>	<i>Hybrid ARQ</i>	<i>TDoA</i>	<i>Time Difference of Arrival</i>
<i>ICI</i>	<i>Intercarrier Interference</i>	<i>ToA</i>	<i>Time of Arrival</i>
<i>I(FFT)</i>	<i>(Inverse) Fast Fourier Transform</i>	<i>UE</i>	<i>User Equipment</i>
<i>ITU</i>	<i>International Telecommunication Union</i>	<i>VoLTE</i>	<i>Voice over LTE</i>
<i>LA</i>	<i>Location Area</i>	<i>WGS 84</i>	<i>World Geodetic System 1984</i>

1.5 Cíl práce

Cílem práce je prozkoumat možnosti využití signálů mobilních sítí IV. Generace (LTE) jako „signals of opportunity“. V dalších kapitolách je popsán vývoj LTE, významné systémové aspekty z hlediska určování polohy a analýza výsledků experimentů.

Popis programů, vyvinutých k řešení zadání je v kapitole 7.2, programy jsou součástí příloh.

2 Vývoj a historie mobilních sítí

System LTE (*Long Term Evolution*) je standardem datového přenosu v mobilních sítích. Jde o IV. generaci mobilních sítí. Následuje stručný popis vývoje mobilních sítí a standardizace systému LTE.

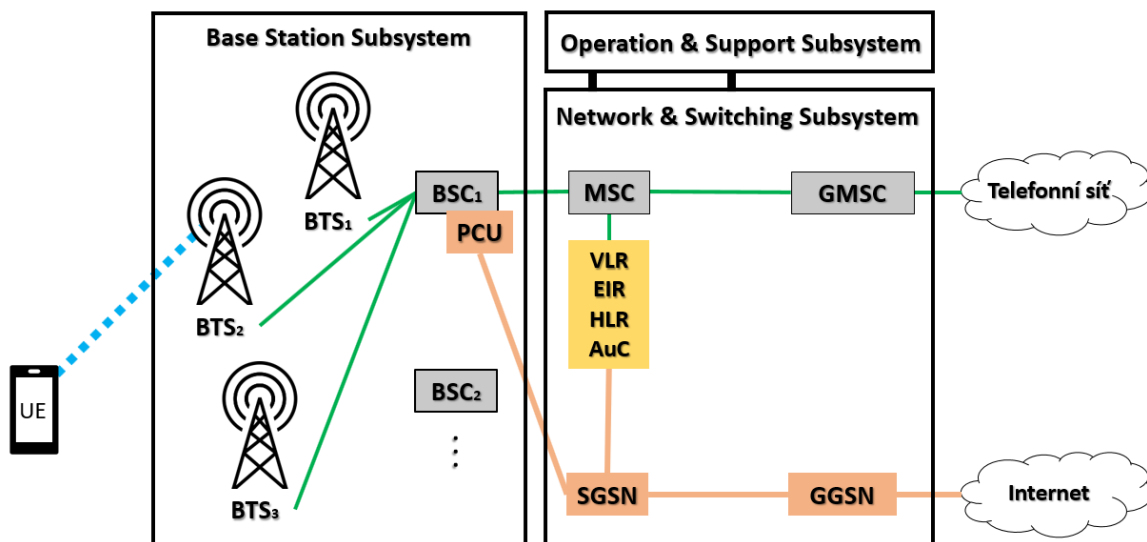
2.1 První generace

První, tehdy analogové mobilní systémy začaly vznikat již v 80. letech minulého století, avšak hlavně z důvodů vysokých pořizovacích a provozních nákladů dosáhly jen malého rozšíření. Bylo definováno více standardů (*Advance Mobile Telephone System* (AMPS) ve Spojených státech, *Total Access Communication System* (TACS) ve Velké Británii, *Nordic Mobile Telephone* (NMT), a *Radiocom* ve Francii, jež jsou souhrnně označovány 1G – sítě první generace

2.2 Druhá generace

U sítí druhé generace byla v roce 1992 zavedena digitalizace přenosu, a tedy i nové standardy, které po mezinárodním sjednocení umožnily spolu s vývojem levnějších uživatelských zařízení výrazné rozšíření těchto sítí. Vývoj probíhal pod záštitou organizace ETSI (*European Telecommunications Standards Institute* [1], [2]). Pro přenos hlasu a dat jsou používány přístupové metody kmitočtového, časového, či kódového dělení. Buňkové mobilní sítě druhé generace (GSM – *Global System for Mobile communications*) byly následně uzpůsobeny pro přenos dat. GPRS (*General Packet Radio Service*) zavádí do architektury GSM sítě nové prvky pro kontrolu transportu paketů. Standard GPRS bývá někdy označován jako síť 2,5. generace. Dalším stupněm vývoje bylo navýšení přenosové rychlosti za použití nových typů modulací a kódování – EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*). Oproti GSM, které používá modulaci GMSK, standard EDGE používá i modulaci 8PSK. (označováno i jako síť 2,75. generace). První vysílání GSM v Evropě počítalo s kmitočtovým pásmem 25 MHz pro uplink (890 – 915 MHz) i downlink (935 – 960 MHz), souhrnně označováno, jako pásmo 900 MHz. Rozšíření sítí druhé generace si vyžádalo potřebu přidávat další kmitočtová pásma, a to v okolí 1800 MHz. Pásmo bylo rozšířeno na 75 MHz (uplink i downlink). Mimo Evropu se mohou alokovaná pásma mírně lišit, například 850 a 1900 MHz ve Spojených Státech.

Sítě III. A IV. generace přebírají vybrané prvky architektury sítě GSM, které je znázorněna na obrázku 2.2.1.



Obrázek 2.2.1: Vybrané prvky architektury sítě II. generace

Síť se skládá z následujících částí:

1. *Base Station Subsystem*, který obsahuje základnové stanice (*Base Transceiver Station* – BTS), a *Base station controller* (BSC), kterých úlohou je navázat, udržovat, a ukončit spojení.
2. *Operation & Support Subsystem* je řídicí centrum sítě.
3. *Network & Switching Subsystem* je propojovací středisko sítě. *Mobile Switching Center* (MSC) a *Gateway MSC* (GMSC) představují spínací centrum a rozhraní mezi NSS a telefonní sítí. Žluté pole obsahuje registry. Jejich význam je shrnut v tabulce 2.2.1.

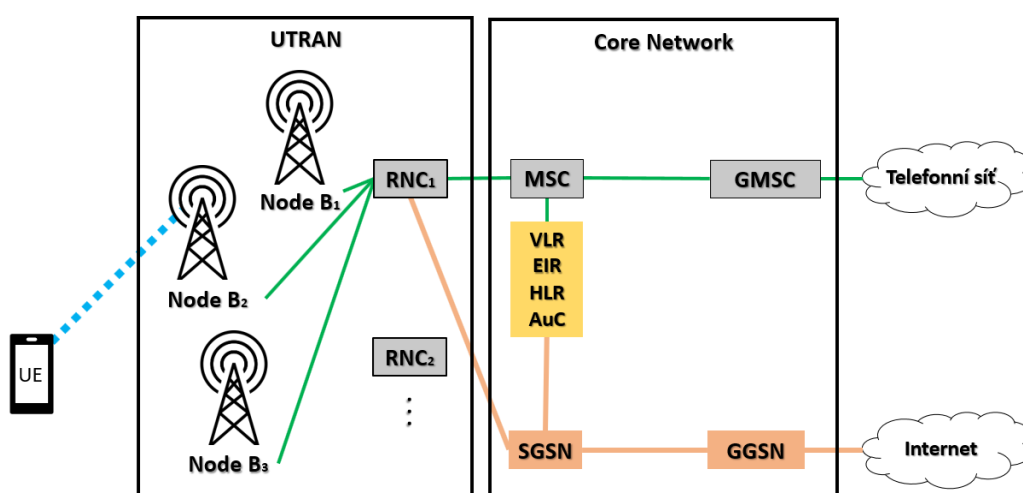
Tabulka 2.2.1: Vybrané registry sítě GSM:

Zkratka	Význam zkratky	Účel daného registru v síti
VLR	<i>Visitor Location Register</i>	Dočasné informace o relacích (poslední poloha)
EIR	<i>Equipment Identity Register</i>	Seznam UE a jejich stav
HLR	<i>Home Location register</i>	Podrobné informace o uživateli a službách
AuC	<i>Authentication Center</i>	Ověřovací centrum pro připojení do sítě

Na obrázku 2.2.1 jsou oranžově vyznačeny prvky sítě, určené k přenosu paketů (rozdíl mezi GSM a GPRS). *Packet Control Unit* (PCU) je součástí BSC, mající na starost datovou komunikaci. *Serving GPRS Support Node* (SGSN) a *Gateway GPRS Support Node* (GGSN) obstarávají trasování paketů a rozhraní s vnější sítí.

2.3 Třetí generace

Sítě třetí generace byly vyvíjeny pod záštitou 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*, založeno v roce 1998). Tato organizace vznikla sloučením organizací, definujících standardy buňkových sítí (ETSI pro Evropu, ATIS pro Spojené státy americké). V současnosti se tato organizace zabývá definováním standardů pro sítě další (IV., resp. V.) generace. 3GPP vydává závazné dokumenty, tzv. *Releasy*, které definují, ev. doplňují jednotlivé standardy. Sítě třetí generace umožňují mj. vícero časově souběžných rádiových spojení jednoho uživatele (zařízení). Odlišné požadavky na kvalitu služeb (přenos hlasu, přenos dat, streaming apod.) jsou zohledněny příznakem QoS (*Quality of Service*). Architektura sítí třetí generace vznikla optimalizací architektury sítí druhé generace, viz obrázek 2.3.1.

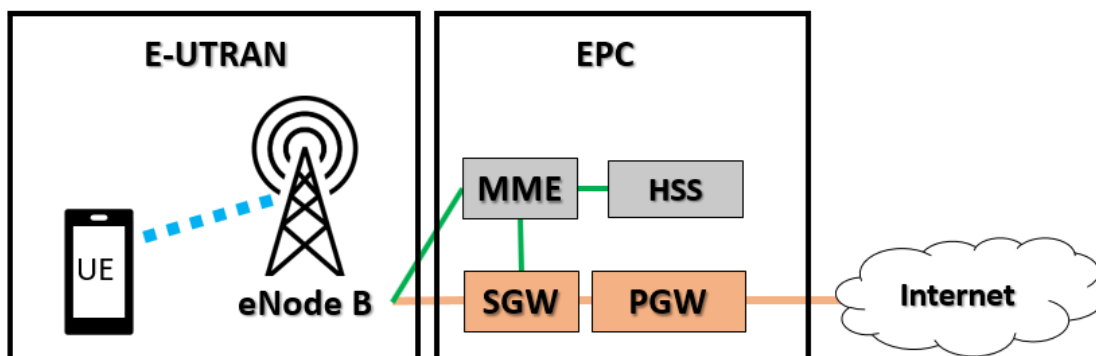


Obrázek 2.3.1: Architektura sítě III. Generace

UTRAN představuje radiové rozhraní sítě (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*, kde UMTS označuje *Universal Mobile Telecommunication System*). Kontrolu rádiového přenosu mají na starosti Node B (výkonová regulace, handover atd.), a RNC (*Radio Network Controller*), který provádí řízení sítě. Ostatní prvky jádra sítě (*Core Network*) mají podobnou funkci, jako u sítí druhé generace, mj. i pro zajištění zpětné kompatibility [4].

2.4 Čtvrtá generace

Požadavky na sítě 4. generace jsou definovány ITU (*International Telecommunication Union*), která mj. rozhoduje o využití kmitočtového spektra. Konkrétní technická řešení přináší 3GPP, které v roce 2008 definovalo *Release* 8 nový standard – LTE (*Long Term Evolution*). Z formálního hlediska jde ještě o síť 3. generace. Až LTE-A (*Advanced*), definované *Release* 10 v roce 2011 naplňuje kritéria sítí IV. Generace [13]. Tyto požadavky jsou mj. jednotný přenos hlasu i dat pomocí paketů minimální rychlostí 300 Mbit/s pro downlink, a 75 Mbit/s pro uplink, udržení spojení do rychlosti 350 km/h, a další. Architektura sítě IV. generace (LTE-A) je na obrázku 2.4.1.



Obrázek 2.4.1: Architektura sítě IV. Generace

Oproti sítím předešlé generace používá LTE metodu násobného přístupu na vzájemně ortogonálních kmitočtech (OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*, platí pro sestupný směr (*downlink*), pro vzestupný směr (*uplink*) je použito SC-FDMA (*SubCarrier*)). Architektura je proti předešlým generacím zjednodušená, a to z důvodu jednotného (datového) přenosu všech služeb [3].

1. Přístupová část sítě bývá označována E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*). Zahrnuje eNode B (*enhanced Node B – eNB*) a veškerá uživatelská zařízení UE (*User Equipment*). eNB představuje analogii k BSC, resp. RNC v sítích předešlých generací.
2. EPC (*Evolved Packet Core*) je řídicí jádro sítě, obsahující HSS (*Home Subscriber Server*), MME (*Mobility Management Entity*), SGW (*Serving Gateway*), a PGW (*Packet Data Network Gateway*).

Síť je řízená MME. HSS obsahuje veškeré informace o uživateli, službách, klíč operátora apod. Úlohou SGW a PGW je přenos dat mezi E-UTRAN a vnější sítí. SGW zajišťuje směrování paketů, PGW propojuje EPC s vnější sítí (správa IP adres).

Zpětná kompatibilita se sítěmi II. a III. generace je zajištěná tzv. VoLTE (*Voice over LTE*), který umožňuje mj. i handover ze sítě LTE na síť II. a III. generace. Zatímco v roce 2010 bylo v komerčním provozu 7 sítí v 6 státech, v roce 2014 to bylo 274 sítí ve 101 státech [3] (viz také obrázky na straně 61).

Na obrázku 2.4.1 ještě nejsou znázorněny tzv. „*relay nodes*“, tedy přeposílací stanice. Ty jsou v architektuře sítě LTE vnímány jako součást dané eNB (adresa v rámci sítě atd.), sloužící k vylepšení, resp. rozšíření pokrytí buňky.

2.5 Pátá generace

Sítě V. generace počítají s vysokou integrací „internetu věcí“ (*Internet of Things*), tedy přenosem dat mezi různými zařízeními (senzory, kamery, vozidla atd.) bez prostřednictví základnových stanic. V budoucnosti je předpokládán velký nárůst počtu zařízení s menšími nároky na objem přenesených dat, což povede k nutnosti zhuštění počtu stanic, zmenšení jejich dosahu, zvýšení počtu nosných kmitočtů, či integraci s *Wi-Fi*. Dále je počítáno s využitím technologie MIMO (větší počet přijímacích a vysílacích antén) a D2D komunikace (komunikace typu zařízení → zařízení, eNB ve vybraných případech pouze alokuje část spektra, a zařízení pak již komunikují mezi sebou bez prostřednictví eNB).

Plánovaný harmonogram spouštění těchto sítí lze nalézt např. v [14]. Sítě V. generace budou částečně využívat prvky z LTE a tzv. NR standard (*New Radio*). První standardizace NR byla vydána koncem roku 2018, významné rozdíly oproti předchozí generaci, implementace a další vývoj jsou popsány v kapitole 5.2.

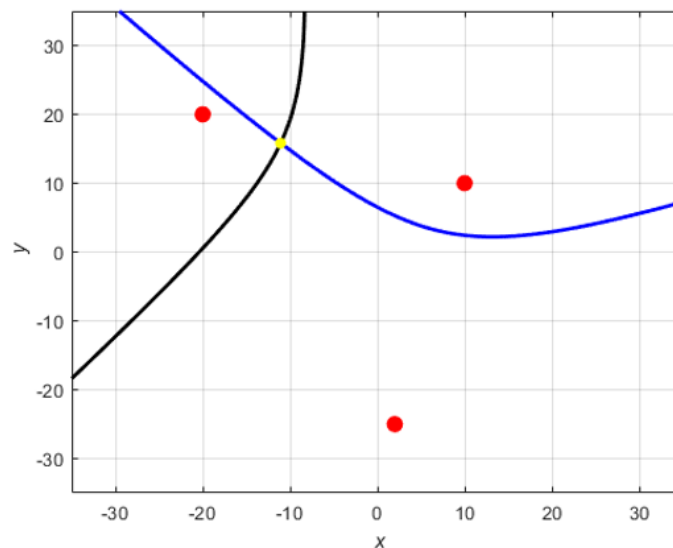
3 Určování polohy v mobilních sítích

Různé metody určování polohy zařízení v mobilních sítích se liší jak metodikou, tak mírou spolupráce zařízení se sítí (zda je zařízení sítí identifikováno jako oprávněný uživatel, míra informací o sítí, kterou zařízení disponuje, sada referenčních měření apod.). Výpočet samotné polohy na základě měřených dat je prováděn buď samotným zařízením (v kombinaci s vybranými znalostmi o sítí), nebo sítí (která pak odešle výslednou polohu do zařízení).

V dalších kapitolách bude prozkoumán přístup „*signals of opportunity*“ (tedy nevysílající zařízení, které disponuje minimálním množstvím informací o sítí). Metody určování polohy mohou být následující:

- Měření časů (vzdáleností) – poloha je výsledkem průsečíků geometrických útvarů (kružnic, či hyperbol). 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, informace o jejich poloze a alespoň částečná znalost vysílaných signálů (piloty, referenční, synchronizační signály apod., viz kapitola 3.1).

- Měření úhlu příchodu signálu (AoA). Tato metoda vyžaduje zachycení alespoň jedné dvojice vysílačů a znalost konstelace jejich antén přijímačem. Úhel je stanoven na základě rozdílu fází přijatých signálů z prvků anténní řady. Vícecestné šíření signálů (například v zástavbě) tuto metodu proti ostatním značně znevýhodňuje.
- Blížkost (*proximity*) – poloha je určena známou polohou buňky (*Cell Id*), nebo *Location area*. Tato metoda je často používána, přesnost je ale dána velikostí buňky (stovky metrů). Některé sítě umožňují v případě nouzového hovoru automaticky stanovit polohu na základě této metody a výsledek odeslat operátorovi tísňové linky² [36].
- *Fingerprinting* – poloha se určuje pomocí výkonových úrovní přijatého signálu od obsluhujícího vysílače a vysílačů sousedních.
- Srovnávací analýza – tato metoda je často kombinována s předešlou metodou. Po provedení, ideálně většího počtu referenčních měření, přijímač porovná aktuálně naměřená data s databází. Pokud je v daném čase dostupná i „jiná“ poloha, či údaj z přesnějšího měření (asistované GNSS, barometrická výška, *Cell Id* apod.), můžou samotní uživatelé přispívat k zpřesnění referenční databáze [9].



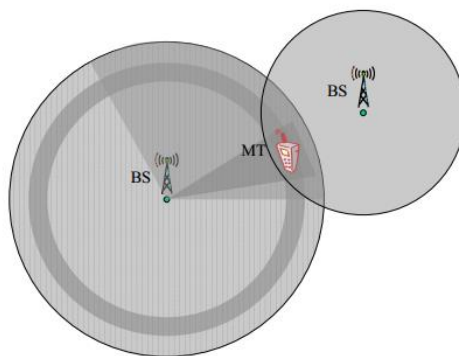
Obrázek 3.1.1: Grafická ukázka metody TDoA. Souřadnice vysílačů jsou $[-20, 20]$, $[-10, 10]$ a $[2, -25]$, dráhové rozdíly jsou (dle pořadí souřadnic vysílačů) -12 (jednotek vzdálenosti) mezi vysílači 1 a 2, a 21 mezi vysílači 2 a 3. Na základě těchto údajů byly vykresleny hyperboly, splňující podmínku konstantního rozdílu vzdáleností. Jejich průsečík, a tedy poloha uživatele se v tomto případě nachází na souřadnicích $[-11, 15]$.

V případě zařízení, které má přístup k síti (figurující v registrech EIR, HLR) se mohou poslední tři popsané metody kombinovat. V takovém případě koncové zařízení (mobilní telefon) odešle naměřená data do sítě, která provede odhad polohy a výsledek odešle zpět do zařízení (sít' disponuje seznamem *Cell Id* a fyzické polohy stanic, vysílacími výkony, tabulkami referenčních měření apod.).

² tzv. E911 (*Enhanced*)

Přesnost určení polohy závisí v takovém případě mj. i na hustotě stanic. V sítích LTE jsou definovány³ 3 způsoby určování polohy UE (připojeného uživatele):

1. Asistované GNSS (A-GNSS) – tato metoda umožňuje stanovit pozici UE i v případě menšího počtu „viditelných“ družic, než 4, ev. zpřesnit již vypočtenou polohu. V případě, že síť tuto metodu podporuje, je možné na základě požadavku odeslat do UE zpřesňující informace (například GNSS korekce).
2. TDoA – v případě podpory této funkce sítí a dostatečné hustoty eNB je na základě požadavku zařízení (UE) zapnuto vysílání PRS (viz kapitola 3.2.5). UE odešle eNB změřené časové rozdíly a síť na základě svých informací stanoví polohu UE, kterou mu následně odešle.
3. *Enhanced Cell Id* (ECID) – jde o metodu kombinující *fingerprinting*, AoA a měření zpoždění⁴ signálu obsluhující eNB.



Obrázek 3.1.2: Ukázka metody ECID, převzato z [46]

Ani jedna z metod 1., 2. a 3. nesplňuje kritéria definice „*signals of opportunity*“, protože je předpokládána autentifikace zařízení a jeho interakce se sítí (UE s platnou SIM, které vysílá ve vzestupném směru).

Vzhledem k stanovenému cíli určování polohy přístupem „*signals of opportunity*“ jsou nejpodstatnější ty parametry sítí LTE, které jsou průřezově pevně dány pro vysílání sítí různých operátorů v sestupném směru (*downlink*, komunikace síť → uživatel). Z výše uvedených metod určování polohy se pro tento přístup jako nejvhodnější jeví metoda TDoA – metoda časových rozdílů. Při této metodě se na straně přijímače stanoví časový rozdíl dorazivších signálů z dvojice vysílačů, který odpovídá dráhovému rozdílu tras obou vysílačů a přijímače. Křivka, znázorňující množinu všech bodů, splňujících tuto podmínku, je hyperbola⁵. V ideálním případě tedy k stanovení polohy stačí 3 vysílače, které utvoří alespoň 2 dvojice. Hledaná poloha uživatele se nachází v průsečíku hyperbol.

³ Od *Release 9* byly definovány metody, které kombinují metody 1., 2. a 3., jde o tzv. „hybridní metody“ (*Adaptive Cell Id* apod, viz [46])

⁴ označováno jako RTT – Round Trip Time

⁵ Přesněji jedna její křivka, a to za předpokladu znalosti nejen samotného časového rozdílu, ale i identifikace jednotlivých vysílačů, resp. pořadí jejich zachycení na přijímači, které svým znaménkem určuje jednu z dvojice křivek.

3.1 Ortogonální kmitočtové dělení

System LTE využívá vysílání OFDM s diskretními subnosnými [8], umožňující implementaci vysílače a přijímače pomocí inverzní a přímé Fourierovy transformace FFT (*Fast Fourier Transform*). Rádiovým kanálem jsou přenášena data na subnosných, které jsou z hlediska energie vzájemně ortogonální. Výstupní signál $s(t)$ lze popsat jako funkci času vztahem (3.1.1), kde N je počet subnosných (počet bodů inverzní Fourierovy transformace IFFT), a_k jsou vstupní data, Δf odstup subnosných (obrázek 3.1.5) a T je vzorkovací perioda. Po dosažení $t=nT$ a $\Delta f = NT^{-1}$ (diskretizace) do vztahu (3.1.1) lze upravit vztahy (3.1.2), (3.1.3) a (3.1.4).

$$s(t) = \sum_{k=0}^{k=N-1} a_k e^{j 2\pi k \Delta f t} \quad t \in \langle 0; T(N-1) \rangle \quad (3.1.1)$$

$$s(nT) = \sum_{k=0}^{k=N-1} a_k e^{j 2\pi k NT^{-1} nT} \quad nT \in \langle 0; T(N-1) \rangle \quad (3.1.2)$$

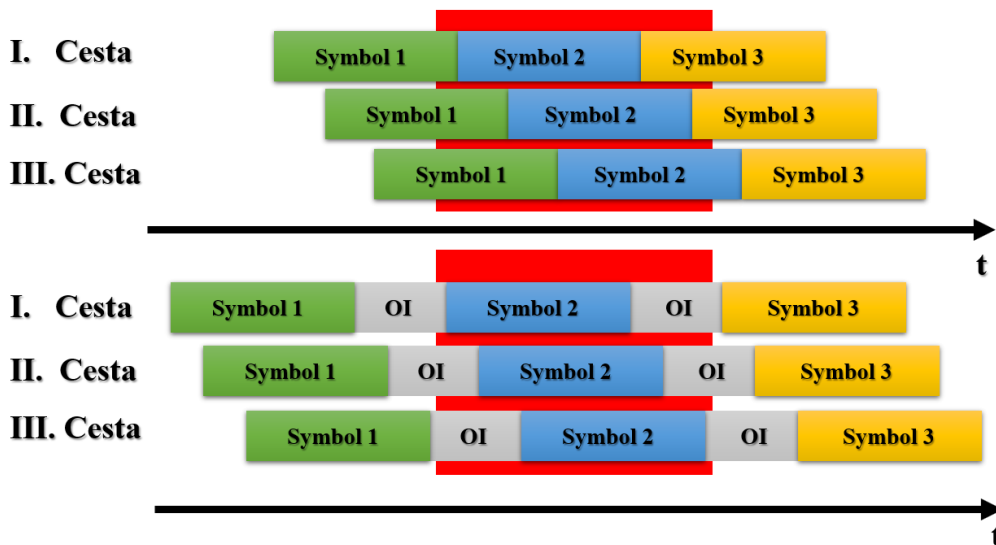
$$s(nT) = \sum_{k=0}^{k=N-1} a_k e^{j 2\pi k N^{-1} n} \quad nT \in \langle 0; T(N-1) \rangle \quad (3.1.3)$$

$$s(n) = N \left[\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} a_k e^{j 2\pi k N^{-1} n} \right] \quad n \in \langle 0; T(N-1) \rangle \quad (3.1.4)$$

Obsah závorky ve vztahu (3.1.4) je vztahem udávajícím inverzní Fourierovu transformaci. V reálném prostředí nastává fenomén vícecestného šíření, který na straně přijímače způsobuje mezisymbolovou interferenci. Příčinou je nestejná délka různých cest (způsobená mj. odrazy signálu) a tedy i nestejně časové zpoždění. Přijímaný signál je dán superpozicí těchto dílčích příspěvků.

Mezisymbolovou interferenci lze omezit zavedením ochranného intervalu (OI, GI – *Guard Interval*, nebo CP – *Cyclic Prefix*). Jeho délka udává maximální možné zpoždění způsobené vícecestným šířením bez vzniku mezisymbolové interference. Důvod zavádění OI je znázorněn na obrázku 3.1.3.

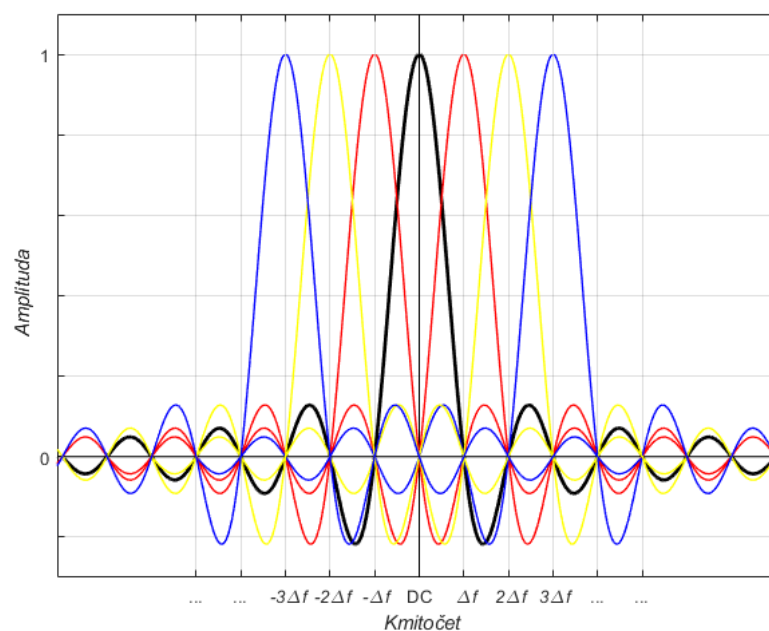
V LTE, resp. v OFDM systémech obecně bývá ochranný interval nejčastěji tvořen zkopírováním části symbolu a jejím opětovným vysláním, viz obrázek (3.2.2). Na obrázku 3.1.4 je znázorněno principiální blokové schéma tvorby signálu OFDM, na obrázku 3.1.5 je OFDM ilustrováno ve spektrální oblasti (odstup subnosných Δf), a na obrázku 3.1.6 je příklad obálky výkonového spektra.



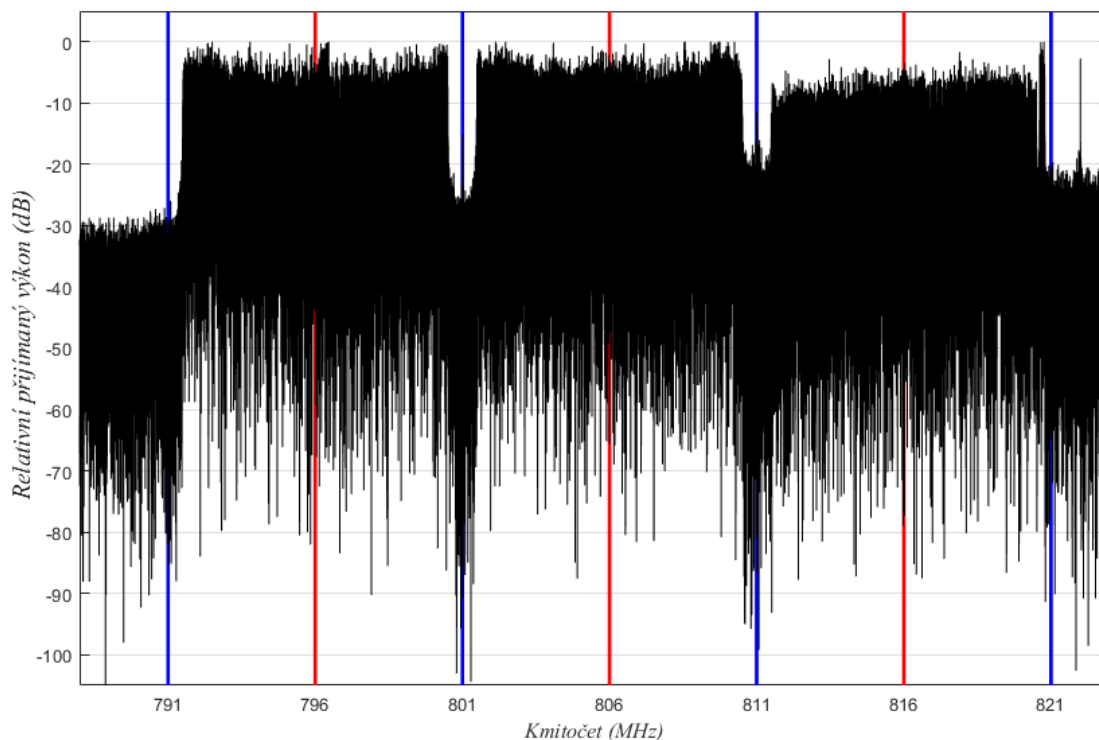
Obrázek 3.1.3: Ilustrace mezisymbolové interference (vrchní část), a její odstranění zavedením ochranného intervalu. Červeně je znázorněna analyzovaná oblast přijímaného signálu.



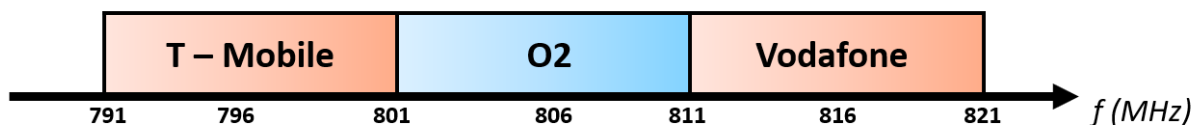
Obrázek 3.1.4: Blokové schéma vysílače OFDM (bloky S/P, resp. P/S označují sériově paralelní převody, DAC číslicově analogový převodník, a f nosný kmitočet)



Obrázek 3.1.5: Ilustrace spektra OFDM pro 6 subnosných, vzdálených od stejnosměrné složky celočíselné násobky Δf



Obrázek 3.1.6: Obálka výkonového spektra OFDM LTE signálu třech Českých operátorů, svisle jsou vyznačeny střední kmitočty a hranice alokovaných spekter (šířka 10 MHz)



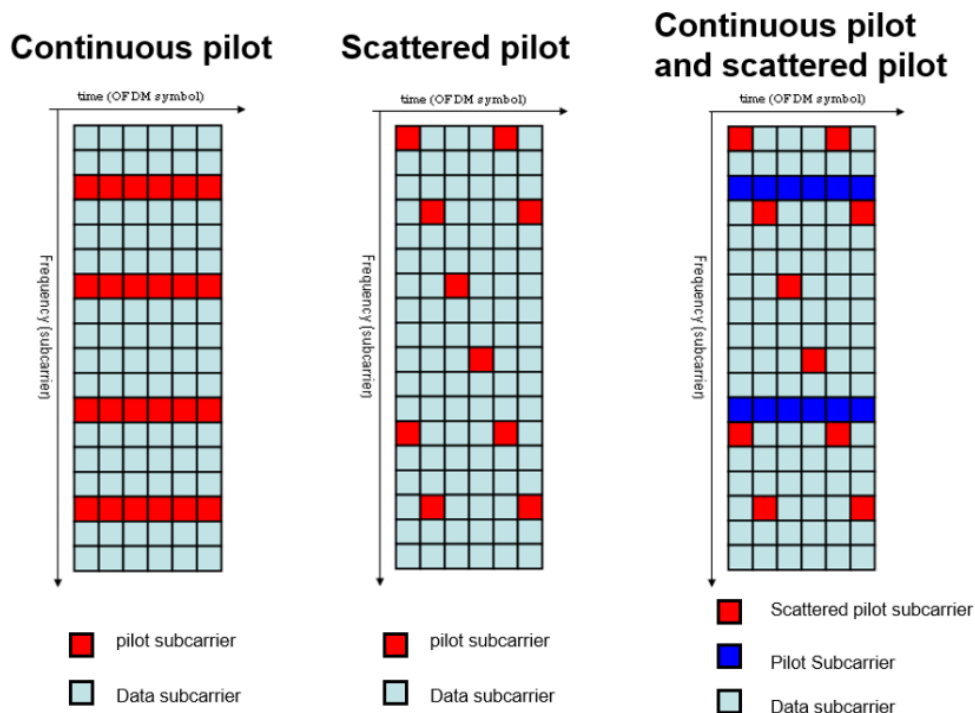
Obrázek 3.1.7: Přehled přidělených kmitočtů pro vysílání LTE v sestupném směru v pásmu 20 [11]

Mezi výhody systémů OFDM patří možnost vytváření dalších přístupových metod, jakou je například SC-FDMA⁶. Další výhodou je kromě již zmiňovaného způsobu eliminace problému vícecestného šíření možnost modulovat data na každé subnosné jinou modulací (blok „*Mapování symbolů*“ na obrázku 3.1.4). Těto vlastnosti je využito při zavádění tzv. pilotů. Implementace přijímače je inverzní k vysílači na obrázku 3.1.4 (za použití dopřední Fourierovy transformace algoritmem FFT). Mezi nevýhody OFDM patří citlivost na vzájemnou interferenci jednotlivých subnosných. Tato situace může například nastat jako důsledek Dopplerova jevu. Z toho vyplývají zvýšené nároky na přesnost kmitočtové a časové synchronizace, sloužící k zamezení nežádoucích jevů plynoucích z fázového (kmitočtového) ofsetu kanálu. Vzhledem k velkým fluktuacím výkonové obálky spektra⁷ může docházet k nelineárnímu zkreslení, kterého následkem je destrukce vzájemné ortogonality subnosných a nežádoucí vyzářování do sousedních pásem. To lze eliminovat použitím vhodných lineárních zesilovačů na straně vysílače.

⁶ Vzhledem k vyššímu činiteli zvlnění obálky spektra je pro uplink preferováno SC-FDMA, kdy mobilní zařízení vysílá pouze v části pásma, co zaručuje příznivější energetickou bilanci (a ze stejných důvodů bývá uplink na nižších kmitočtech, než downlink).

⁷ Činitel β_{PAPR} - Peak to Average Power Ratio

Za účelem stanovení parametrů přenosového kanálu jsou do signálu vkládány tzv. piloty. Jde o signály, kterých parametry jsou přijímači předem známy. Tyto parametry jsou (v ideálním případě) přesná podoba signálu a informace o časové a kmitočtové lokalizaci (s jakou časovou periodou a na kterých subnosných je signál vysílán). Přijímač je pak za použití pilotních symbolů schopen odhadnout kmitočtovou charakteristiku přenosového kanálu. Na základě interpolace těchto odhadů je pak provedena příslušná korekce přijatého signálu. Různé systémy, využívající OFDM (DVB-T, LTE, DRM, DAB...) mají zavedeny různé podoby (a různé množství) pilotních signálů. Tyto signály ale zároveň snižují přenosovou kapacitu kanálu (protože „zabírají“ místo jiným datům).



Obrázek 3.1.8: Příklad vysílání pilotů na daných subnosných kontinuálně v čase („Continuous pilot“), vysílání pilotů, rozprostřených („Scattered pilot“) a kombinace obou metod. Převzato z [38].

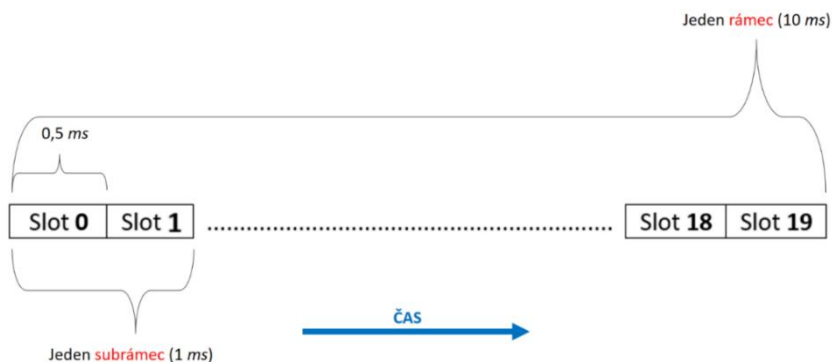
3.2 Vybrané parametry vysílání

Přístup „signals of opportunity“ omezuje použitelné signály vysílání eNB LTE na ty, které jsou mobilními zařízeními používány v případě tzv. RACH (*Random Acces Channel Procedure*). Tato procedura zahrnuje vzájemnou výměnu zpráv mezi zařízením (UE) a příslušnou eNB. Nejčastěji bývá prováděna po zapnutí telefonu, nebo při *handoveru*. Výsledkem této procedury je buď autentifikace zařízení sítě, nebo jeho odmítnutí. Použitelné signály pro určování polohy zařízení, které nevysílá, jsou tzv. primární a sekundární synchronizační signály, viz kapitola 3.2.8.

Dále je popsána elementární struktura vysílání sestupného směru pro vysílání v ČR (vysílání typu 1 s kmitočtovým dělením).

3.2.1 Časová hierarchie

Hlavní časová jednotka vysílání je rámec (*frame*), kterého délka je 10 ms. Jeden rámec obsahuje deset subrámců (*subframe*) o délce 1 ms. Jeden rámec obsahuje 20 slotů o délce 0,5 ms. Dva po sobě následující sloty tvoří jeden subrámec. Vztahy těchto pojmů jsou znázorněny na obrázku 3.2.1.



Obrázek 3.2.1: Časové dělení vysílání – vztahy pojmů slot, subrámec a rámec

V závislosti na typu rámce může časová jednotka jednoho slotu obsahovat 3, 6 nebo 7 symbolů. Délka symbolu, resp. OI souvisí mj. s plánovaným rozsahem buňky, a tedy i časovým úsekem, ovlivněným mezisymbolovou interferencí a typem OI⁸.

Možné doby trvání symbolů a OI jsou uvedeny v tabulce 3.2.1.

Tabulka 3.2.1: Možné doby trvání symbolů:

Varianta číslo	Typ OI	Rozestup subnosných	N_{sym}	N_{sc}	T_{sym} (μs)	T_{OI} (μs)	Poměr dob trvání symbolu a OI
1	Normální	$\Delta f = 15 \text{ kHz}$	7	12	66,7	5,2 (1x)	1:12,8
2	Rozšířený		6			4,7 (6x)	1:14,2
3			$\Delta f = 7,5 \text{ kHz}$	3	24	133,3	33,3

Zkratky, použité v tabulce 3.2.1:

N_{sym} Počet symbolů v jednom slotu

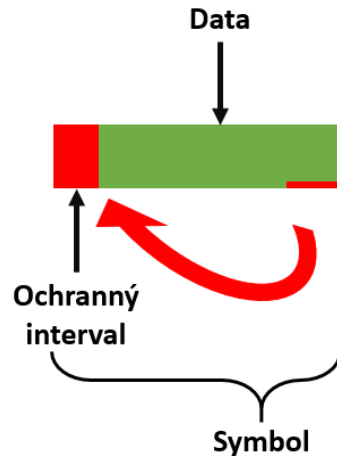
N_{sc} Počet subnosných jednom zdrojovém bloku

T_{sym} Doba trvání symbolu bez OI

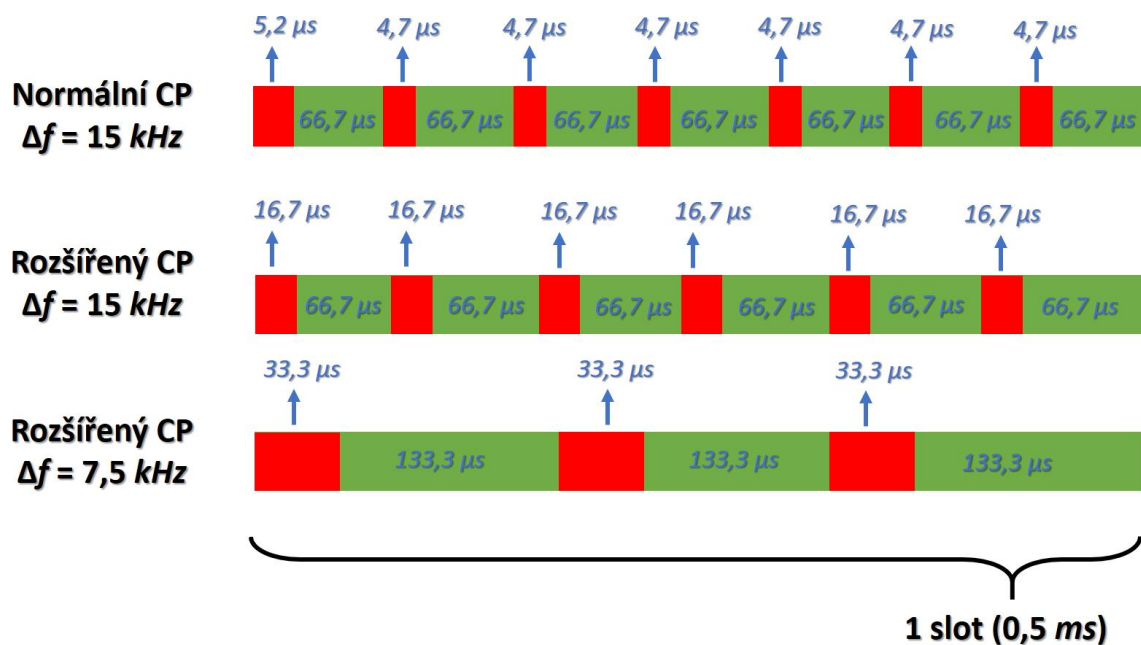
T_{OI} Doba trvání OI

⁸ Označováno jako „normal CP“ a „extended CP“

Nejčastěji používaný případ s maximálním počtem symbolů v jednom slotu je tvořen sedmicí symbolů a jejich OI. Z důvodu nutnosti dodržení souhrnné doby trvání jednoho slotu 0,5 ms je první OI delší o 0,5 μs než ostatní. Ochranný interval je tvořen poslední částí symbolu, která je zkopírována a přidána na jeho počátek, viz obrázek 3.2.2. Tento způsob tvoření OI je využit při hledání počátku symbolů, viz kapitola (4.2).



Obrázek 3.2.2: Ilustrace vytváření OI kopírováním a přesunem koncové části symbolu



Obrázek 3.2.3: Doby trvání symbolů pro různé Δf a OI, viz tabulka 3.2.1

3.2.2 Kmitočtová hierarchie

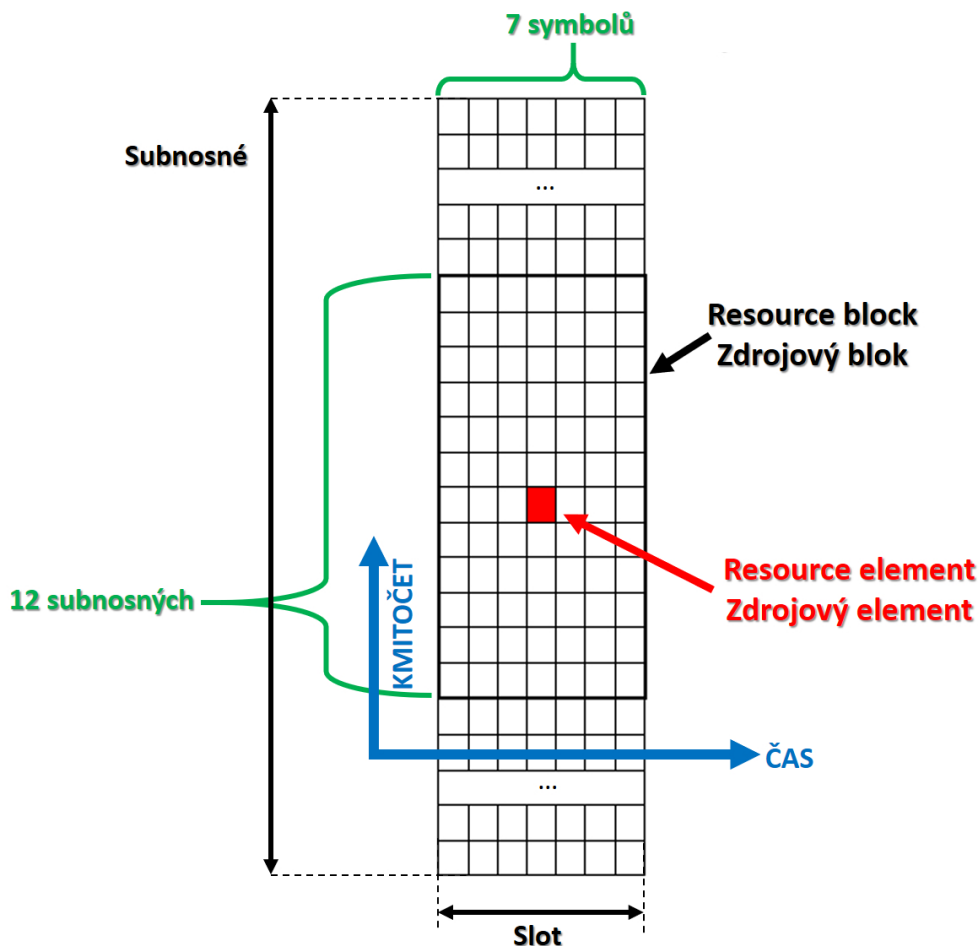
Vysílání sestupného směru je složené ze vzájemně ortogonálních subnosných. V případě vysílání s alokovanou šířkou pásma 10 MHz je jejich počet 600 (resp. 601 po započtení stejnosměrné složky). Jednotlivé subnosné jsou seskupovány po 12 do tzv. zdrojových bloků (*resource block*). Ty jsou v čase ohraničené dobou trvání 7 symbolů (slot, resp. 0,5 ms). Zdrojový element (resource element) představuje minimální přidělitelnou množinu vysílání (jeden symbol na jedné subnosné). Zdrojový blok obsahuje $12 \cdot 7 = 84$ zdrojových elementů (obrázek 3.2.4, resp. tabulka 3.2.1). Počet zdrojových elementů (symbolů) za sekundu je $7 \cdot 20 \cdot 100 = 14\,000$ pro jednu subnosnou (počet symbolů v slotu \cdot počet slotů za 10 ms \cdot počet 10 ms rámců za vteřinu). Celkový počet zdrojových elementů lze vyjádřit vynásobením 14 000 počtem subnosných (resp. 12 \cdot počet zdrojových bloků). V reálných podmínkách je počet všech zdrojových elementů nesoucích data nižší, a to z důvodu prázdných subnosných na okrajích spektra a občasném nevysílání daného zdrojového elementu, viz [6]. Tabulka 3.2.2 uvádí základní parametry pro vysílání rámce typu 1 s $\Delta f = 15$ kHz a 7 symboly v jednom slotu.

Tabulka 3.2.2: Základní parametry LTE – sestupný směr vysílání:

<i>Alokovaná šířka pásma (MHz)</i>	1,4	3	5	10	15	20
<i>Počet zdrojových bloků (N_{RB})</i>	6	15	25	50	75	100
<i>Počet bodů FFT na přijímači</i>	128	256	512	1024	1536	2048
<i>Počet použitých subnosných</i>	72	180	300	600	900	1200
<i>Počet ochranných subnosných</i>	56	76	212	424	636	848
<i>Poměr ochranných a všech subnosných</i>	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
<i>Použitá šířka pásma pro data (MHz)</i>	1,095	2,715	4,515	9,015	13,515	18,015
<i>Signaling overhead (%)</i>	26,9	16,48	15,6	14,94	14,72	14,61
<i>Počet vzorků na 1 slot</i>	960	1920	3840	7680	11520	15360
<i>Vzorkovací kmitočet (MHz)</i>	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

3.2.3 Zdrojová mřížka

Předešlé kapitoly byly věnovány dělení zdrojových bloků v časové a kmitočtové oblasti. Zdrojová mřížka (*resource grid*) představuje současný popis obou těchto veličin jednoznačnou lokalizací v čase a kmitočtu. Typ vysílaného signálu bývá ve zdrojové mřížce barevně odlišován (viz obrázek 3.2.6). LTE *Advanced* je koncipováno jako systém s více vstupy a výstupy (MIMO), proto je každý prvek zdrojové mřížky rovněž doplněn o informaci, ze kterého anténního portu je vysíláno.



Obrázek 3.2.4: Zdrojová mřížka LTE

3.2.4 Datový tok

Pro pásmo šířky 10 MHz s nerozšířeným OI (viz tabulky 3.2.1 a 3.2.2) lze vyčíslit datový tok jako $14\,000 \cdot 600 = 8,4 \cdot 10^6$ zdrojových elementů za vteřinu (viz výpočet z kapitoly 3.2.2), který je vynásoben počtem použitých subnosných. Množství bitů za vteřinu závisí na modulacích, použitých na jednotlivých subnosných, které jsou vybírána dle tzv. CQI (*Channel Quality Index*).

Tento parametr je zjišťován samotným zařízením (za použití pilotních signálů⁹), a jeho hodnota je zpětně odesílána obsluhující eNB. Při rostoucím (zlepšujícím se) CQI mohou být data modulována modulacemi QPSK, 16 QAM, 64 QAM a 256 QAM¹⁰. Rychlost přenosu lze stanovit pomocí tzv. koeficientů efektivnosti [15]. Pro pásmo 10 MHz je teoretická maximální možná přenosová rychlost $8,4 \cdot 10^6 \cdot 7,4063 = 62,21$ Mbps, nejméně příznivější případ počítá s $8,4 \cdot 10^6 \cdot 0,1523 = 1,2793$ Mbps. Vypočtené hodnoty jsou v reálných podmínkách nižší z důvodu přenosu řídicích (tedy „nedatových“) signálů (tzv. *signaling overhead* [7]).

3.2.5 Signály sestupného směru vysílání

Pro určování polohy jsou vhodné ty signály sestupného směru, které se pravidelně opakují, a ze kterých lze odhadnout identifikaci konkrétní stanice (eNB), Tuto definici částečně splňují tzv. synchronizační signály (viz kapitola 3.2.8), které jsou vysílány za účelem umožnění připojení zařízení do sítě (například po zapnutí telefonu). Pro řízení sítě a přenos dat jsou zavedeny fyzické kanály a fyzické signály („*physical channels*“ a „*physical signals*“). V obou případech se jedná o přesně definovanou alokaci zdrojových elementů ve zdrojové mřížce.

3.2.6 Fyzické kanály

V případě fyzických kanálů je náplň vysílání tvořena daty, která obsahují informace z vyšších vrstev¹¹. Typy fyzických kanálů jsou stručně popsány v tabulce 3.2.3.

Tabulka 3.2.3: Základní typy fyzických kanálů:

Název kanálu	Popis činnosti	Zkratka
<i>Physical Downlink Shared Channel</i>	Přenos dat pro uživatele (UE)	PDSCH
<i>(Enhanced) Physical Downlink Control Channel</i>	Informace pro uživatele o alokaci zdrojových elementů, informace o HARQ a o rozvrhu vysílání pro uplink	(E)PDCCH
<i>Physical HARQ¹² Indicator Channel</i>	Přenos ACK/NACK odpovědí	PHICH
<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>	Informace pro UE o počtu symbolů, použitých v PDCCH	PCFICH
<i>Physical Broadcast Channel</i>	Přenos MIB ¹³	PBCH

⁹ U vybraných řídicích a synchronizačních signálů je modulace pevně dána bez ohledu na CQI [16].

¹⁰ Pro malé buňky je uvažována možnost zavedení modulací až do 1024 QAM [40]

¹¹ Řízení přístupu k síti, uživatelská data apod.

¹² *Hybrid Automatic Repeat Request*

¹³ *Master Information Block* – informace o šířce pásma, PHICH a čísla rámce. Modulace PBCH je vždy QPSK.

3.2.7 Fyzické signály

Pro zdrojovou mřížku platí, že každý její element je popsán buď fyzickým kanálem, fyzickým signálem, nebo je „*unused*“ (tedy že není vysíláno vůbec). Fyzické signály v sobě nenesou informace z vyšších vrstev (na rozdíl od fyzických kanálů). Fyzické signály se dělí na referenční a synchronizační, které se dále dělí na primární a sekundární. Je definováno 6 typů referenčních signálů [16].

Tabulka 3.2.4: Typy referenčních signálů:

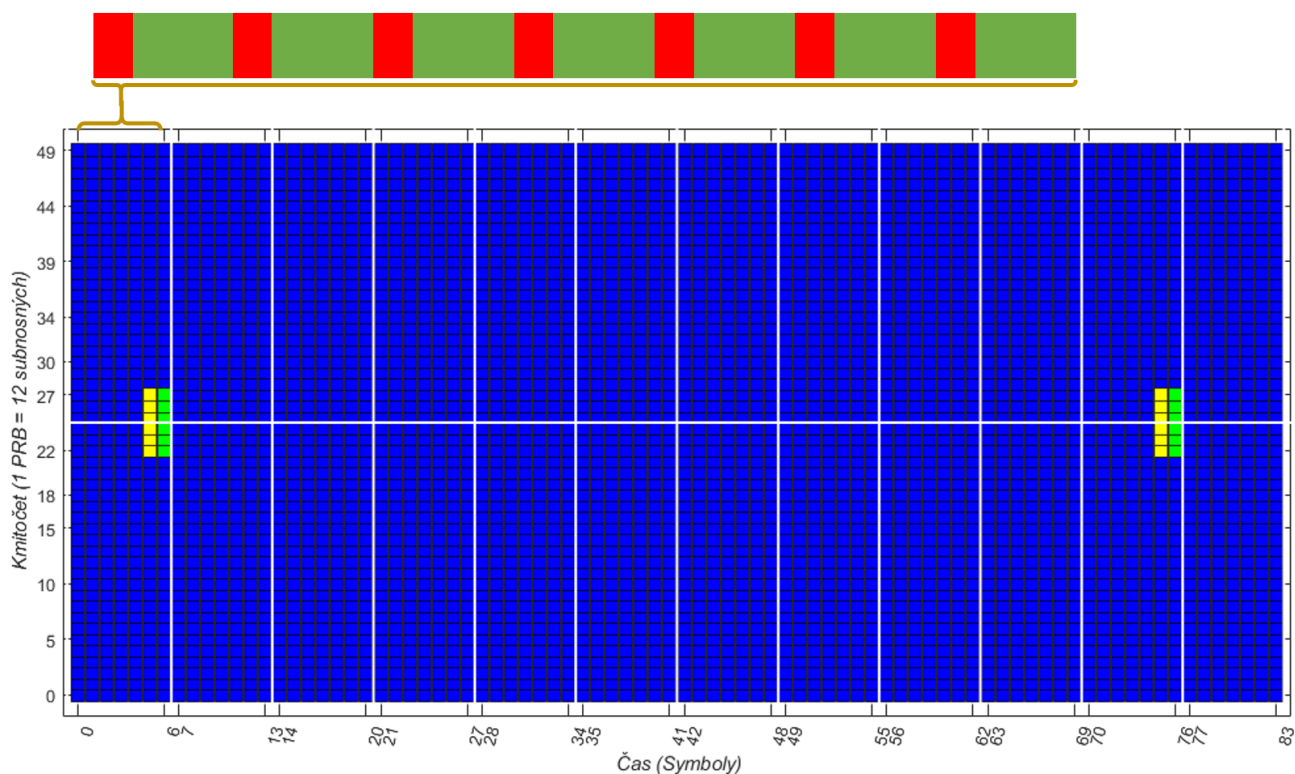
Název RS	Popis
<i>Cell – specific Reference Signals (CRS)</i>	Pomocný signál pro demodulaci, definován pro normální OI (nepovinné vysílání)
<i>Multicast-Broadcast Single-Frequency Network Reference Signal (MBSFN RS)</i>	Pomocný signál pro demodulaci, definován pro rozšířený OI (nepovinné, pouze anténní port 4)
<i>UE – specific RS</i>	Informace o distribuci zdrojových bloků pro jednotlivá UE
<i>Demodulační RS</i>	Informace pro připojené uživatele, sloužící k usnadnění demodulace
<i>Positioning reference signals (PRS)</i>	Signály pro určování polohy metodou časových rozdílů (TDoA)
<i>Channel State Information RS (CSI RS)</i>	Referenční signály, na kterých základě UE určuje CQI

3.2.8 Synchronizační signály

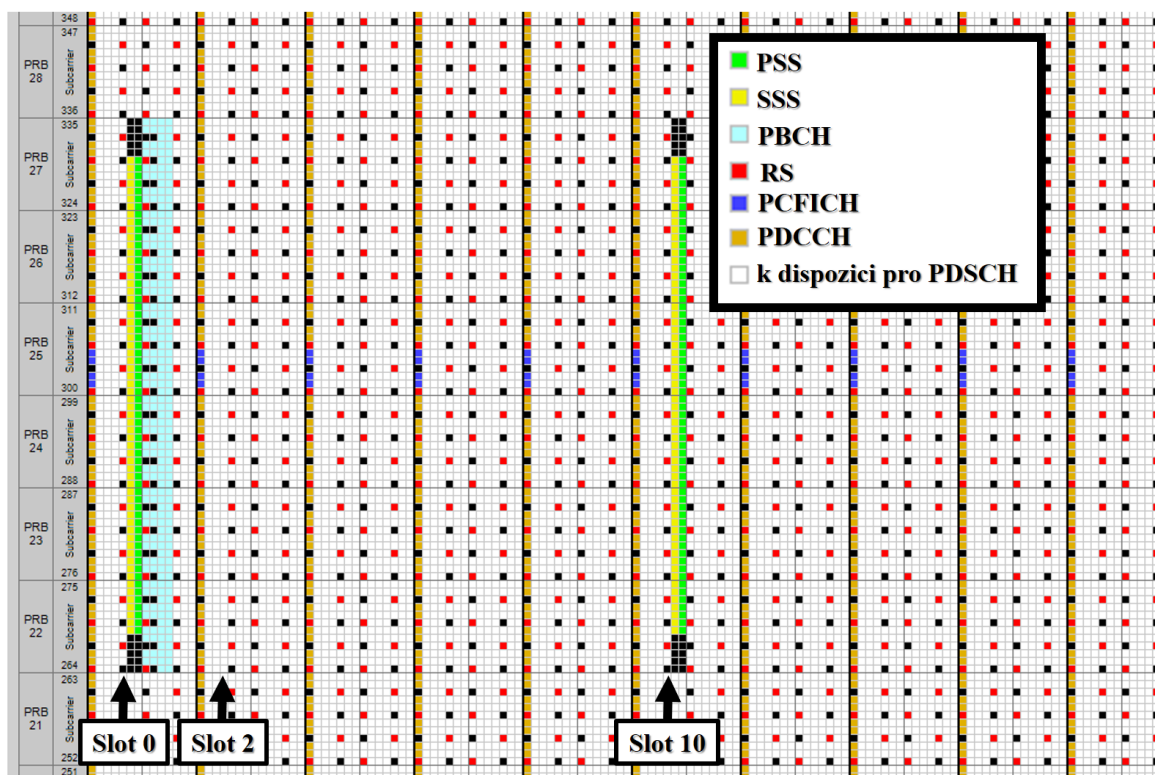
Účelem synchronizačních signálů je umožnit UE připojení se k síti. Jsou definovány primární a sekundární synchronizační signály (SS). Pro rámeček typu 1 s kmitočtovým dělením jsou tyto signály mapovány na 6 zdrojových bloků, umístěných uprostřed vysílacího pásma (viz obrázek 3.2.5). Toto mapování je nezávislé na šířce pásma (vždy 1,08 MHz)¹⁴. Zařízení při připojování sleduje fixně dané okolí středních kmitočtů. Synchronizační signály jsou vysílány vždy na posledních dvou symbolech ze 7, jednou za 10 slotů (jednou za 5 ms). V kmitočtové oblasti jsou soustředěny na 72 subnosných kolem středního kmitočtu, z nichž 10 jsou prázdné subnosné (5 z obou stran, viz obrázek 3.2.6, na obrázku 3.2.5, kde je vyznačené celé pásmo pro 10 MHz nejsou tyto okraje patrné). Indexy subnosných, alokovaných pro SS jsou v tomto případě 264 až 335 (včetně prázdných okrajů). Synchronizační signály mají při mapování do zdrojové mřížky nejvyšší prioritu [19].

¹⁴ Tato distribuce je hlavním důvodem různých hodnot *signaling overhead* pro různé šířky pásem (tabulka 3.2.2.).

Pozice primárních a sekundárních synchronizačních signálů
rámeček typu 1, pásmo 10 MHz



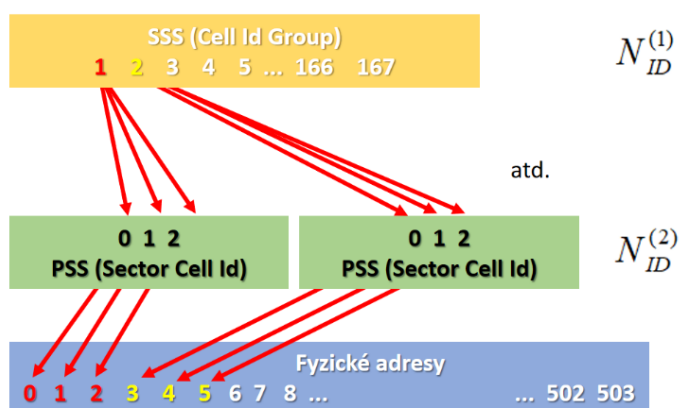
Obrázek 3.2.5: Zdrojová mřížka pro šířku pásma 10 MHz. Primární SS jsou vyznačeny žlutě, sekundární zeleně. V horní části obrázku je znázorněna hierarchie jednoho slotu přes všechny subnosné, symboly jsou značeny zeleně, OI červeně



Obrázek 3.2.6: Zdrojová mřížka pro pásmo 10 MHz, výřez z kmitočtové oblasti, černá místa označují resource elementy bez vysílání, převzato a upraveno z [6], viz tabulky 3.2.5.1 a 3.2.5.2

Informace obsažené v SS jsou adresa buňky (*Cell Id*) a číslo slotu (0, nebo 10). Sekvence primárního synchronizačního signálu (PSS) může nabývat třech různých podob, které definují hodnoty tzv. *Sector Cell Id Group* (možnosti 0, 1 a 2), označováno $N_{ID}^{(2)}$. U sekundárního synchronizačního signálu (SSS) je počet všech možných podob 168, které jsou definovány hlavně¹⁵ *Cell Id group*, označováno $N_{ID}^{(1)}$. Počet všech možných adres (*Cell Id*) je $3 \cdot 168 = 504$ (adresy 0 až 503). Fyzická adresa je definována vztahem (3.2.1).

$$N_{ID}^{Cell} = 3 \cdot N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} \quad (3.2.1)$$



Obrázek 3.2.7: Tvorba fyzické adres buňky

Tvorba adres je znázorněná na obrázku 3.2.7. Výsledná podoba SS (konkrétně sekundárního) je funkcí $N_{ID}^{(1)}$, $N_{ID}^{(2)}$ a čísla slotu, viz kapitola (3.2.1).

Průběh SS je definován pomocí tzv. *Zadoff–Chu* sekvence¹⁶ [12], [17]. Tato sekvence je definována jako komplexní exponenciála (s konstantní amplitudou). *Zadoff–Chu* sekvence má nulovou vzájemnou korelaci (energii) mezi cyklicky posunutými průběhy¹⁷. Vztah (3.2.2) je obecným popisem *Zadoff–Chu* sekvence.

$$x(n) = \exp\left(-j \frac{\pi u n(n + c_f + 2q)}{N_{ZC}}\right) \quad (3.2.2)$$

Kde N_{ZC} je délka sekvence, u (kmenový index) a q jsou konstanty,

$$0 \leq n < N_{ZC},$$

$$0 < u < N_{ZC}, \text{ přičemž největší společný dělitel } N_{ZC} \text{ a } u \text{ je } 1,$$

$$c_f = N_{ZC} \bmod 2$$

$$q \in \mathbb{Z}.$$

¹⁵ Výslední podobu SSS částečně ovlivňuje i číslo slotu a *Sector Cell Id Group*, všech možností je proto víc, viz kapitola 3.2.10

¹⁶ Variace této sekvence jsou v LTE použité vícekrát, například u přístupových preambulí pro UE, nebo u SRS (*Sound Reference Signal*) [10].

¹⁷ Někdy bývá označována jako „CAZAC“ sekvence (*Constant Amplitude Zero AutoCorrelation waveform*)

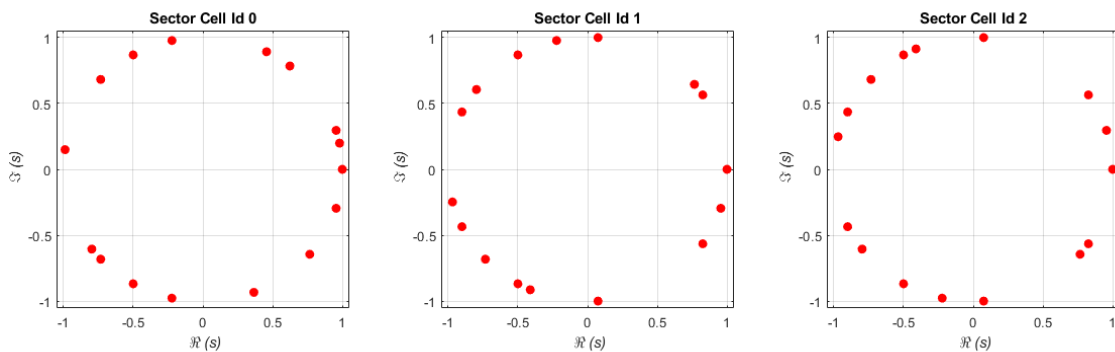
Synchronizační signály jsou nejvhodnější signály z vysílání LTE pro určování polohy přístupem „signals of opportunity“. V ideálním případě z nich lze stanovit kmitočtový a časový ofset a zároveň identifikovat jednotlivé stanice, viz kapitola 4.2. Jsou definovány dva typy synchronizačních signálů – Primární (PSS) a Sekundární (SSS).

3.2.9. Primární synchronizační signály

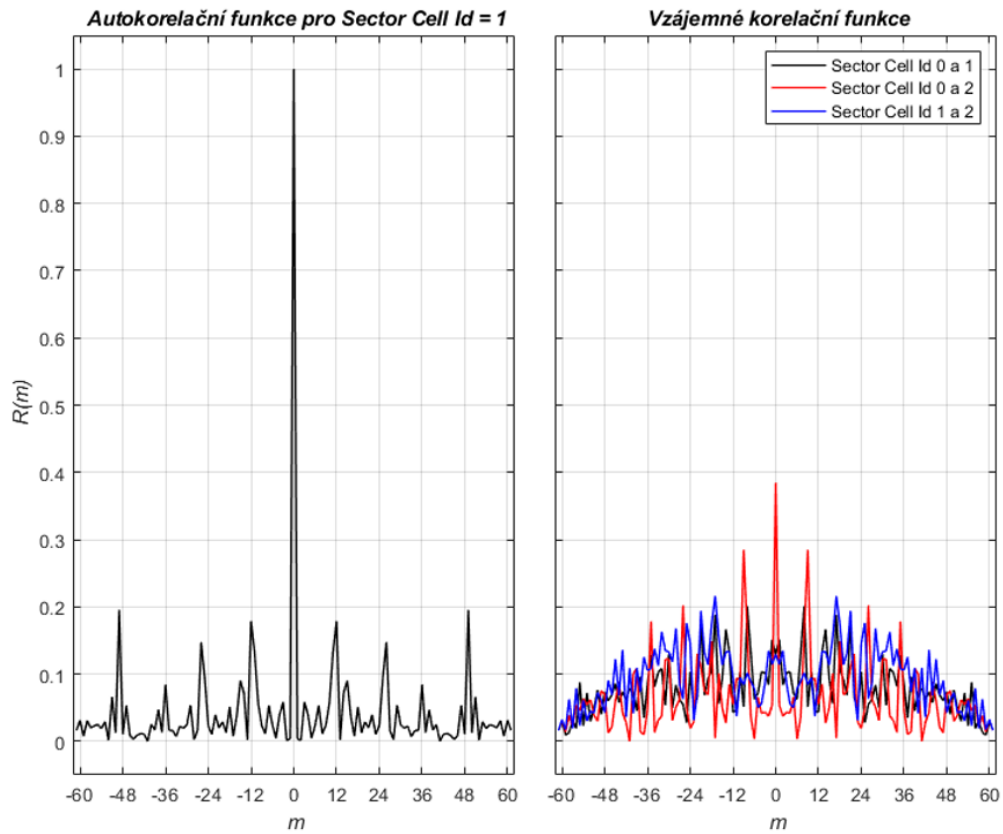
Vztah (3.2.3) popisuje modifikaci obecné Zadoff–Chu sekvence na sekvenci, generující PSS. Hodnota u (kmenový index sekvence) udává ve vztahu (3.2.3) hodnotu *Sector Cell Id* a může nabývat hodnot 0, 1 a 2, čemuž odpovídají při generování sekvence hodnoty 25, 29 a 34.

$$d_u(n) = \begin{cases} \exp\left(-j\frac{\pi u n(n+1)}{63}\right) & n \in \langle 0,30 \rangle \\ \exp\left(-j\frac{\pi u n(n+1)(n+2)}{63}\right) & n \in \langle 31,61 \rangle \end{cases} \quad (3.2.3)$$

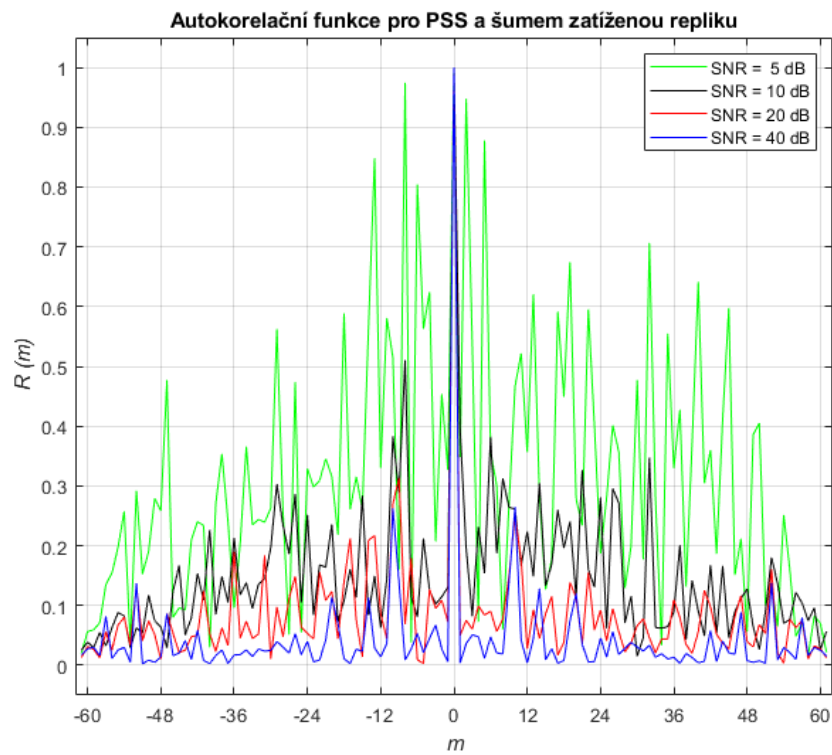
Primární synchronizační signál je mapován na poslední OFDM symbol pro sloty 0 a 10, viz obrázky 3.2.5 a 3.2.6. Na obrázku 3.2.8 jsou zobrazeny možné průběhy signálu pro všechny 3 varianty PSS (konstelační diagramy jsou zobrazeny pouze pro subnosné, nesoucí PSS). Dále jsou demonstrovány autokorelační funkce pro samotný signál, vzájemné korelace jednotlivých možností, a autokorelace signálu se svojí šumem zatíženou replikou (z Gaussova rozložení).



Obrázek 3.2.8: Možné podoby PSS pro různé hodnoty Sector Cell Id



Obrázek 3.2.9: Korelační vlastnosti PSS



Obrázek 3.2.10: Vliv šumu na autokorelační funkci PSS

3.2.10 Sekundární synchronizační signály

Na obrázcích 3.2.5 a 3.2.6 lze vidět mapování sekundárních synchronizačních signálů (SSS) a PSS do zdrojové mřížky (SSS v čase bezprostředně předcházejí PSS). Na rozdíl od PSS se vysílané sekvence SSS liší pro subrámeček 0 a subrámeček 5 (a další násobky). Perioda vysílání PSS je 5 ms, u SSS se celá sekvence zopakuje až po 10 ms¹⁸. SSS jsou generovány *scramblováním* dvojice binárních posloupností délky 31 vzorků. Syntézu SSS popisují následující vztahy:

$$q(N) = \frac{2 \cdot N + \frac{N}{30} \left(\frac{N}{30} + 1 \right)}{60} \quad (3.2.4)$$

Kde N je *Cell Id Group*, tj. 168 možností, definovaných hodnotami 0 až 167. Koeficient q je funkcí N .

$$m' = N + \frac{q(q+1)}{2} \quad (3.2.5)$$

$$m_0 = m' \bmod 31 \quad (3.2.6)$$

$$m_1 = \left(m_0 + 1 + \frac{m'}{31} \right) \bmod 31 \quad (3.2.7)$$

Kde m_1 , m_2 a m' jsou pomocné konstanty. Dále jsou generovány sekvence $x_{1,2}(i)$, a to za předpokladu znalostí $x_{1,2}(0) = x_{1,2}(1) = x_{1,2}(2) = x_{1,2}(3) = 0$ a $x_{1,2}(4) = 1$. Definiční obor x (hodnoty i) je interval $\langle 0, 25 \rangle$ (platí pro vztahy (3.2.8) a (3.2.9)). Ze sekvencí $x_{1,2}(i)$ jsou definovány sekvence $c(k)$ a $s(k)$ (vztahy (3.2.10) a (3.2.11)), které mají definiční obor k z intervalu $\langle 0, 30 \rangle$. N_p ve vztahu (3.2.12) je hodnota *Sector Cell Id* (tedy příslušná hodnota PSS, nabývající hodnot 0, 1 a 2).

$$x_1(i+5) = (x_1(i+2) + x_1(i)) \bmod 2 \quad (3.2.8)$$

$$x_2(i+5) = (x_2(i+3) + x_2(i)) \bmod 2 \quad (3.2.9)$$

$$s(k) = 1 - 2 \cdot x_1(k) \quad (3.2.10)$$

$$c(k) = 1 - 2 \cdot x_2(k) \quad (3.2.11)$$

Kombinací předešlých vztahů jsou definovány další sekvence pro generování sudých prvků SSS:

$$c_0(n) = c((n + N_p) \bmod 31) \quad (3.2.12)$$

$$s_0^{(m_0)}(n) = s((n + m_0) \bmod 31) \quad (3.2.13)$$

$$s_1^{(m_1)}(n) = s((n + m_1) \bmod 31) \quad (3.2.14)$$

¹⁸ Jedna adresa buňky je tedy definována jedním průběhem PSS a dvěma průběhy SSS pro slot 0 a 10.

Vztah (3.2.15) popisuje výsledný průběh SSS pro sudé prvky (indexy).

$$\mathbf{d}(2n) = \begin{cases} s_0^{(m_0)}(n) \cdot c_0(n) & \text{pro subrámeček 0} \\ s_1^{(m_1)}(n) \cdot c_0(n) & \text{pro subrámeček 5} \end{cases} \quad (3.2.15)$$

Při generování lichých částí SSS jsou beze změny použity vztahy (3.2.6) až (3.2.11), (3.2.13) a (3.2.14). Za předpokladu znalostí $x_3(0) = x_3(1) = x_3(2) = x_3(3) = 0$ a $x_3(4) = 1$ je definována sekvence x_3 pro i z intervalu $\langle 0, 25 \rangle$ (vztah (3.2.17)). Z této sekvence je definována další sekvence $z(k)$ pro k z intervalu $\langle 0, 30 \rangle$ (vztah (3.2.18)).

$$c_1(n) = c((n + N_p + 3) \bmod 31) \quad (3.2.16)$$

$$x_3(i + 5) = (x_3(i + 4) + x_3(i + 2) + x_3(i + 1) + x_3(i)) \bmod 2 \quad (3.2.17)$$

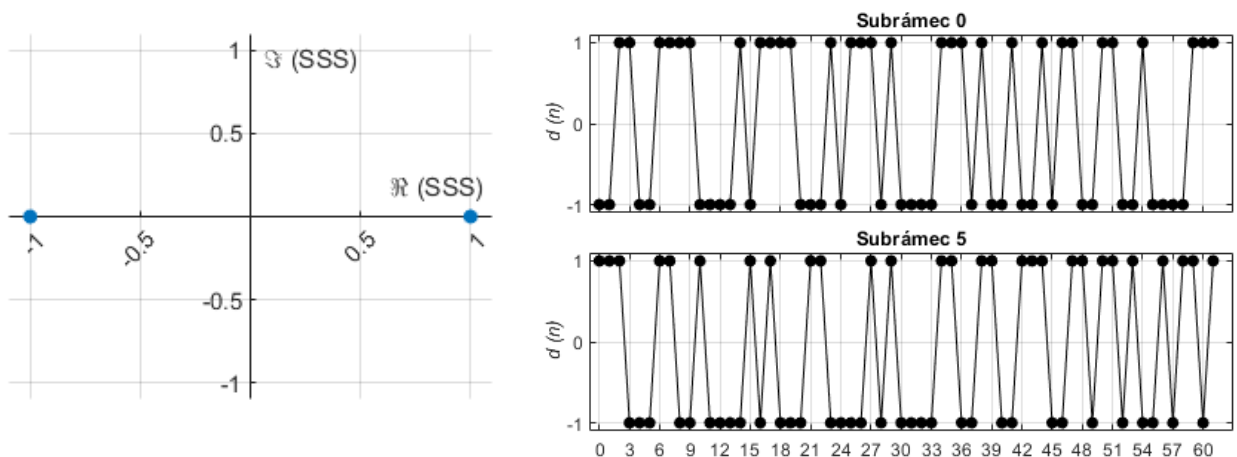
$$z(k) = 1 - 2 \cdot x_3(k) \quad (3.2.18)$$

$$z_1^{(m_0)}(n) = z((n + (m_0 \bmod 8)) \bmod 31) \quad (3.2.19)$$

$$z_1^{(m_1)}(n) = z((n + (m_1 \bmod 8)) \bmod 31) \quad (3.2.20)$$

$$\mathbf{d}(2n + 1) = \begin{cases} s_1^{(m_1)}(n) \cdot c_1(n) \cdot z_1^{(m_0)}(n) & \text{pro subrámeček 0} \\ s_0^{(m_0)}(n) \cdot c_1(n) \cdot z_1^{(m_1)}(n) & \text{pro subrámeček 5} \end{cases} \quad (3.2.21)$$

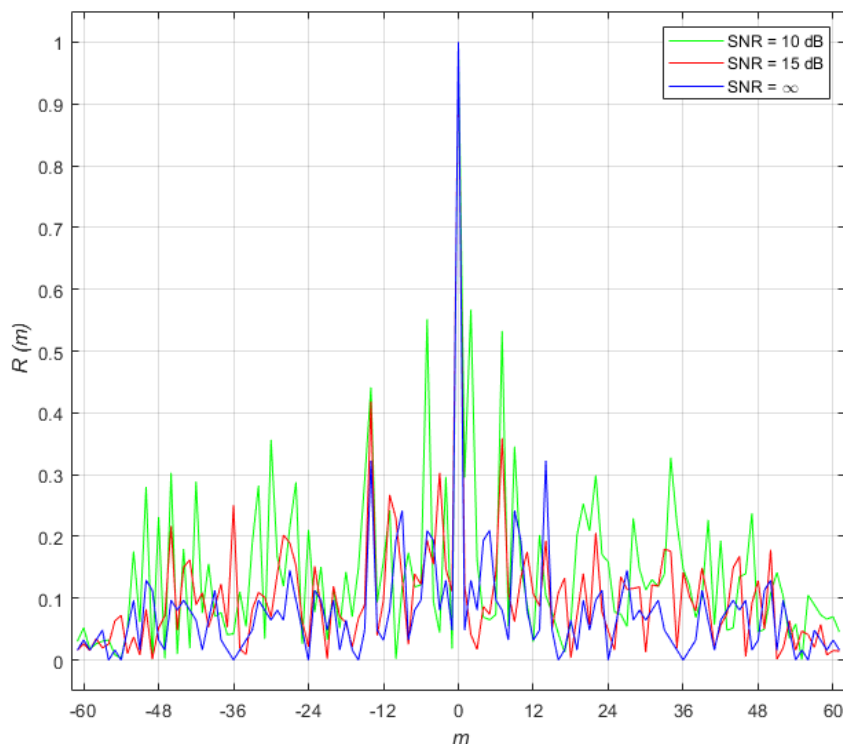
Kombinací vztahů (3.2.15) a (3.2.21) je definována sekvence pro SSS, tedy pro sudé a liché prvky, a pro subrámečky 0 a 5. Obor hodnot SSS je pro všechny možnosti¹⁹ 1 nebo -1. Konstelační diagram SSS je tedy shodný s BPSK²⁰, viz obrázek 3.2.11.



Obrázek 3.2.11: Konstelace SSS (vlevo) a příklad výstupní sekvence (vpravo)

¹⁹ $3 \cdot 168 \cdot 2 = 1008$ (všechny možnosti PSS, všechny možnosti SSS, dvě možnosti pro sloty)

²⁰ Tato znalost byla v přijímači využita pro jemnou kompenzaci kmitočtového, resp. fázového offsetu (na nulovou imaginární složku, resp. skutečnost, že fáze SSS nabývá v ideálním případě pouze hodnot 0 a π).



Obrázek 3.2.12: Vliv šumu na autokorelační funkci SSS

3.2.11 Referenční signály

Mezi referenční signály (viz tabulka 3.2.4) patří i ty, které jsou navrženy speciálně pro účely určování polohy – *Position Reference Signals* (PRS). Druhým nejvhodnějším signálem pro určování polohy přístupem „signals of opportunity“ je *Cell-Specific Reference Signal*. Signály CRS a PRS jsou definovány následujícími sekvencemi.

$$d_{l,n_s}(m) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - 2c(2m) \right) + j \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - 2c(2m + 1) \right) \quad (3.2.22)$$

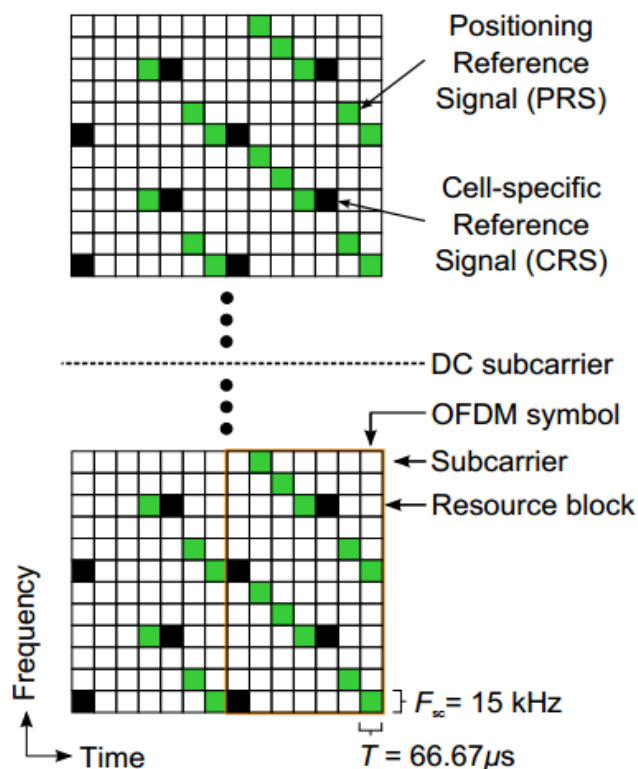
$$c_{init} = 2^{10} \cdot (7(n_s + 1) + l + 1) \cdot (2 \cdot N_{ID}^{cell} + 1) + 2 \cdot N_{ID}^{cell} + N_{CP} \quad (3.2.23)$$

Hodnota N_{CP} je 0, nebo 1 (1 pro normální CP), l je pořadí symbolu v rámci slotu, n_s číslo slotu. Posloupnost (3.2.22) je definována pomocí pseudonáhodné posloupnosti (3.2.23) pro $m = 0, 1 \dots 2X$, kde X je dle šířky pásma maximální počet zdrojových bloků.

Signály CRS a PRS se neliší svojí podobou, která je mj. závislá nejen na *Cell Id*, ale i mapováním do zdrojové mřížky²¹. Toto mapování je dáno hodnotou *Cell Id mod 6* (tedy 6 různých možností, jedna pro 84 adres).

²¹ Na obrázku 3.2.6 jsou červeně vyznačeny RS, konkrétně CRS.

Druhým typem RS jsou PRS – signály, navržené pro účely určování polohy metodou TDoA. Tomu odpovídá i jejich mapování ve zdrojové mřížce, viz obrázek 3.2.13.



Obrázek 3.2.13: Mapování referenčních signálů, převzato z [18]

To, zda jsou PRS vysílány a v jaké konkrétní podobě, je plně dáno zřizovatelem sítě. PRS jsou vysílány v subrámcích, které jsou pro ně konfigurovány, tzv. „*positioning occasions*“. Jejich periodičita může být různá, podobně jako šířka pásma²². Při určování polohy sítí již autentifikovaného uživatele (tedy poté, co eNB přijme požadavku na určení polohy) může síť vypínat a zapínat vysílání PRS v stanicích v okolí uživatele.

Konkrétní nastavení vysílání PRS je plně v kompetenci operátora sítě, nicméně vzhledem k tomu, že UE může svoji polohu zjistit i jinými způsoby (viz kapitola 3) a faktu, že signály PRS zhoršují *signaling overhead* (tabulka 3.2.2), nelze automaticky předpokládat, že jsou sítí vysílány²³. Signály PRS mohou být vysílány zvýšeným výkonem.

²² Například pro pásmo 20 MHz může být pásmo s PRS široké 20, 15, 10, 5, 3, nebo 1,4 MHz, viz tabulka 3.2.2

²³ Spíše lze předpokládat opak, navíc od roku 2016 nemusí korespondovat PCI (*Physical Cell Identity*) s *Cell Id*, resp. vysílací antény fyzicky na různých místech mohou v síti vystupovat jako jedna eNB (*Cell Id*).

4 Příjem signálů LTE

Určování polohy přístupem „*signals of opportunity*“ ze signálů LTE lze ideově rozdělit na 5 kroků. Pro jejich realizaci byly vyvinuty algoritmy v prostředí MatLab. Tyto kroky jsou:

1. Příjem signálu
2. Synchronizace v čase a kmitočtu
3. Identifikace polohy přijímaných stanic na základě *Cell Id* (zjištěné z PSS a SSS)
4. Stanovení časových rozdílů
5. Odhad polohy na základě časových (dráhových) rozdílů

4.1 Přijímač

Příjem signálu byl realizován přijímačem *Ettus N210* [28]. Jedná se o tzv. SDR²⁴, které prostřednictvím *ethernetového* rozhraní odesílá komplexní obálku signálu do počítače. Příjem vzorků probíhal v programu MatLab, kde byly rovněž nastavovány parametry příjmu, jako jsou střední kmitočet, decimální faktor, počet vzorků, řízení zisku apod. Pro příjem byla v zařízení *Ettus N210* instalovaná dceřiná deska (*daughterboard*) *UBX - 40* [29]. Pro příjem a korektní zpracování signálu musí být na počítači nainstalován MatLab *USRP toolbox* [30], [31]. Samotný příjem signálů byl realizován na signálech českých mobilních operátorů (obrázek 3.1.6) a na signálech z generátoru²⁵ *Rohde & Schwarz SMBV100A* [27]. Tento generátor umožňuje generování signálů dle specifikace²⁶, určené k testování koncových zařízení sítí LTE a eNB [32]. Signály byly definovány v prostředí „*R&S WinIQSIM2 Simulation Software*“ [26], viz obrázek 4.3.8.

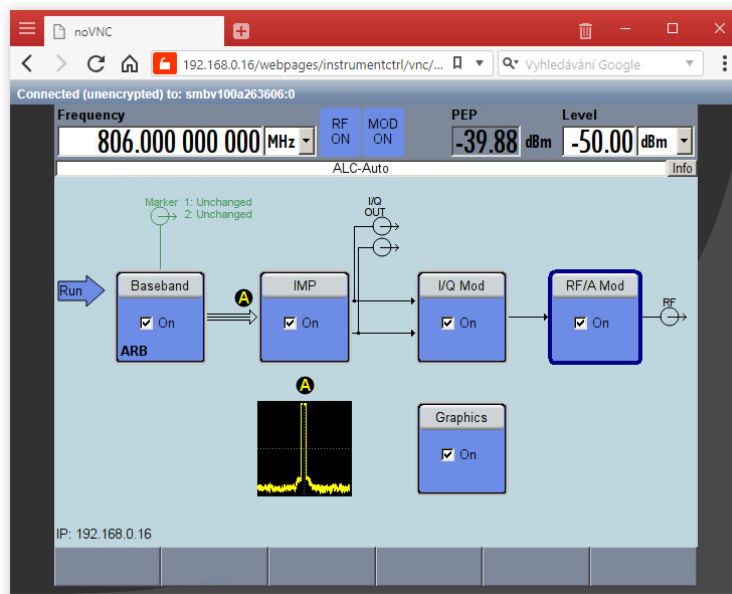


Obrázek 4.1.1: Vlevo přijímač *N210* [27], vpravo generátor *Rohde & Schwarz SMBV100A* [39]

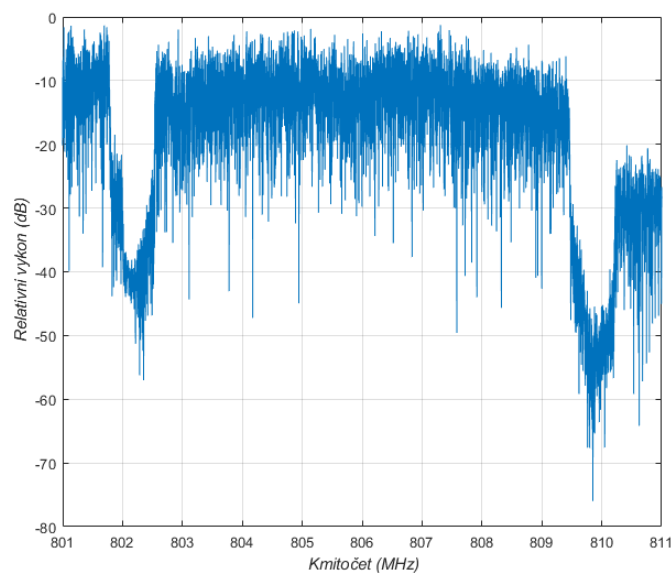
²⁴ Software Defined Radio – zpracování signálu probíhá na softwarově programovatelných obvodech

²⁵ Přijímač *Ettus N210* a generátor nebyly během měření synchronizovány.

²⁶ Konkrétně se jedná o specifikace TS36.211, TS36.212 a TS36.213. Tyto specifikace nezahrnují vysílání PRS.



Obrázek 4.1.2: Ukázka nastavení generovaného signálu z R & S generátoru²⁷



Obrázek 4.1.3: Ukázka výkonového spektra přijatého signálu sítě operátora O₂

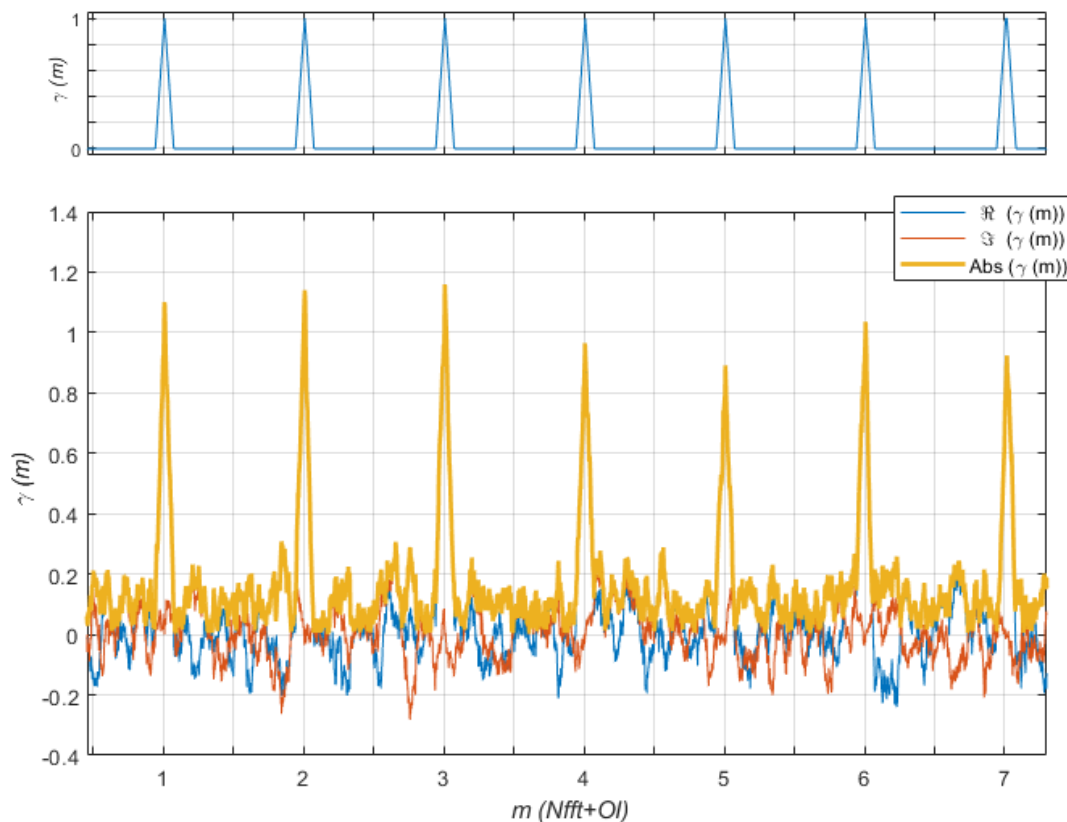
²⁷ Mezi další nastavení generování signálu, na kterém byly algoritmy testovány, patří *Cell Id* a kmitočtový, resp. časový offset.

4.2 Kmitočtová a časová synchronizace

Multiplexní modulace jsou citlivé na časový a kmitočtový ofset vysílače a přijímače (f_{cfo} -Carrier Frequency Offset). Důsledkem tohoto ofsetu je fázová rotace OFDM symbolu a interference mezi subnosnými (ICI – *Intercarrier Interference*, která je důsledkem ztráty jejich vzájemné ortogonality). Po kompenzaci kmitočtového ofsetu a provedení FFT se v přijímači může projevit „zbytkový“ (fázový) ofset na úrovni jednotek procent Δf , který je shodný pro všechny subnosné a způsobuje natočení konstelační roviny (které se v čase pro jednotlivé symboly mění, viz obrázek 4.3.4). Podobně jako kmitočtový ofset, časový ofset způsobuje chybnou detekci počátků symbolů, a tedy chybné odstranění OI [24]. Pro nalezení časového ofsetu je využito způsobu tvorby OI (obrázek 3.2.2). Počátek symbolů lze detekovat jako místo, jevíci korelaci s místem, které je na signálu vzdáleno o počet vzorků, odpovídající jednomu symbolu (bez OI, tedy N_{fft} vzorků). Posuvem dvojice fixně vzdálených oken o délce OI po signálu lze spočítat funkci věrohodnosti $\gamma(m)$.

Funkce $\gamma(m)$ je obecně komplexní funkce mezi iterace sumy ve vztahu (4.2.1), viz obrázek 4.2.2. Maximum funkce věrohodnosti nastane v případě mezi sumy, které přesně odpovídají OI.

$$\gamma(m) = \sum_{k=m}^{m+L-1} r(k) r^*(k + N) \quad (4.2.1)$$

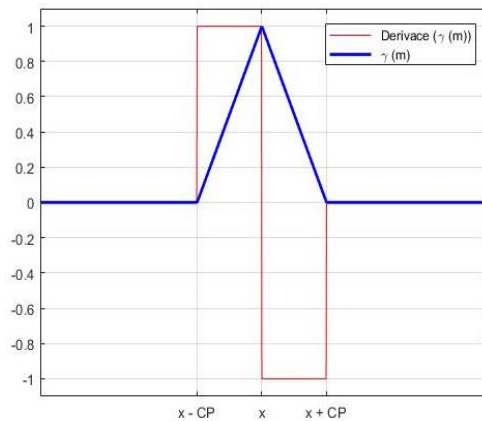


Obrázek 4.2.1: Příklad průběhu funkce $\gamma(m)$. Hodnoty na ose x udávají číslo detekovaného symbolu (pro hodnoty m násobek doby trvání symbolu a OI). Vrchní část grafu je výslední odhad pravděpodobnosti počátků symbolů na základě funkce γ , spočtené z měřeného signálu operátora Vodafone (spodní část)

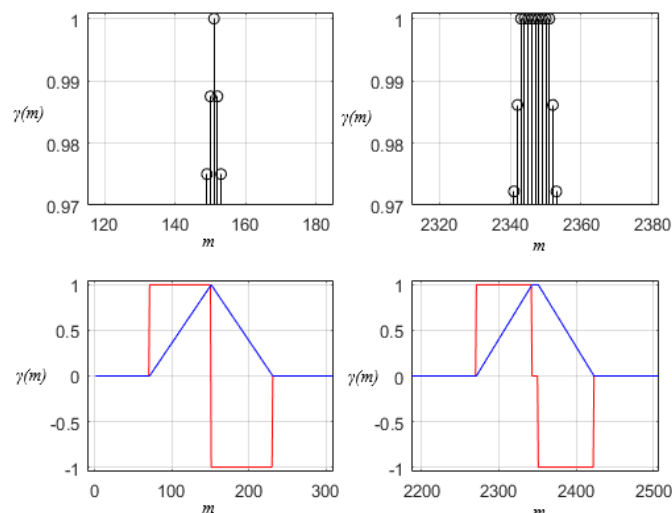


Obrázek 4.2.2: Grafická interpretace algoritmu výpočtu funkce $\gamma(m)$

Degradaci špiček funkce $\gamma(m)$ (a tedy i obtížnější detekci) zapříčiňují tyto faktory: vícecestné šíření, šum a nestejnost OI, viz tabulka 3.2.1. Problematická detekce špiček se následně odráží v chybné detekci časového a kmitočtového offsetu. Při obecném OFDM signálu (s OI stejných délek) lze zpětně odhadnout dobu trvání OI podle „tuposti“ špičky, a to změnou šířky oken z obrázku 4.2.2. Detail jednoho z vrcholů je na obrázku 4.2.3, společně s normovanou derivací, sloužící k usnadnění detekce.



Obrázek 4.2.3: Detail jednoho z vrcholů funkce $\gamma(m)$ pro případ oken délky oken shodných s délkou OI (x je označení konkrétní hodnoty m , kde byl detekován vrchol)



Obrázek 4.2.4: Ukázka dvojice špiček funkce γ . Oba grafy vlevo odpovídají špičce, vzniklé ze symbolu s normálním OI, grafy vpravo jsou pro špičku z dlouhého OI. Funkce γ je na dolních obrázcích vyznačena modře, červeně je označena její derivace. Vrchní dva grafy jsou přiblížením dolních špiček (viz hodnoty na ose y)

V případě vysílání LTE při konfiguraci slotu, obsahujícího nestejně OI se projevuje kumulovaná chyba funkce $\gamma(m)$ (jednou za 7 symbolů má okno z pohledu algoritmu nesprávnou délku), co přispěje k roztažení některých špiček, viz obrázek 4.2.4.

Výše uvedené metody získání funkce γ se při zpracování reálných LTE signálů ukázaly jako nedostatečné, resp. kumulující příliš velkou chybu, znemožňující jednoznačně rozpoznat špičku, odpovídající počátku symbolu od falešné špičky.

Druhou nevýhodou, pramenící z proměnlivé délky OI, je tvar vrcholů, který postupně degraduje z jednoznačné špičky na špičku, která je obtížně detekovatelná, viz video v příloze. Jako nejvhodnějším řešením se ukázal způsob výpočtu, který rozdělil signál na úseky odpovídající součtu délky symbolu (N_{fft}) a OI²⁸. Poté je dle (4.2.1) spočtena funkce γ samostatně pro každý úsek a dílčí výsledky jsou seřazeny do výslední funkce γ . Při standardní OFDM modulaci lze následně stanovit časový ofset θ ze vztahu (4.2.2) a kmitočtový ofset ε ze vztahu (4.2.3).

$$\theta = \arg \max \gamma(m) \quad (4.2.2)$$

$$\varepsilon = -\frac{1}{2\pi} \angle \gamma(\theta) \quad (4.2.3)$$

Z důvodu výše popsaných rozdílností signálů LTE a konvenční OFDM nejsou výsledky vztahů (4.2.2), resp. (4.2.3) dostatečně přesné. Proto byla pro stanovení θ použita zpřesňující metoda [33], viz vztahy (4.2.4) a (4.2.5) (jako náhrada za vztah (4.2.2)).

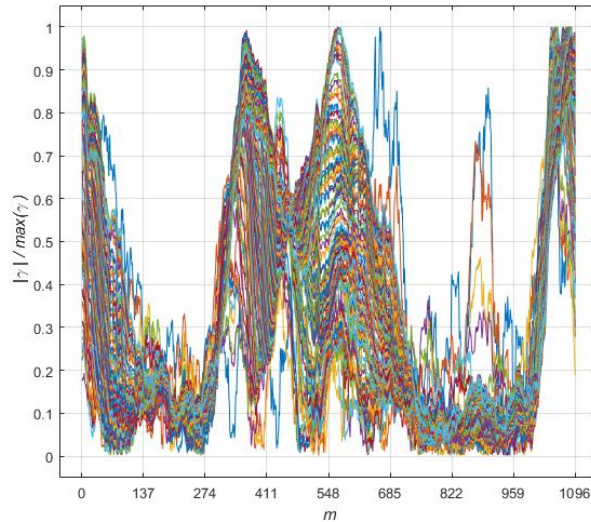
$$\theta = \arg \max \{ 2|\gamma(m)| - \xi(m) \} \quad (4.2.4)$$

$$\xi(m) = \sum_{k=m}^{m+L-1} |r(k)|^2 + |r(k+N)|^2 \quad (4.2.5)$$

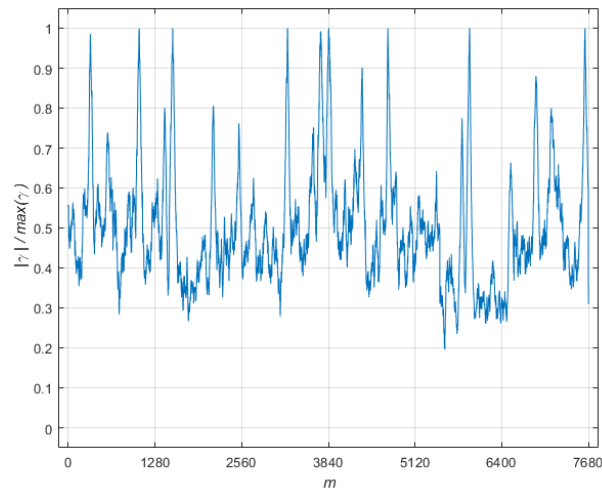
Poslední použitou metodou pro upřesnění hodnot θ (a následně ε) bylo průměrování. U OFDM se stejnými OI je nejvhodnější perioda pro průměrování délka symbolu (N_{fft}) s OI. Při signálech LTE je nejmenší průměrovatelný (periodicky se opakující) úsek ten, který pozůstává se sedmice špiček funkce γ ²⁹. Z výsledné sedmice byl následně proveden odhad toho, který z vrcholů odpovídá delšímu OI (na základě šířky již filtrovaných průběhů). Poté byly průměrovány úseky funkce γ v rámci sedmice, a to již s ohledem na to, že jeden z úseků je delší. Výsledná funkce γ , ze které byly odečítány hodnoty θ a ε již tím pádem měla délku, odpovídající délce symbolu s OI.

²⁸ Při šířce pásma 10 MHz jde o 1096, resp. 1104 vzorků viz tabulka 3.2.2

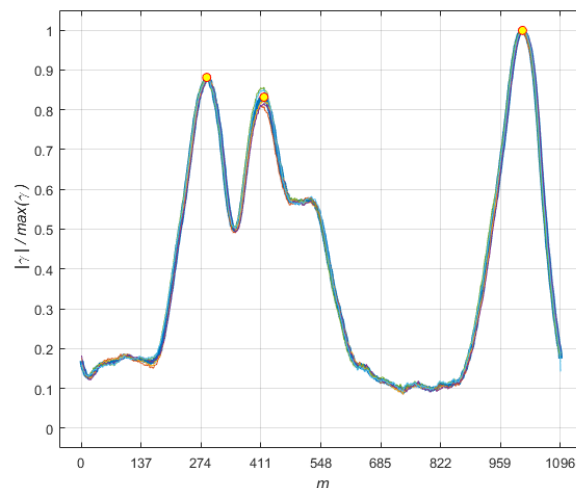
²⁹ Jde o úsek, který odpovídá sedmici symbolů s jejich OI, resp. jednomu slotu (0,5 ms).



Obrázek 4.2.5: Funkce γ , vypočtená z měřeného signálu LTE operátora Vodafone. Na obrázku je zobrazeno a barevně odlišeno vícero úseků, které spolu odpovídají době 10 ms (140 symbolů)



Obrázek 4.2.6: Data z obrázku 4.2.5 po průměrování, odpovídající 7 symbolům³⁰

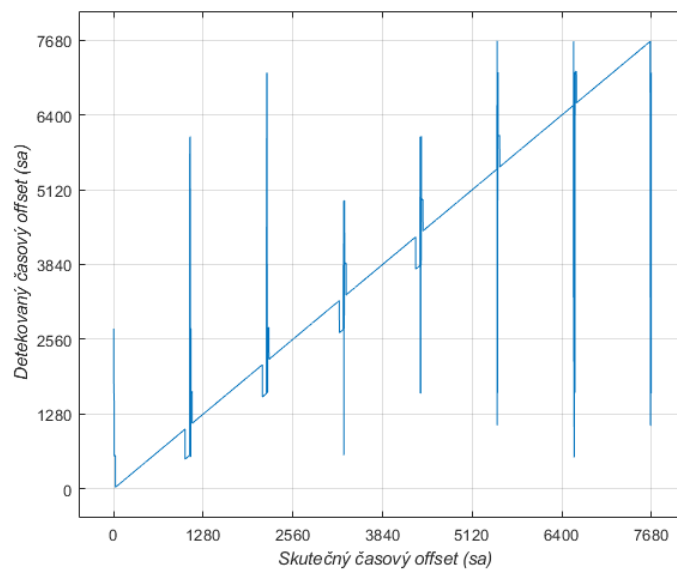


Obrázek 4.2.7: Výsledná funkce γ , na kterou byly aplikovány vztahy (4.2.1), (4.2.4) a (4.2.5). Po srovnání s obrázkem 4.2.5 lze vidět vliv dvou průměrování na výslednou podobu funkce γ . Žlutě jsou označeny tři body, které odpovídají trojici zachycených stanic.

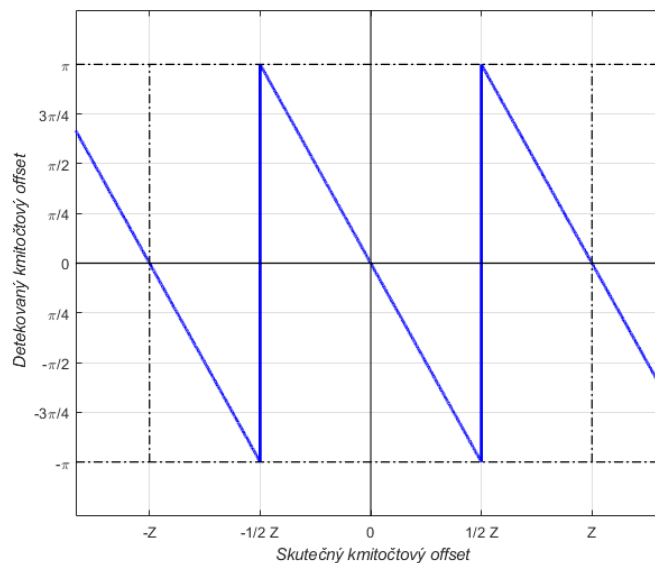
³⁰ Pro pásmo 10 MHz jde při daném vzorkovacím kmitočtu o 7680 vzorků, viz tabulka 3.2.2

Kritériem detekce vrcholů na obrázku 4.2.7 je prominence daného vrcholu 25 % maximální hodnoty. Dráhové rozdíly jsou pro zobrazený případ 2,5, 11,5 a 14,1 km (1 vzorek odpovídá přibližně 19,5 m). Kritérium prominence se na průměrovaných datech ukázalo jako vhodnější, než jiné metody (například CFAR [23]).

Na základě výše uvedeného postupu lze u přijatého signálu kompenzovat časový a kmitočtový offset. U časového offsetu mohou nastat vlivem skládání posunutých sekvencí funkce γ při průměrování chyby v detekci θ . Nejhorší možný případ pro 7 symbolů je zobrazen na obrázku 4.2.8.



Obrázek 4.2.8: Převodní charakteristika detekce hodnoty θ pro nejhorší případ, který obsahuje přibližně 9,1 % nesprávných (neopravitelných) hodnot.



Obrázek 4.2.9: Převodní charakteristika detekce kmitočtového offsetu, parametr Z na ose x představuje podíl f_s a N_{fft} , který odpovídá hodnotě Δf

Detekce kmitočtového offsetu a její přesnost je dána přesností hodnoty θ , jak je patrné ze vztahu (4.2.3). Schopnost detekovat a opravit kmitočtový offset je u OFDM omezená „skokem“ na další subnosnou, viz obrázek 3.1.5. Vztah (4.2.6) popisuje maximální detekovatelný kmitočtový offset f_{ofMAX} (pro šířku pásma 10 MHz jde o hodnotu 7,5 kHz). Maximální hodnota kmitočtového offsetu vysílající eNB je dle příslušné normy [21] $\pm 0,05 \text{ ppm}^{31}$. Na základě hodnot θ a ε , získaných z výše uvedeného postupu, lze opravit přijatý signál dle vztahu (4.2.7).

$$f_{ofMAX} = \frac{\Delta f}{2} = \frac{f_s}{N_{fft}} \quad (4.2.6)$$

$$s_K(k) = s(k) \cdot e^{j2\pi k \frac{-f_e}{f_s}} \quad (4.2.7)$$

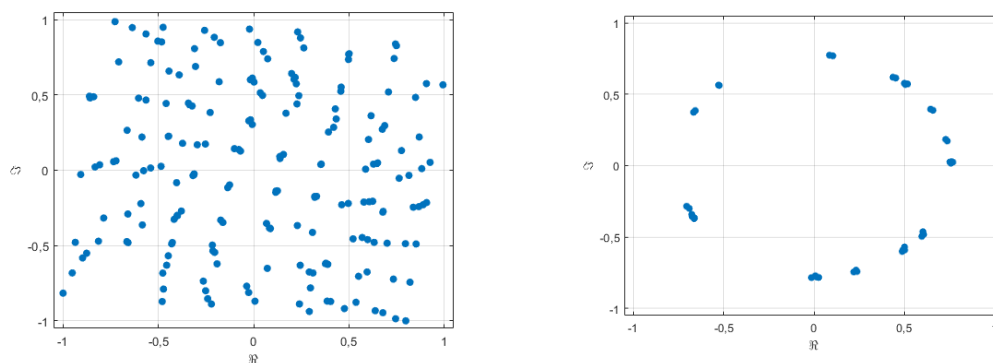
Kde $s(k)$ je přijatý signál

$s_K(k)$ je signál s kompenzovaným offsetem

f_e je odhadovaná hodnota kmitočtového offsetu

f_s je vzorkovací kmitočet

Z opraveného signálu $s_K(k)$ lze při znalosti hodnoty θ a respektování odhadnutých pozic dlouhých OI vybrat úseky, odpovídající jednotlivým symbolům (již bez OI). Po provedení FFT jsou výstupem operace kanálové symboly pro jeden symbol přes všechny subnosné³². Příklad konstelace z měření signálu z generátoru je na obrázku 4.2.10. Konstelace vlevo představuje výsledek FFT po oříznutí krajních (prázdných) subnosných (a vyjmutí stejnosměrné složky). Pro demonstraci byl vybrán symbol, ve kterém byl detekovaný PSS. Konstelace vpravo na obrázku 4.2.10 zobrazuje tentýž symbol po odstranění všech ostatních subnosných³³.



Obrázek 4.2.10: Příklad konstelace signálu pro jeden symbol, vlevo jsou vykresleny aktivní (nemulové) subnosné, vpravo 62 subnosných z okolí stejnosměrné složky (PSS).

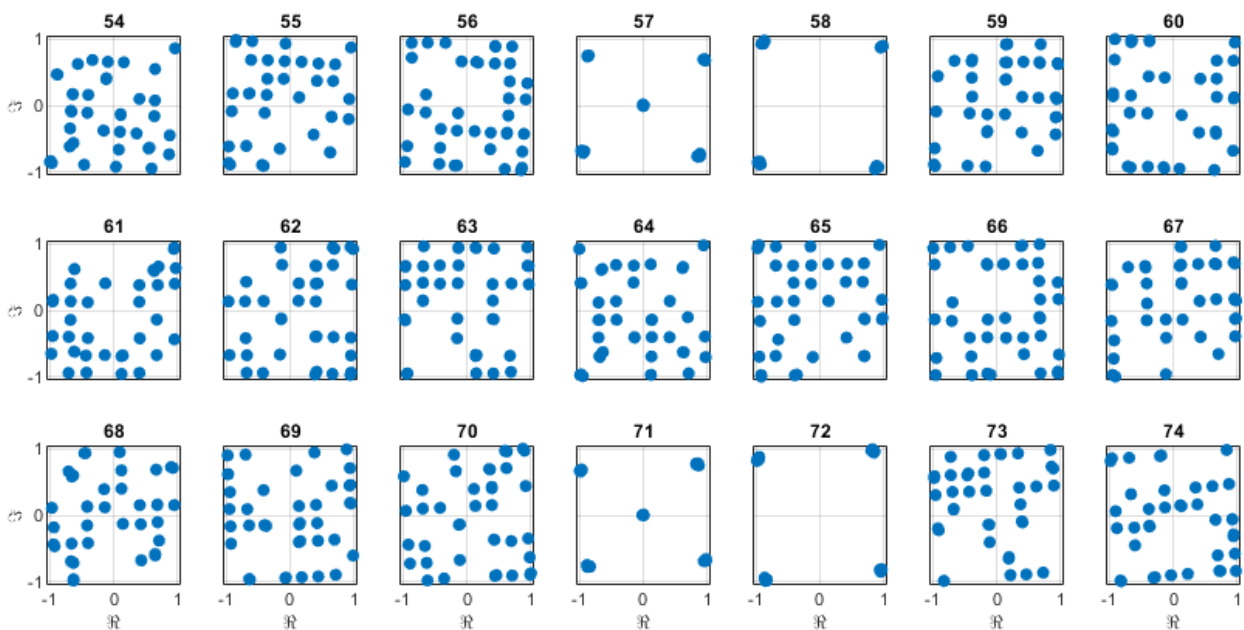
³¹ Pro analyzovaná pásma jde o hodnoty 39,8, 40,3 a 40,8 Hz, viz hodnoty nosných kmitočtů na obrázku 3.1.6

³² Tyto modulace se mohou na jednotlivých subnosných lišit, v zobrazeném symbolu se nacházejí modulace 64 QAM a sekvence PSS (viz obrázek 3.2.8).

³³ $1024 - 2 \cdot (212 + 269) = 62 \rightarrow$ subnosných

4.3 Identifikace stanic

Výsledkem zpracování přijatého signálu z předchozích kapitol je sada symbolů, na kterých byla po odstranění OI provedena FFT. Poté je nezbytné z každého symbolu odstranit ty subnosné, na kterých nejsou mapovány SS (tedy všechny kromě 31 z každé strany stejnosměrné složky). Několik takto ořezaných symbolů je znázorněných na obrázku 4.3.1. Oříznutí 94 % subnosných je příčinou toho, že konstelace na obrázku 4.3.1 nejsou úplné (nestihnou proběhnout všechny stavy dané modulace, a v konstelacích tedy nejsou zastoupeny všechny možné hodnoty kanálových symbolů). Na základě srovnání s obrázkem 3.2.6 lze symboly č. 57 a 71 prohlásit za symboly, odpovídající PDCCH (CRS). Zpětně lze ověřit i časový odstup vysílání těchto signálů – 2 sloty po 7 symbolů $\rightarrow 57 + 7 + 7 = 71$.



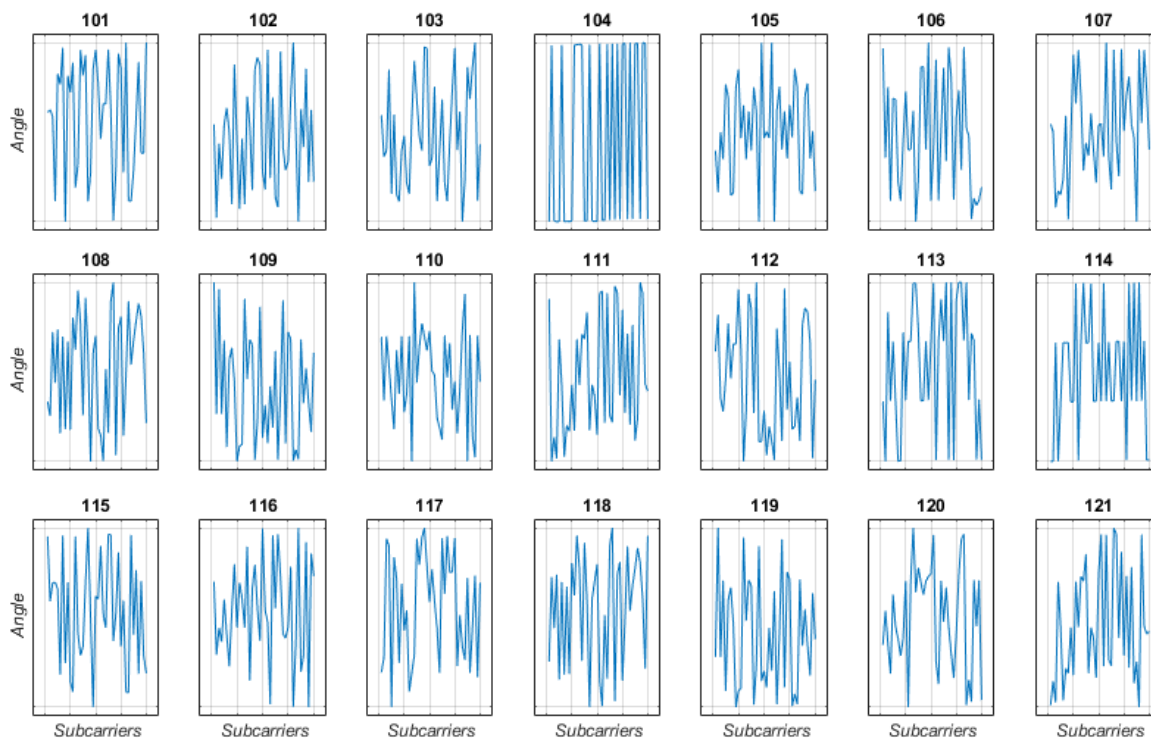
Obrázek 4.3.1: Sekvence symbolů měřeného signálu z generátoru po oříznutí 962 subnosných z celkového počtu 1024. Číslo nad konstelací označuje časové pořadí analyzovaného symbolu.

Při detekci SS bylo využito dvou faktů, plynoucích z kapitol 3.2.8 a 3.2.10:

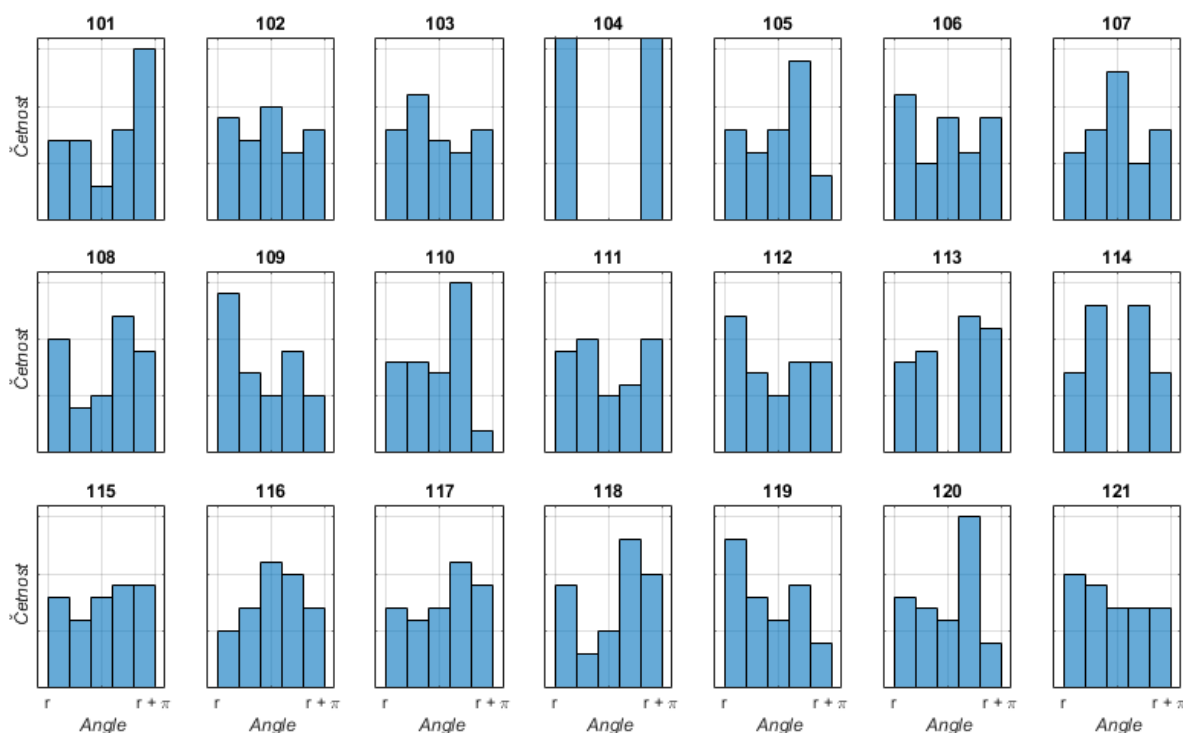
1. SSS je vysílán v čase před PSS, který následuje bezprostředně po něm
2. SSS je jediný signál v celé zdrojové mřížce, který je modulován modulací BPSK³⁴

Druhý z bodů lze přeformulovat tak, že SSS je ve zdrojové mřížce jediný signál, kterého fáze se mění pouze v rámci dvou hodnot, kterých rozdíl je π . Toto kritérium pro detekci SSS má výhodu necitlivosti na zbytkový fázový offset, který je patrný například na obrázku 4.2.10 a 4.3.1. Grafické znázornění vyhodnocování této podmínky je na obrázcích 4.3.2 a 4.3.3.

³⁴ Všechny ostatní (datové a řídicí signály) používají modulaci s vyšším počtem stavů, než 2 (i referenční signály, vztah (3.2.22), resp. (3.2.23) vede k výstupním kanálovým symbolům, odpovídajících modulaci QPSK)



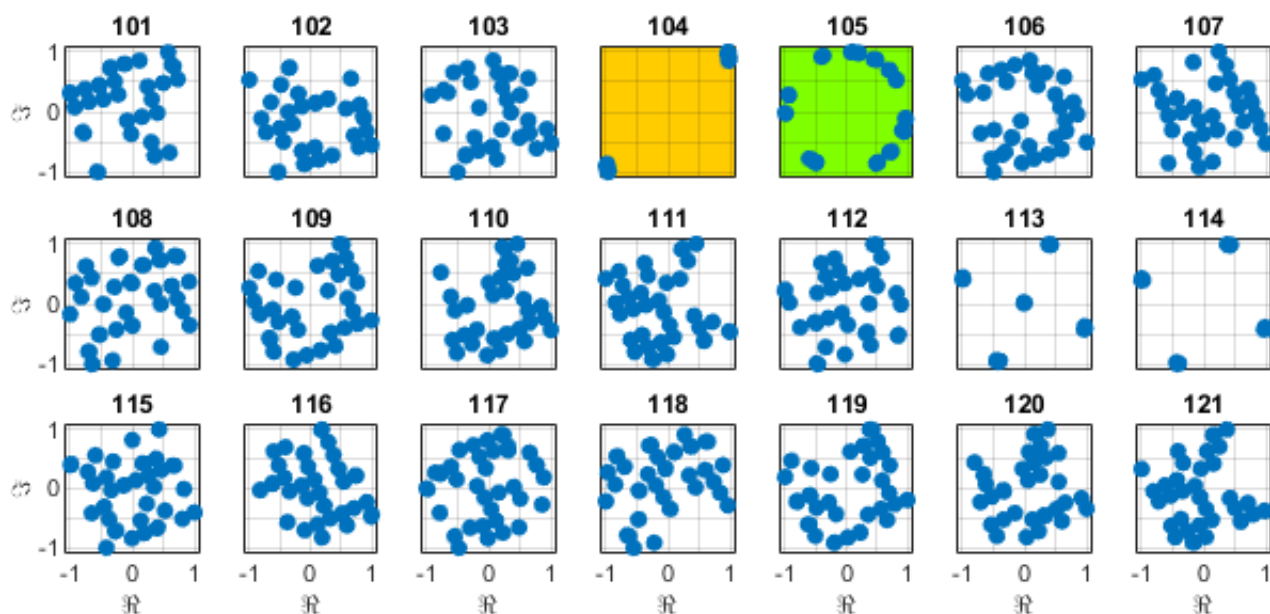
Obrázek 4.3.2: Příklad vyhodnocování podmínky detekce BPSK modulace SSS pomocí hodnot fáze analyzovaných symbolů (resp. počtem její stavů). Hodnoty na ose y jsou normovány k maximu.



Obrázek 4.3.3: Příklad vyhodnocování podmínky detekce SSS pomocí histogramu hodnot fáze z obrázku 4.3.2. Pro účel grafického srovnání jsou hodnoty na ose x vztaheny k bodu „ r “, který odpovídá minimální fázi pro daný symbol³⁵, a počet hodnot histogramů je pevně nastaven na 5 (osa x).

³⁵ Jedná se o kompenzaci zbytkového kmitočtového offsetu, který se pro každý symbol jemně liší.

Na obrázcích 4.3.2 a 4.3.3 lze vidět, že symbol, který s největší pravděpodobností obsahuje SSS (modulaci PBSK) se nachází na pozici číslo 104. Tuto detekci potvrzují i histogramy na pozicích 113 a 114, které odpovídají 4 stavové QPSK (PDCCH symboly).



Obrázek 4.3.4: Část analyzovaných symbolů, sloužících k odhadu Cell Id, PSS a SSS jsou barevně označeny dle obrázků 3.2.5 a 3.2.6. Fázovou rotaci způsobuje zbytkový časový offset.

Dalším krokem zpracování signálu je odhad Cell Id z detekovaných PSS a SSS. Detekce SSS byla popsána v předchozím textu, PSS je detekován na základě faktu, že následuje bezprostředně po SSS. Tvorba Cell Id je definována vztahem (3.2.1). Na obrázku 4.3.4 je zobrazena analyzovaná sekvence po kompenzaci časového a kmitočtového offsetu, odstranění OI, FFT a výřezu stejnosměrné složky a subnosných bez SS.

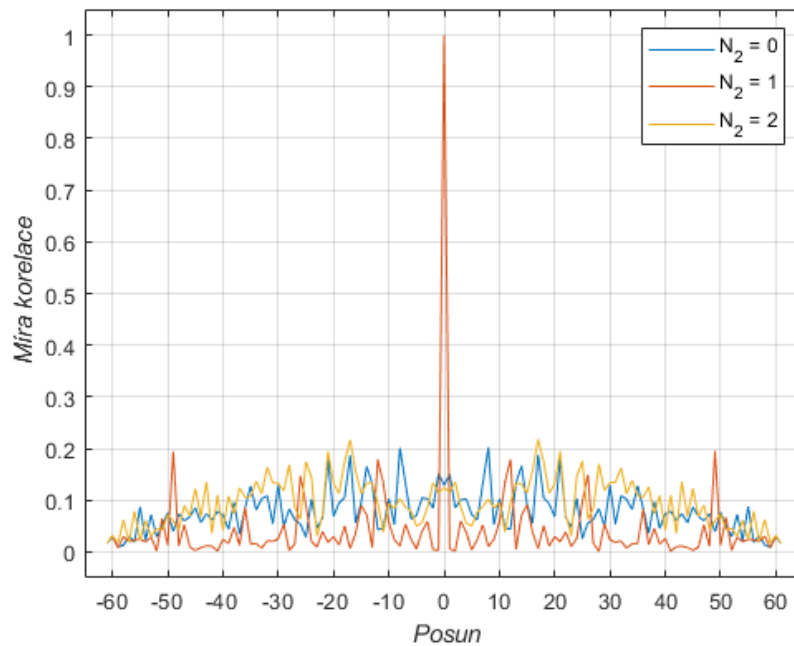
Takto získána data jsou transformována do vektorů o délce 62 vzorků³⁶. Odhad hodnoty Cell Id probíhá na základě výsledků korelace PSS a SSS se všemi možnými podobami signálů dle definice (viz kapitoly 3.2.9 a 3.2.10). Počet těchto sekvencí je v případě PSS 3 a 1008 v případě SSS³⁷. Vzhledem k počtu sekvencí PSS a skutečnosti, že všechny sekvence, se kterými je přijatá sekvence SSS korelována, mají obor hodnot ± 1 , nezpůsobí zbytkový fázový offset problém detekce, a to až do natočení konstelace o 90° (natočení symbolu č. 104 a 105 na obrázku 4.3.4 je přibližně 41°).

Stanovení Cell Id je demonstrováno pro signál přijímaný N210 z generátoru R & S. Na obrázku 4.3.5 jsou zobrazeny korelační funkce přijatého signálu se třemi varianty PSS. Z každé korelační funkce má při vzájemném srovnávání smysl uvažovat pouze hodnotu pro nulový posuv.

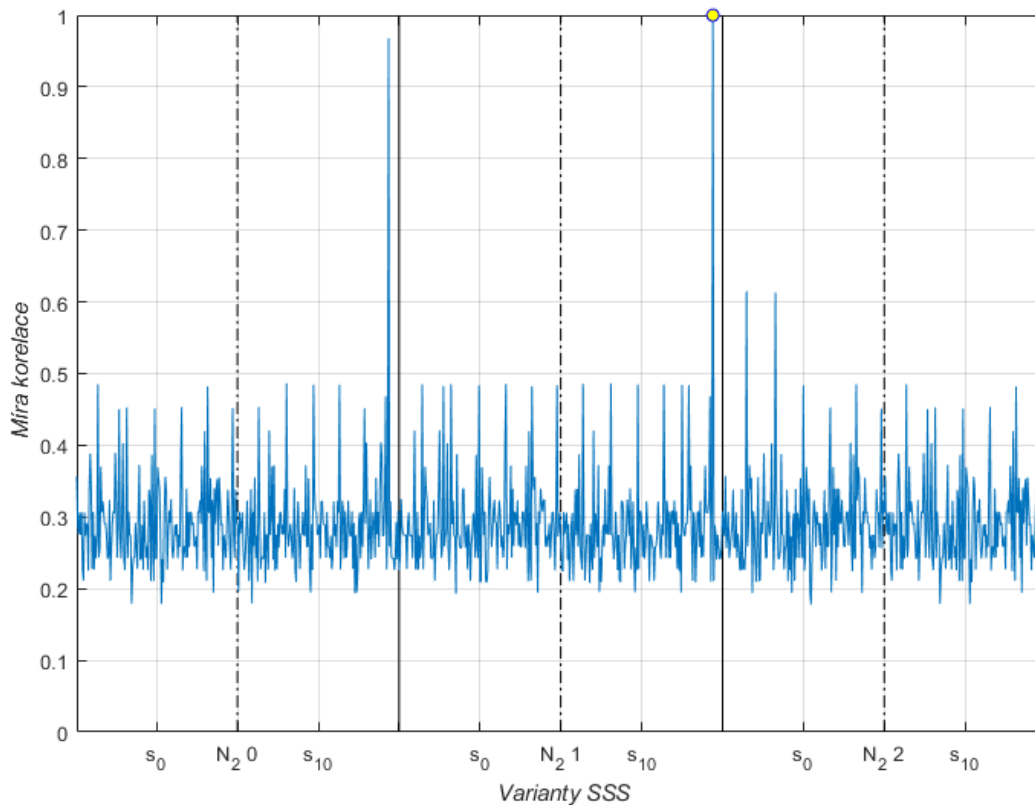
³⁶ P/S převod, viz obrázek 3.1.4

³⁷ Viz kapitola 3.2.10, poznámka 19

Případ maximální hodnoty (ze všech třech korelací) jinde, než v bodě posuvu odpovídající 0 by byl indikací výběru nesprávných subnosných. Korelace SSS se všemi možnostmi je na obrázku 4.3.6.



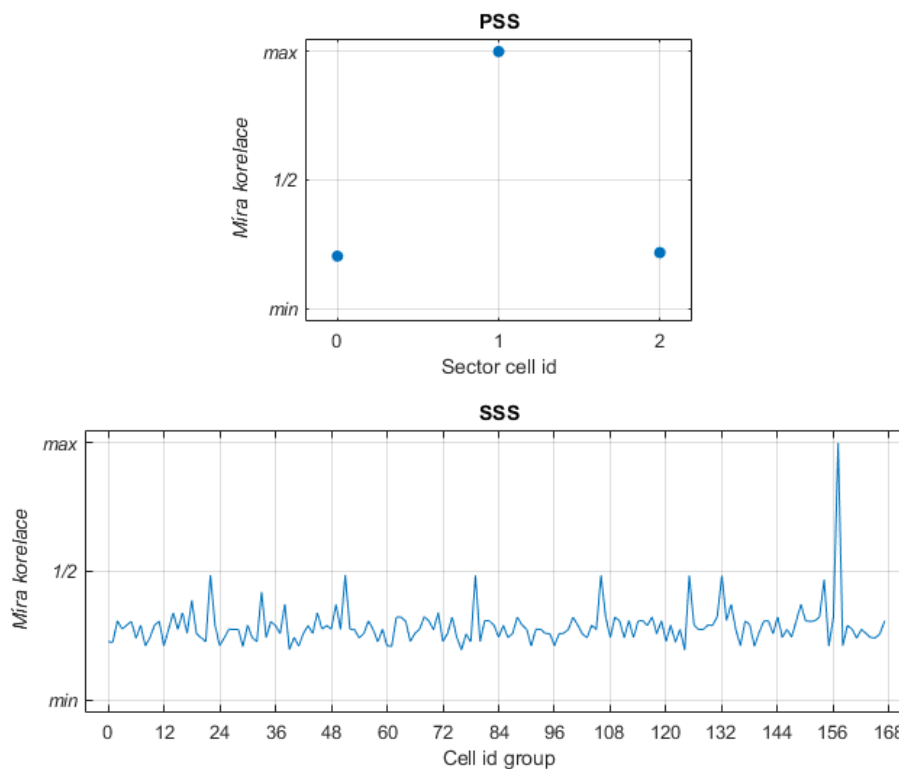
Obrázek 4.3.5: Korelace přijatého PSS se třemi možnými varianty



Obrázek 4.3.6: Korelace přijatého SSS. Vzhledem k tomu, že v SSS jsou kromě $N_{ID}^{(1)}$ zakódovány i $N_{ID}^{(2)}$ a číslo slotu, jsou tyto možnosti odděleny vertikálními čarami. Nepřerušované čáry oddělují možnosti pro různé $N_{ID}^{(2)}$, a přerušované čáry oddělují pro každou z možností dvojici variant pro číslo slotu 0, nebo 10. Každý ze segmentů mezi černými čarami má šířku 168 (možností). Žlutý bod označuje maximum funkce.

Na základě detekce, znázorněné na obrázku 4.3.6 lze zpětně odhadnout tři informace, obsažené v SSS - $N_{ID}^{(1)}$, $N_{ID}^{(2)}$ a číslo slotu. Indikovanou hodnotu $N_{ID}^{(2)}$ lze zpětně porovnat s hodnotou, vzešlou z korelace PSS (v případě z obrázků 4.3.5 a 4.3.6 se obě hodnoty shodují na $N_{ID}^{(2)}=1$). Druhá obsažená informace (číslo slotu) byla ověřena vyhledáním nejbližší³⁸ dvojice PSS a SSS a provedením všech výše popsaných korelací. Chybná indikace by nastala v případě shody čísel slotů pro SS z jednoho rámce, viz obrázky 3.2.1, 3.2.5 a 3.2.6.

Posledním krokem odhadu Cell Id je detekce $N_{ID}^{(1)}$, která je provedena vyjmutím segmentu z obrázku 4.3.6, odpovídajícímu (v tomto případě) $N_{ID}^{(2)} = 1$ a slotu 10 a odečtením místa maxima. Šířka jednoho segmentu je 168, viz vztah (3.2.1). Odhady obou hodnot jsou vykresleny na obrázku 4.3.7.



Obrázek 4.3.7: Určení Cell Id pomocí odhadu parametrů $N_{ID}^{(2)}$ -Sector Cell Id a $N_{ID}^{(1)}$ – Cell Id group

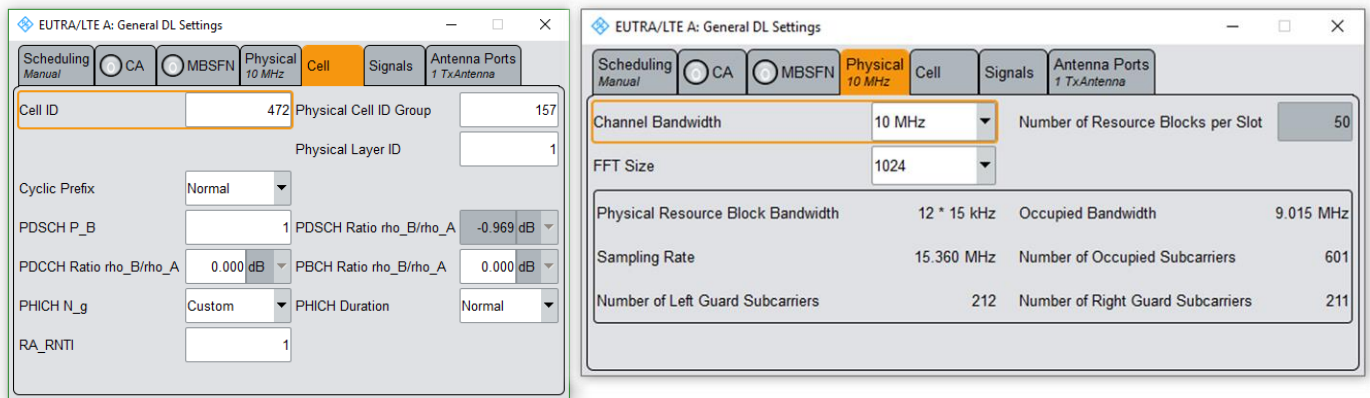
Nejvyšší hodnoty korelace jsou ty, které odpovídají $N_{ID}^{(2)} = 1$ a $N_{ID}^{(1)} = 157$. Výslední odhad Cell Id dle vztahu (3.2.1) je $3 \cdot 157 + 1 = 471 + 1 = 472$. Celý algoritmus měření byl koncipován na práci se signálem, kterého délka odpovídá 10 ms (po příjmu vzorků z N210 a převzorkování jde o 153 600 vzorků). Tato doba zaručuje zachycení dvou dvojic SS, ze kterých je možné odhad Cell Id vzájemně zkontrolovat.

³⁸ 5 ms, resp. 70 symbolů

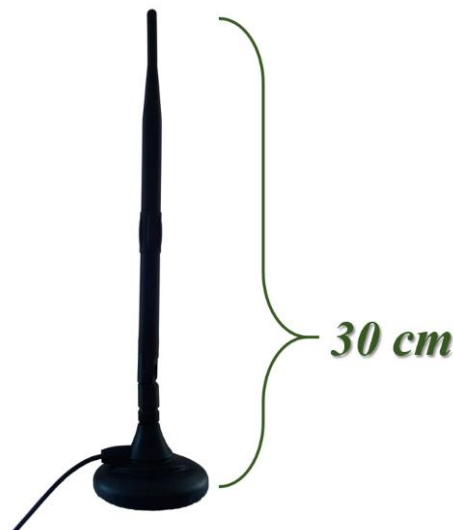
Signál, na kterém byl odhad *Cell Id* demonstrován, byl generován generátorem R & S. Zvolená modulace pro data byla 64 QAM, viz kapitola 4.1, poznámka 26. Část z nastavení, odpovídajících pokusnému signálu, je na obrázku 4.3.8.

Výše popsané algoritmy odhadu *Cell Id* byly otestovány na signálech, definovaných na základě modelů, obsažených v kapitole 6 specifikace TS 36.141 [44] jako testovací signály pro základnové stanice³⁹. Signály byly vysílány generátorem R & S a přijímány přijímačem Ettus N210.

Při měření signálů mobilních operátorů byla použita $\frac{\lambda}{4}$ prutová anténa, zobrazena na obrázku 4.3.9.



Obrázek 4.3.8: Ukázka nastavovaných parametrů vysílání generátoru R & S (1/2)

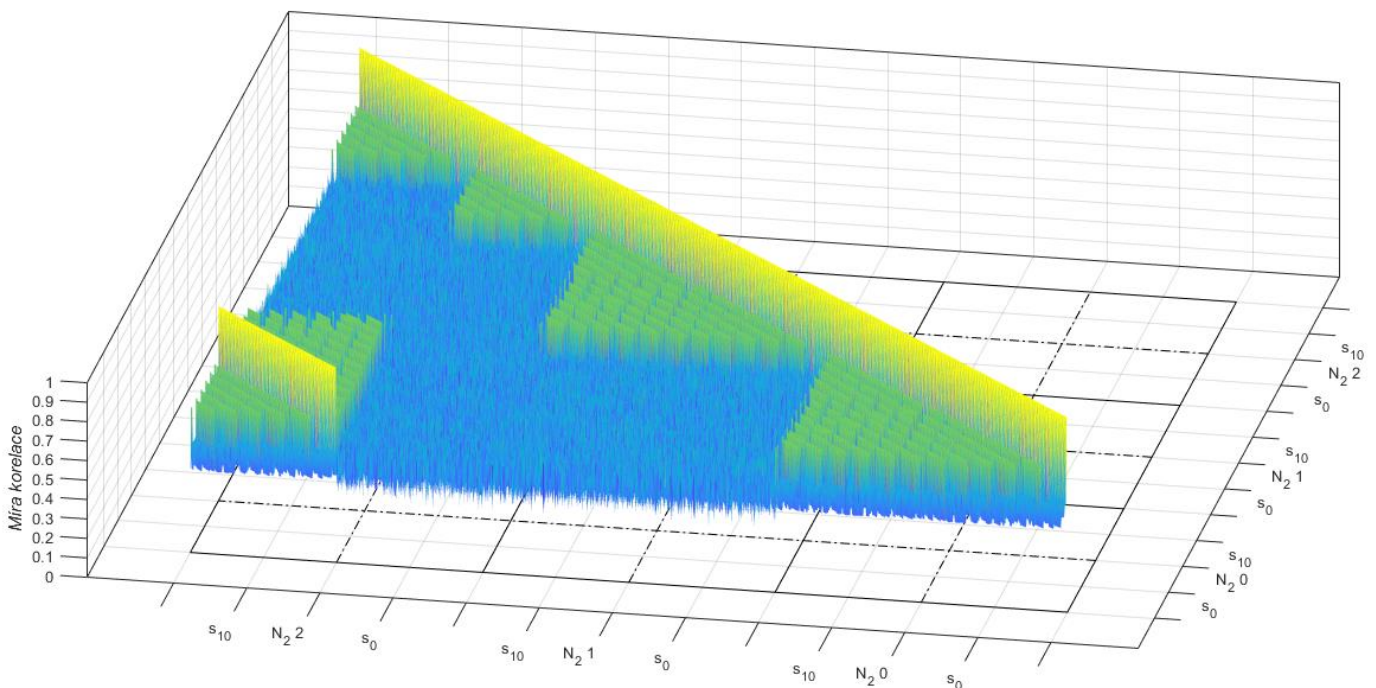


Obrázek 4.3.9: Anténa, použitá při měření signálu operátorů

³⁹ Použitá verze 16.1.0 (publikováno 5. dubna 2019)

4.4 Problém detekce Cell Id Group

Z předešlých kapitol vyplývá, že hodnotu *Sector Cell Id* $N_{ID}^{(2)}$ lze verifikovat z dvojice symbolů, (protože je kódována v PSS i SSS). Hodnota *Cell Id Group* $N_{ID}^{(1)}$ je získávána pouze ze SSS. V případě nesprávného určení hodnoty $N_{ID}^{(1)}$ se chyba dle vztahu (3.2.1) automaticky ztrojnásobí. Je tedy nutné, aby všech 1008 možností SSS vykazovalo minimální vzájemnou korelaci, viz kapitola 3.2.10, poznámka 19. Tyto vzájemné korelace jsou vykresleny na obrázku 4.4.1. Diagonální žlutá čára odpovídá porovnání signálu se sebou samým. Ostatní možnosti se pohybují v okolí hodnot 0,3, s výjimkou čtverce, který je vymezen korelací signálů s $N_{ID}^{(2)} = 0$ a číslem slotu 0 se signály s $N_{ID}^{(2)} = 2$ a číslem slotu 10.

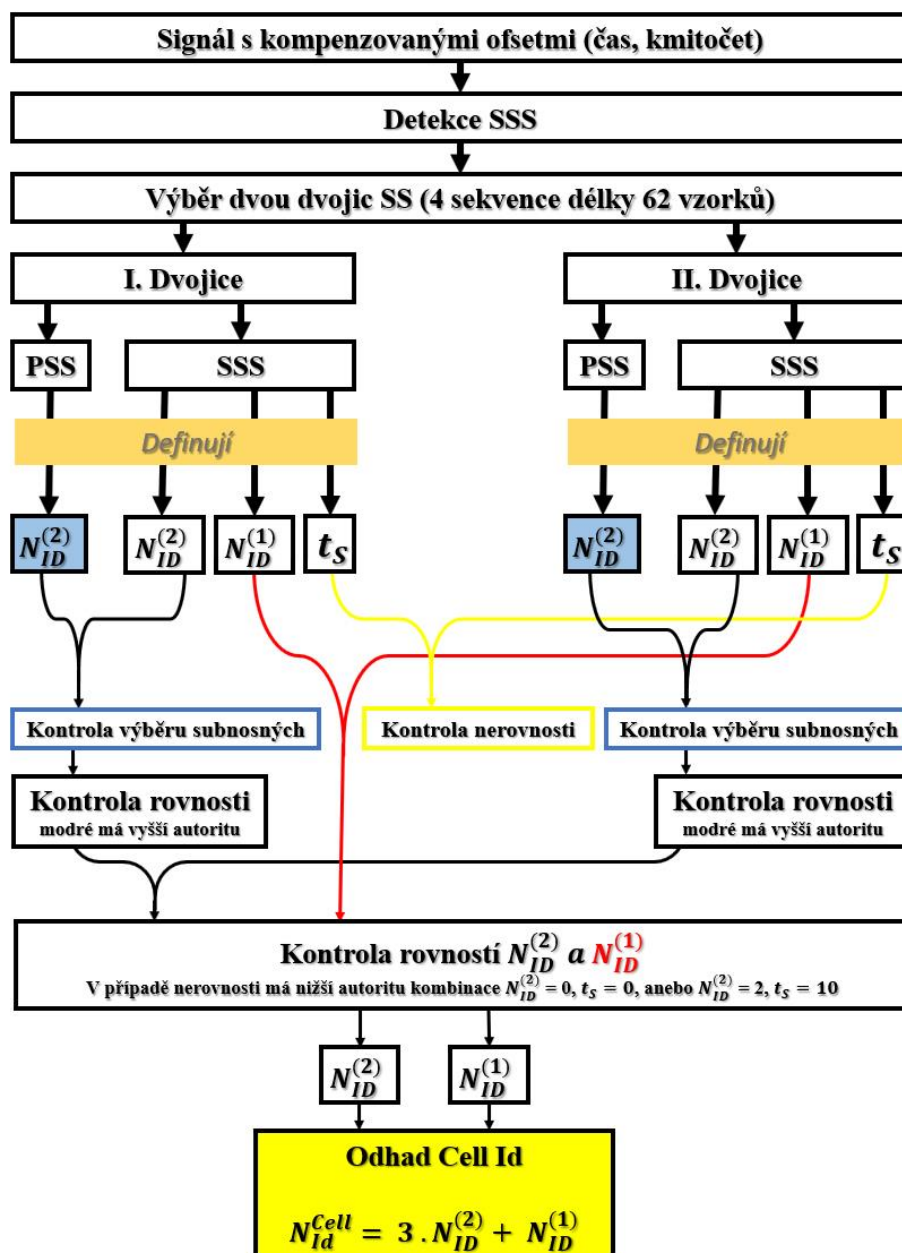


Obrázek 4.4.1: Vzájemné korelace všech možných průběhů SSS. Pro každou ze třech hodnot $N_{ID}^{(2)}$ je vykresleno 2 · 168 možností pro slot 0 a slot 10 (analogicky, jako na obrázku 4.3.6). Žlutá čára je diagonála – korelace rovná 1. Vodící čáry leží v rovině s „výškou“ 0, hodnoty korelací se pohybují od hodnot přibližně 0,25 (modře), 0,4 (zeleně) až do 1.

Nesprávná detekce, která je demonstrována na obrázku 4.4.1, byla v algoritmech řešena srovnáváním dílčích výsledků a příjmem takového počtu vzorků, který obsahuje alespoň dvě dvojice SS. Tím pádem byla hodnota $N_{ID}^{(2)}$ detekována 4 krát a hodnota $N_{ID}^{(1)}$ 2 krát. Následující kroky popisují opravný algoritmus hodnot výsledného odhadu *Cell Id*:

1. Detekce hodnoty $N_{ID}^{(2)}$ z PSS.
2. Detekce hodnoty $N_{ID}^{(1)}$, $N_{ID}^{(2)}$ a čísla slotu z SSS. V případě neshod hodnot $N_{ID}^{(2)}$ je hodnota opravena dle výsledku z bodu 1 (chybná detekce by znamenala nasměrování do nesprávného pole na obrázku 4.3.6).

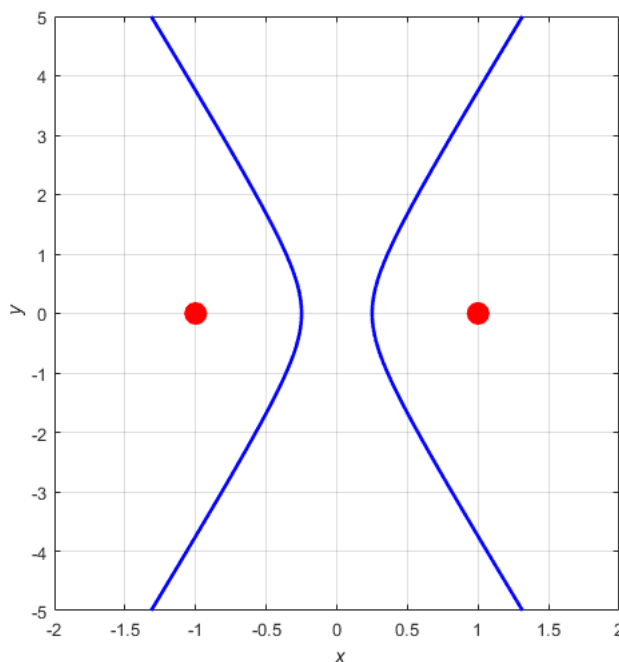
3. Opakování bodů 1 a 2 pro druhou dvojici SS.
4. Detekce hodnoty $N_{ID}^{(2)}$ z PSS (pro druhý zachycený symbol) a srovnání s výsledkem hodnoty z bodu 1 (v případě neshody nelze rozhodnout, která z hodnot je správná).
5. Identický postup, jako v bodě 2.
6. Kontrola, zda se neshodují detekovaná čísla slotů (musí být kombinace 0 a 10, nebo naopak).
7. Výběr hodnoty $N_{ID}^{(1)}$. V případě neshody výsledků z bodů 2 a 5 je vybrána hodnota z té sekvence, u které nebyl rozpor v detekci $N_{ID}^{(2)}$ z PSS a ze SSS. Pokud jsou rozpory v obou hodnotách $N_{ID}^{(1)}$, a zároveň jedna z nich je z kombinace $N_{ID}^{(1)}$, $N_{ID}^{(2)}$ a čísla slotu náchylnější k chybné detekci (viz obrázek 4.4.1), vybere se druhá hodnota.
8. Výpočet hodnoty $Cell Id$ dle vztahu (3.2.1)



Obrázek 4.4.2: Grafické znázornění algoritmu detekce a opravy hodnoty $Cell Id$

4.5 Odhad polohy přijímače

Odhad polohy přijímače byl realizován metodou TDoA, viz kapitola 3. Po identifikaci n stanic je počet vzájemných časových (dráhových) rozdílů $\binom{n}{2}$, viz obrázky 4.2.5, resp. 4.2.7. Ve dvoudimenzionálním prostoru je hyperbola definována jako množina bodů konstantního rozdílu vzdáleností od dvojice pevně daných bodů – ohnisek. V případě sítě, tvořené vzájemně synchronizovanými vysíláči⁴⁰ je hyperbola množina všech bodů, odpovídajících možným polohám přijímače. Vysílací stanice se nacházejí v ohniscích hyperboly. V případě, kdy je možné na straně přijímače stanovit znaménko časového rozdílu (tedy nejen samotnou hodnotu, ale i to, ze kterého vysílače dorazil signál dřív) je množina všech možných poloh přijímače pouze jedna z křivek hyperboly.



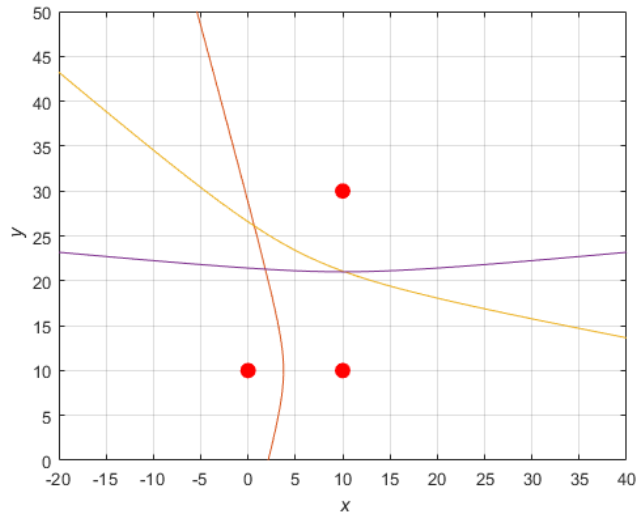
Obrázek 4.5.1: Ukázka hyperboly definované dráhovým rozdílem 0,5, resp. -0,5 jednotek. Souřadnice ohnisek jsou $[-1, 0]$ a $[1, 0]$.

Z obrázku 4.5.1 lze vyčíst omezující podmínku TDoA metody – nelze určovat polohu přijímače na tzv. prodloužené základně⁴¹, tedy místech „za“ vysíláči. Na obrázku 4.5.2 je demonstrován příklad určování polohy v síti s vysíláči se souřadnicemi $[0, 10]$, $[10, 10]$ a $[10, 30]$. Vzájemné dráhové rozdíly jsou -2,5, 6 a 2 (jednotek). Plocha „trojúhelníku“, vymezeného hyperbolami, představuje aproximaci polohy přijímače (v ideálním případě je tato plocha minimální). Další měření dalších dvojic vysílačů mohou tuto plochu dále zmenšovat. Pro nalezení souřadnic eNb byla použita volně dostupná databáze⁴² z internetové stránky *GSMweb* [45]. Pro vykreslování byly použity upravené mapové podklady ze stránky *Mapy.cz* a programu *Google Earth*.

⁴⁰ V případě LTE i na jednom kmitočtu – SFN (Single Frequency Network)

⁴¹ Na obrázku 4.5.1 jde o body, ležící na půlprímkách, definovaných: $x \in (-\infty; -1) \cup (1; \infty)$; $y = 0$

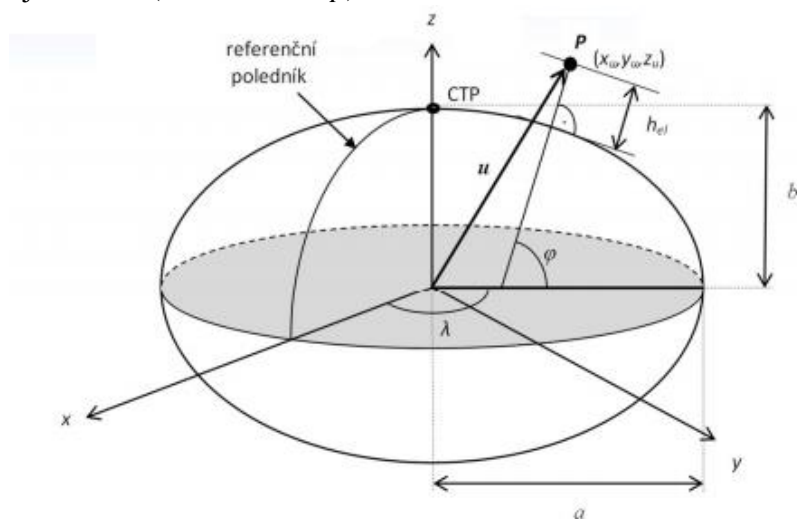
⁴² Nejedná se o oficiální databázi



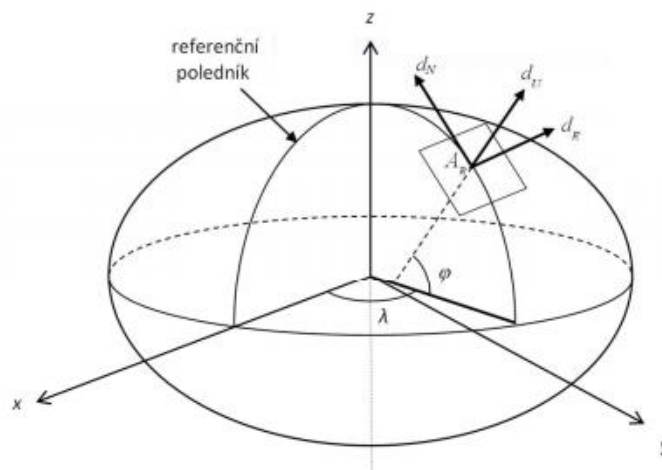
Obrázek 4.5.2: Ukázka odhadu polohy přijímače z trojice měření (křivek)

4.5.1 Souřadnicové systémy

Dráhový rozdíl byl stanovován ve vzorcích a následně přepočten na metry. Na obrázcích 4.5.5 a 4.5.6 jsou vykresleny polohy vybraných stanic z databázi. Použitá souřadnicová soustava je definována zeměpisnou šířkou φ , zeměpisnou délkou λ a nadmořskou výškou h . Tyto geodetické souřadnice bývají označovány LLA (*Latitude, Longitude, Altitude*). Jedná se o souřadnicový systém pevně svázaný se zemským tělesem, tzv. ECEF (*Earth-Centered, Earth-Fixed*), mající svůj počátek ve středu Země. Dalším souřadnicovým systémem je kartézský, který je spolu s LLA znázorněn na obrázku 4.5.3. Parametry a a b jsou hlavní a vedlejší poloosy referenčního elipsoidu, který představuje aproximaci povrchu Země, zohledňující například zploštění v oblasti pólů. Kartézský souřadnicový systém může být definován bodem na povrchu referenčního elipsoidu (A_R na obrázku 4.5.4). Osa d_E je orientována na východ, d_N na sever a d_U v kolmém směru na referenční elipsoid v místě A_R . Tento souřadnicový systém bývá označován jako ENU (*East, North, Up*).

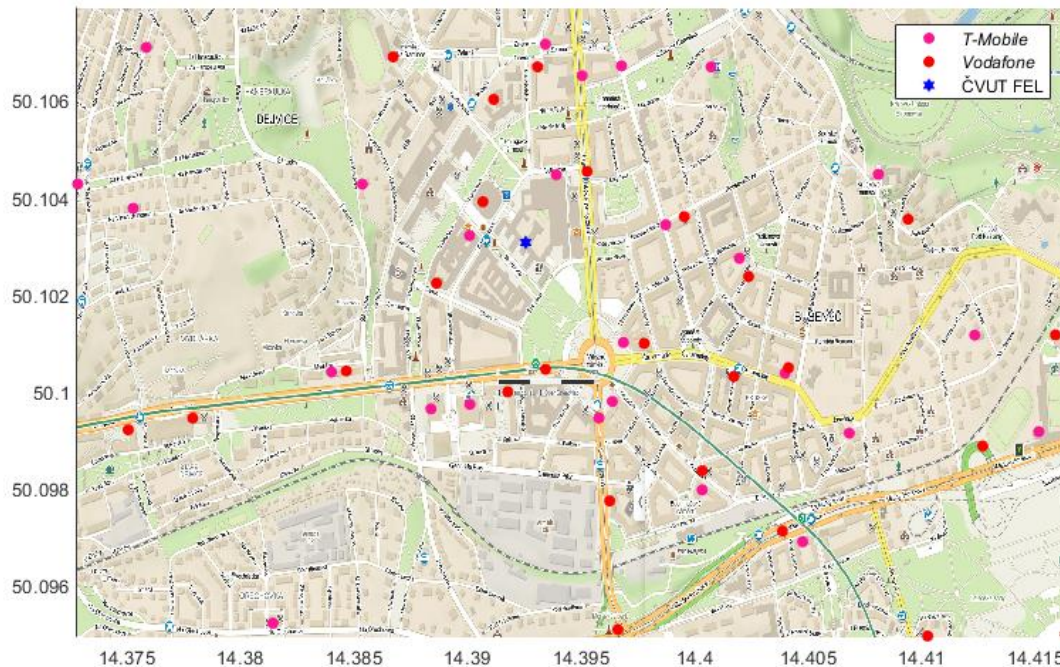


Obrázek 4.5.3: Kartézské a geodetické souřadnice, vykreslené na referenčním elipsoidu. CTP označuje střední zemský pól (Conventional Terrestrial Pole). Převzato z [54].



Obrázek 4.5.4: Znáornění lokální soustavy na referenčním elipsoidu, převzato z [54].

Pro výpočet 2D hyperbol v kartézských souřadnicích bylo použito souřadnicového systému ENU s referencí v místě skutečné polohy přijímače⁴³. Transformaci souřadnic stanic z databází ze stránky *GSMweb* [45] provádí skript z kapitoly 7.2.17. Všechny dále uváděné výsledky a mapové podklady jsou definovány referenčním elipsoidem WGS84. Přesné hodnoty (například délky poloos), kterými je referenční elipsoid WGS84 jednoznačně definován, lze nalézt v [61].



Obrázek 4.5.5: Vykreslení databází stanic operátorů T-Mobile a Vodafone na základě dat z [45]. Hodnoty na ose x odpovídají severní šířce, na ose y východní délce (obojí ve stupních). Mapový podklad pochází ze stránky „*mapy.cz*“. Příložený datový nosič obsahuje soubory *.kml*, ve kterých jsou uloženy jednotlivé databáze. Pro zobrazení těchto souborů lze použít například program *Google Earth*, viz obrázek 4.5.6.

⁴³ Řádek 2 v příloze 7.2, proměnná „PP“. Výška referenčního bodu byla dle [55] stanovena na 240 m.



Obrázek 4.5.6: Databáze z obrázku 4.5.5, vykresleny na mapovém podkladu programu Google Earth. Bílé značky označují stanice operátora Vodafone, červeně jsou vyznačeny stanice operátora T-Mobile.

4.5.2 Výpočet polohy

Jak již bylo uvedeno, výsledkem měření u metody TDoA je časový rozdíl dorazivších signálů od dvojice vysílačů. Po opakování měření na dalších dvojicích a převedení časových rozdílů na dráhové lze výslednou polohu popsat vztahem (4.5.1).

$$d_{i,j} = \|r_i - r\| - \|r_j - r\| \quad (4.5.1)$$

Vektor r obsahuje hledané souřadnice přijímače, vektory r_i a r_j jsou souřadnice dvojice vysílačů, kterým odpovídá dráhový rozdíl $d_{i,j}$. Počet takto získaných rovnic je $\binom{n}{2}$, kde n představuje počet zachycených vysílačů.

Tyto rovnice jsou lineárně nezávislé (vzhledem k tomu, že jde o měření rozdílů, musí platit $i \neq j$).

Nalezení vektoru r , splňujícího rovnost (4.5.1) představuje nelineární problém, který je řešitelný aproximací. V reálných podmínkách je potřeba počítat s chybami hodnot naměřených vzdáleností $d_{i,j}$. Tato odchylka je vyjádřena vztahem (4.5.2).

$$\theta_{i,j}(r) = d_{i,j} - \hat{d}_{i,j}(r) \quad (4.5.2)$$

Hodnota odchylky $\Theta_{i,j}$ je definována rozdílem měřené vzdálenosti $d_{i,j}$ a hodnoty, spočtené pro vektor odhadu polohy \mathbf{r} . V případě nulových hodnot prvků Θ odpovídá dosazovaná hodnota vektoru \mathbf{r} hledaným souřadnicím přijímače.

Délka vektoru Θ je $\binom{n}{2}$ – počet možností výběru dvojic z množiny, obsahující n prvků.

Dosazovaný vektor \mathbf{r} lze rozdělit na predikční a korekční část, viz vztah (4.5.3). Predikční část je hodnota \mathbf{r} , spočtená v předchozí iteraci, korekční část bývá nalezena vhodným algoritmem⁴⁴. Tyto algoritmy se liší rizikem divergence a rychlostí konvergence k hledanému řešení, které je dáno tím, zda daná metoda počítá nejen se směrem spádu, ale i změnou jeho rychlostí⁴⁵. Vztah (4.5.4) je vyjádřením korekce gradientní metodou, která hledá lokální minimum funkce Θ prostřednictvím prvního členu Taylorova rozvoje. Vztah (4.5.5) definuje Gauss – Newtonovu metodu [37], [56].

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_c + \mathbf{r}_p \quad (4.5.3)$$

$$\mathbf{r}_c = \lambda \mathbf{J}^T(\mathbf{r}) \Theta(\mathbf{r}) \quad (4.5.4)$$

$$\mathbf{r}_c = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \Theta(\mathbf{r}) \quad (4.5.5)$$

Kde \mathbf{J} je matice derivací (Jacobiho matice) a λ koeficient metody. Vztahy (4.5.7) a (4.5.8) vyjadřují parciální derivace vektoru Θ (oba členy rozdílu ve vztahu (4.5.8) jsou jednotkové vektory).

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \Theta(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{r}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Theta_{1,2}}{\partial \mathbf{r}} \\ \vdots \\ \frac{\partial \Theta_{n-1,n}}{\partial \mathbf{r}} \end{pmatrix} \quad (4.5.6)$$

$$\frac{\partial \Theta_{i,j}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} (d_{i,j} - \hat{d}_{i,j}(\mathbf{r})) \quad (4.5.7)$$

$$\frac{\partial \Theta_{i,j}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left(d_{i,j} - \sqrt{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r})^2} + \sqrt{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r})^2} \right) \quad (4.5.8)$$

$$\frac{\partial \Theta_{i,j}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}}{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}\|} - \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}}{\|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}\|} \quad (4.5.8)$$

Ve vybraných případech lze použít alternativní metodu hledání polohy přijímače, která je z implementačního hlediska jednodušší: Na základě změřených časových rozdílů a známých poloh vysílačů jsou pro všechna měření vyčísleny vybrané úseky hyperbol. Jejich průsečíky definují určitou plochu. Hledaná poloha přijímače se v takovém případě nachází v místě těžiště této plochy.

Rozdíl výsledných poloh přijímače se pro optimalizační a „těžiskovou“ metodu pohyboval v řádech jednotek %.

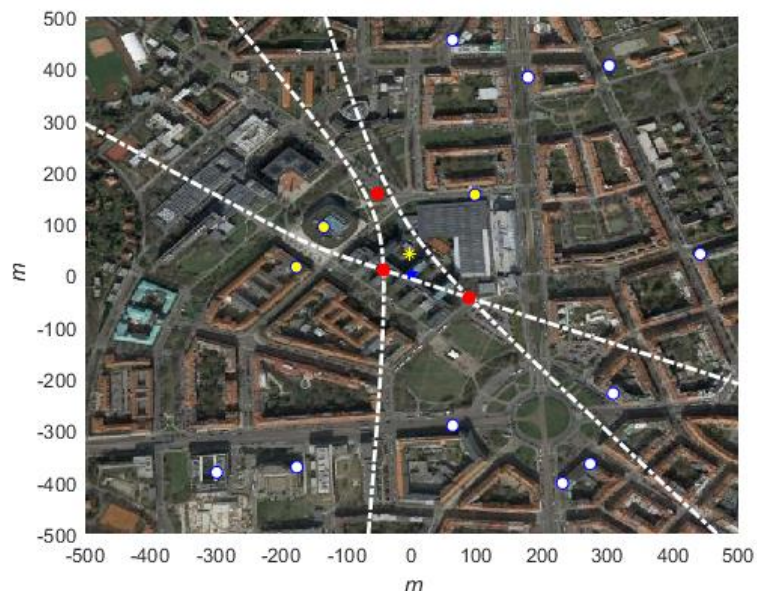
⁴⁴ Například gradientní metoda, Gauss – Newtonova metoda, nebo Levenberg – Marquadtova metoda.

⁴⁵ Vyjádřitelnou druhou derivací dané funkce.

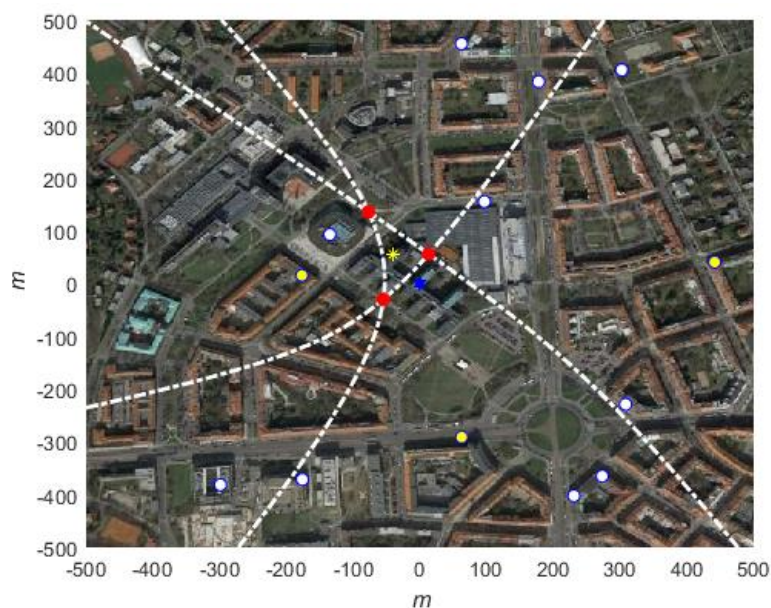
4.5.3 Příjem signálů mobilních operátorů

V této kapitole jsou prezentovány výsledky třech vybraných experimentů s *USRP* přijímačem *Ettus N210* a prutovou anténou (viz obrázek 4.3.9). Přijímač se nacházel v VIII. patře bloku B2 budovy ČVUT FEL v Dejvicích (anténa byla umístěná vně budovy na ochozu).

Skutečná poloha přijímače byla $50^{\circ} 6' 11,02''$ S a $14^{\circ} 23' 33,16''$ V. Tato poloha byla brána jako reference pro soustavu ENU na následujících obrázcích (bod $[0, 0]$).

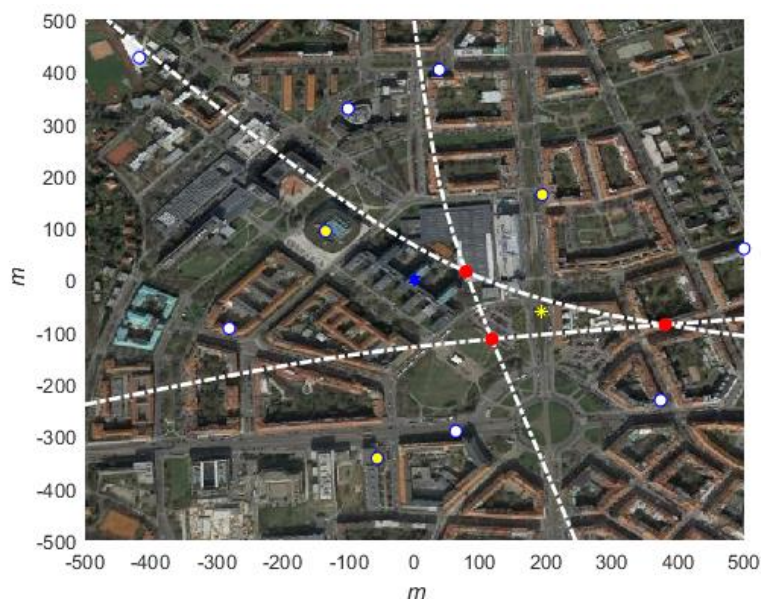


Obrázek 4.5.7: Vypočtené hyperboly pro měření signálů operátora T-Mobile. Stanice z databáze jsou znázorněny bílými značkami s modrým okrajem, žlutě jsou vyznačeny ty, kterých signál byl zachycen a použit při výpočtu hyperbol. Červené body označují průsečíky hyperbol⁴⁶. Modrá hvězda označuje skutečnou polohu (souřadnice $[0, 0]$), žlutá hvězda označuje místo odhadované polohy přijímače. Osy jsou ve směru západ-východ (osa x) a jih-sever (osa y). Čísla na osách jsou v metrech.



Obrázek 4.5.8: Odhad polohy přijímače na základě měření stanic operátora T-Mobile (skutečná poloha přijímače leží v tomto případě vně plochy, vymezené hyperbolami).

⁴⁶ Pokud se hyperboly neprotínají, je vyhledán bod pro nejmenší vzájemnou vzdálenost hyperbol, viz 7.2.16.

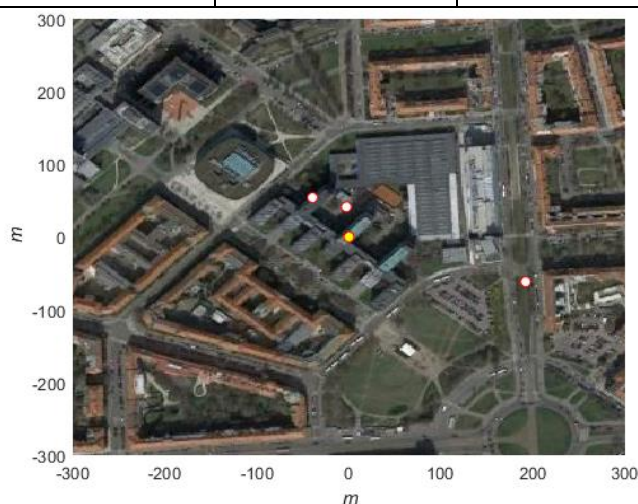


Obrázek 4.5.9: Odhad polohy přijímače na základě měření sítě LTE operátora Vodafone

Vybrané ukázky měření jsou případy, kdy nalezené hodnoty *Cell Id* (a souřadnice) odpovídaly skutečnosti. V případech přiřazení nesprávných souřadnic k danému *Cell Id* se hodnoty výsledného odhadu polohy lišili o více než 500 m od skutečné polohy. Tento problém je popsán v kapitole 5.1. Odhady polohy jsou vykresleny na obrázku 4.5.10.

Tabulka 4.5.1: Výsledky vybraných experimentů:

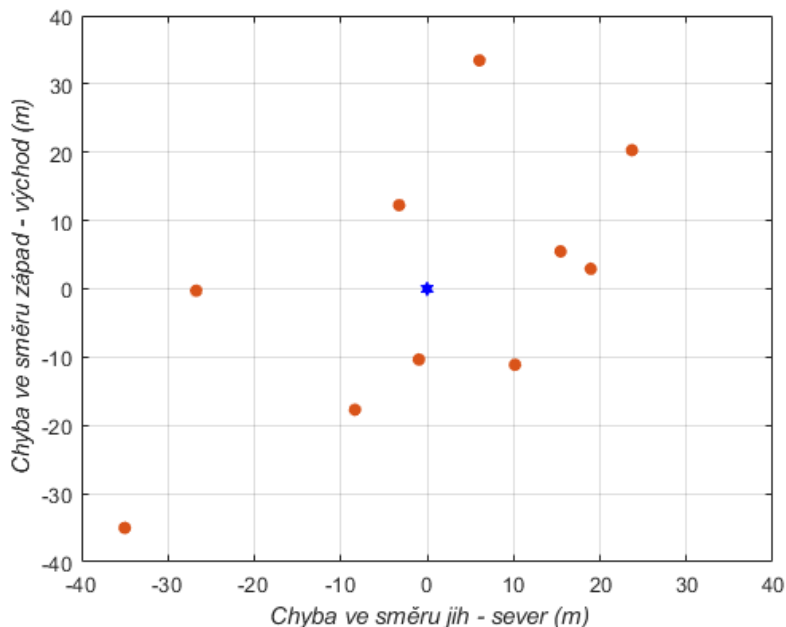
<i>Znázornění na obrázku číslo</i>	<i>Nalezené hodnoty Cell Id⁴⁷</i>	<i>Mobilní operátor</i>	<i>Souřadnice odhadu polohy</i>	<i>Rozdíl odhadu a skutečnosti (m)</i>
4.5.7	161, 62 a 25	T – Mobile	[-2,7; 41,5]	41,55
4.5.8	13, 24 a 1	T – Mobile	[-39,5; 54,2]	67,04
4.5.9	24, 102 a 267	Vodafone	[191,83; -61,58]	201,47



Obrázek 4.5.10: Odhad polohy přijímače (bílá) pro 3 vybrané experimenty. Skutečná poloha je znázorněna žlutě.

⁴⁷ Řazeno vzestupně od nejbližší stanice (výkonově nejvyšší na přijímači).

Další prezentované výsledky jsou z měření signálů sítě operátora T-Mobile, který na základě žádosti poskytl přesné souřadnice vybraných stanic. Algoritmus detekce stanic (7.2.4) byl následně upraven⁴⁸ tak, aby selektivně sledoval pouze tyto stanice. Na následujícím obrázku jsou prezentovány výsledky těchto měření.



Obrázek 4.5.11: Chyby odhadu polohy pro 10 vybraných měření signálu operátora T-Mobile

Vzhledem k tomu, že informace o polohách stanic byly poskytnuty pouze pro potřeby ČVUT, nejsou dále vykresleny polohy stanic (tak jako na obrázcích 4.5.7 až 4.5.9).

Pro desítku vybraných měření z obrázku 4.5.11 je nejmenší odchylka 10,4 m a největší odchylka 50 m. Průměrná odchylka od skutečné polohy (hvězda uprostřed) je 23,5 m.

⁴⁸ Dle předpokládaných hodnot časových rozdílů byla na měřený signál aplikována „šablona“, filtrující signály pouze z vybraných stanic

5 Shrnutí dosažených výsledků a další vývoj

5.1 Chybové aspekty experimentů

Měření reálných signálů českých mobilních operátorů odhalilo problematická místa využití signálů LTE jako „*signals of opportunity*“. Kromě citlivosti signálů na přesnost časové a kmitočtové synchronizace jsou dále uvedeny dva nejvýznamnější problémy:

1. Problémy, pramenící z nerovnoměrného pokrytí:

- Při návrhu sítí LTE je uvažována hustota uživatelů (resp. hustota poptávky). Na jejím základě jsou pak vybírána místa pro eNB. To umožňuje dosáhnout lepšího pokrytí problematických míst, jakými jsou například ulice ve městech, dopravní liniové stavby v členitém terénu apod. U měření reálných signálů ale často docházelo k příjmu, resp. rozeznání maximálně trojice stanic (viz obrázky 4.2.5, resp. 4.2.7). Čím nižší byl přijímaný výkon, tím více byla degradovaná i samotná špička, odpovídající dané stanici ve funkci $\gamma(m)$. Vzhledem k faktu, že plánování poloh stanic je plně v kompetenci příslušného operátora, není možné vždy garantovat spolehlivé zachycení minimální trojice stanic pro TDoA metodu. V řadě případů totiž lze zabezpečit požadované pokrytí signálem LTE takovým množstvím (a konstelací) stanic, které není vhodné pro určování polohy metodou TDoA. Příkladem jsou například zmiňované liniové stavby, ve kterých případě se přijímač vzhledem k vysílačům často nachází v blízkosti tzv. prodloužené základny, viz obrázek 4.5.1.
- Dalším faktorem byla hodnota vzorkovacího kmitočtu, odpovídající příslušné normě (viz tabulka 3.2.2). Při šířce pásma 10 MHz odpovídá jeden vzorek vzdálenosti přibližně 19,5 m (lze vyjádřit i tak, že chyba na úrovni jednoho vzorku odpovídá chybě 19,5 m). U stanic s nižším přijímaným výkonem⁴⁹ byly špičky, odpovídající těmto stanicím příliš „rozechvělé“ na to, aby bylo možné průměrováním korigovat jejich pozici. Situace je demonstrována ve videu na přiloženém datovém nosiči.
- V případě přibližně stejné vzdálenosti dvou stanic od přijímače docházelo jednak ke střídavé detekci buď jedné, nebo dvou blízkých špiček a k chybné detekci *Cell Id*. Pro nejhorší případ nastává možnost, kdy zařízení detekuje jeden synchronizační signál z jedné stanice a další z jiné. Dle vztahu (3.2.1) pak bývá hodnota *Cell Id* stanovena nesprávně. Tento problém (tzv. *Ghost Cell Id detection*) je v příloze 7.2.4 částečně kompenzován separací hodnot časových a kmitočtových ofsetů pro jednotlivé stanice⁵⁰.

⁴⁹ Hodnoty v okolí -85 dBm.

⁵⁰ V sítích mobilních operátorů je detekce *Ghost Cell Id* kompenzována volbou *Cell Id*, například rozdělení všech 504 adres na segmenty, ze kterých jsou všechny adresy přidělovány např. buď jen pro venkov, pro města apod. Důsledkem je mj. nerovnoměrná distribuce adres. (poznámka pokračuje na další stránce)

Při experimentech s přijímačem umístěným v bloku B2 budovy FEL ČVUT v Dejvicích docházelo nejčastěji k záměně od přijímače přibližně stejně vzdálených stanic v ulici Velflíkova a na střeše budovy VŠCHT naproti NTK⁵¹.

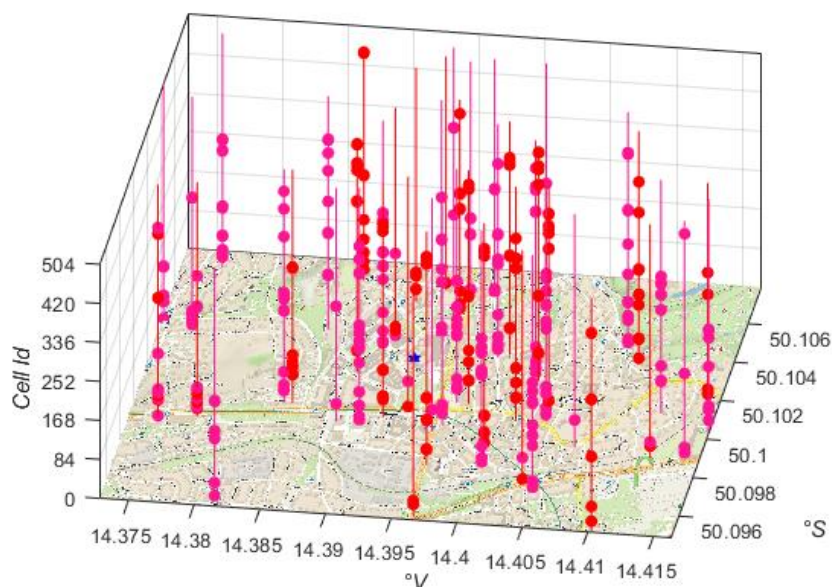
- Kombinace nerovnoměrné hustoty stanic (viz obrázek 4.5.5) a výše uvedené komplikace při detekci stejně vzdálených dvojic způsobovaly tendenci posunu odhadu polohy směrem na východ, protože ve čtvrti Bubeneč je větší hustota stanic než na Hanspaulce.

2. Problémy, vzniknuvší použitými databázemi stanic:

- Vzhledem k faktu, že použitá databáze je tvořena „amatérsky“ a není oficiálním dokumentem, vydaným příslušnými místy, jsou polohy některých eNB uvedeny s chybou až 10 m. Polohy vybraných stanic byly v databázi ručně zpřesněny dle pozorování.
- Použitá databáze je tvořena na základě měření, u kterých nejsou uvedena data, kdy byla provedena. To způsobuje, že k jedné poloze je přiřazen větší počet stanic (hodnot *Cell Id*). Tento jev je pravděpodobně způsoben občasnou výměnou *Cell Id* v rámci sítě (při vypínání stanic apod.) a byl částečně kompenzován tím, že při nalezení většího množství souřadnic, odpovídající dané *Cell Id* byly vybrány ty souřadnice, kterých vzdálenost k poslední poloze byla nejmenší, viz 7.2.13. Vzhledem k četnosti opakování *Cell Id* je nevyhnutné, aby přijímač zpočátku disponoval aspoň přibližnou informací o své poloze (rozsah 2 km).
- Další nepřesnosti způsobovalo to, že použité databáze neobsahují údaje o výšce dané stanice (pouze zeměpisnou šířku a délku). U vybraných eNB byla výška dle [55] doplněna ručně, u ostatních byla nastavena empiricky zjištěna hodnota nadmořské výšky 230 m n.m. Přijímač se při experimentech nacházel ve výšce 240 m n.m.
- U operátora T-Mobile bylo z důvodu poskytnutí souřadnic vybraných stanic možné sledovat vliv použité databáze a její přesnosti.
 - V případě použití volně dostupné databáze byly chyby v řádech stovek metrů, nejmenší chyba odhadu polohy byla 42 m (obrázek 4.5.7). Uvádění vícero různých hodnot *Cell Id* pro jednu pozici je demonstrováno na obrázku 5.1.1.
 - Při měření vybraných stanic operátora T-Mobile s přesnými daty se chyba pohybovala v rozsahu 10 – 150 m.Vzhledem k tomu, že byly poskytnuty přesné souřadnice 4 stanic, probíhala všechna měření vždy pro vybranou dvojici (6 možností), nebo trojici (4 možností). Rozdíl pozic jedné dvojice stanic se ukázal být příliš malý k tomu, aby byl spolehlivě detekovatelný.

(pokračování poznámky z předešlé stránky) Uživatelské zařízení, které je do sítě přihlášeno musí těmito informacemi disponovat, v opačném případě by došlo např. ke znemožnění handoveru apod. Přidělování *Cell Id* jednotlivým eNB, resp. relayům je plně v kompetenci provozovatele sítě.

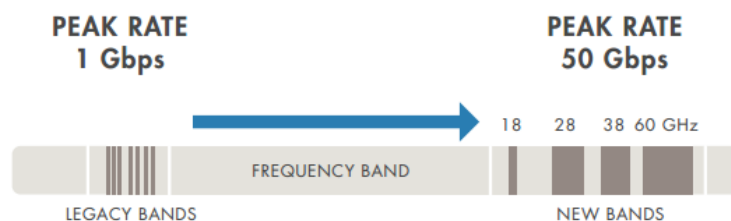
⁵¹ Obě stanice jsou od přijímače vzdušnou čarou vzdáleny ± 190 m.



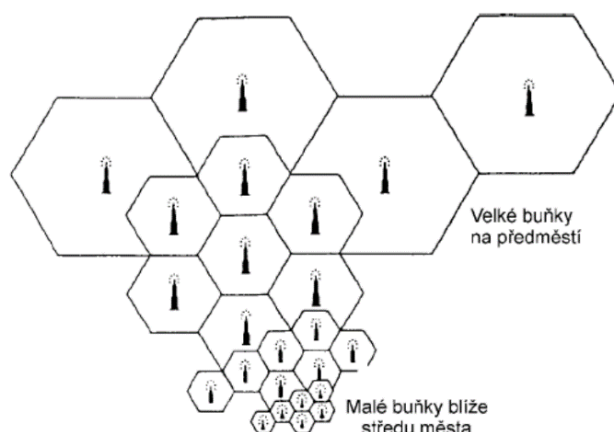
Obrázek 5.1.1: Ilustrace opakujících se hodnot Cell Id pro jednu polohu. Každá unikátní poloha je znázorněná svíslou čarou, jednotlivé body odpovídají hodnotám Cell Id z databáze (osa z). Vykresleno pro operátory T-Mobile (růžově) a Vodafone (červeně) na základě dat z [45].

5.2 Mobilní síť další generace

V současnosti již částečně vyvinutým nástupním systémem LTE je 5G NR (*New Radio*), který taktéž používá OFDM. Ambicí rádiových systémů V. generace je výrazné navýšení celkové přenosové kapacity sítě, navýšení počtu buněk (eNB), a implementace D2D komunikace. Komunikace bude probíhat na vyšších kmitočtech, viz obrázek 5.2.1. Možnost vyššího počtu buněk o různých vysílacích výkonech (různé dosahy) umožňuje plánovat pokrytí sítě dle předpokládané četnosti požadavků uživatelů. Příklad takové sítě je na obrázku 5.2.2. Další změnou oproti IV. generaci je využití směřování svazku anténní řady (*beamforming*).



Obrázek 5.2.1: Kmitočtová pásma systémů IV. a V. generace (*legacy bands a new bands*), [48]



Obrázek 5.2.2: Modelování pokrytí sítě dle hustoty požadavků uživatelů, převzato z [47]

Systémy V. generace částečně vycházejí ze systémů IV. generace. Některé parametry, popisované v předchozích kapitolách jsou upraveny pro účely jednodušší časové a kmitočtové synchronizace. Z hlediska přístupu „*signals of opportunity*“ je podstatné mj. sjednocení dob trvání ochranných intervalů. Počet možností hodnoty Δf je s ohledem na různé velikosti buněk navýšen na pět⁵². Dalším revidovaným parametrem jsou synchronizační signály, které jsou nově vysílány na větším počtu subnosných. I v NR je *Cell Id* definována vztahem (3.2.1), ale vzhledem k odlišnému způsobu generování SSS je počet různých adres 1008 (více např. v [41]).

Oproti LTE je použito identické metody přístupu pro sestupný i vzestupný směr komunikace, umožňující zlepšit výkonové poměry v síti. Je počítáno se širokou škálou využití (senzory, inteligentní automobily apod., viz [51]) a širšími kmitočtovými pásmy⁵³.

Demodulace je usnadněná novým typem referenčního signálu PTRS (*Phase Tracking Reference Sigal*).

Důsledkem popsaných rozdílů je nemožnost zpětné kompatibility sítí IV. a V. generace (5G a LTE). Vzhledem k použití širších vysílacích pásem, robustnějších SS, vyšší plošné hustotě stanic a (hlavně) jednotným délkám ochranných intervalů je proces synchronizace u sítí V. generace jednodušší, než u sítí IV. generace. Z těchto důvodů lze očekávat i přesnější výsledky při určování polohy metodou TDoA.

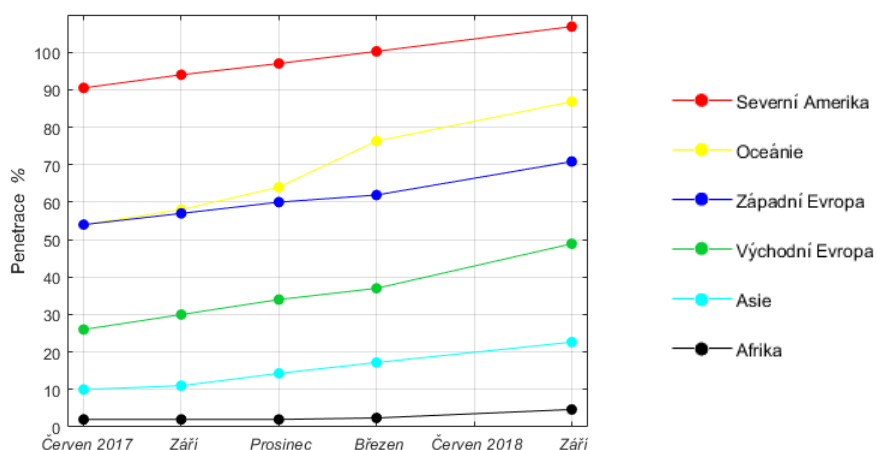
Komerční provoz sítí 5G je v současnosti v Evropě ve vybraných Švýcarských městech⁵⁴ a částečně ve Finsku a Estonsku. Záměr spuštění komerčního provozu v roce 2020 deklarovali mobilní operátoři v Německu, Španělsku, Švédsku, Francii, Velké Británii, Francii, Norsku a Nizozemsku [52].

Vzestupný trend mobilních sítí je ilustrován následujícími obrázky.

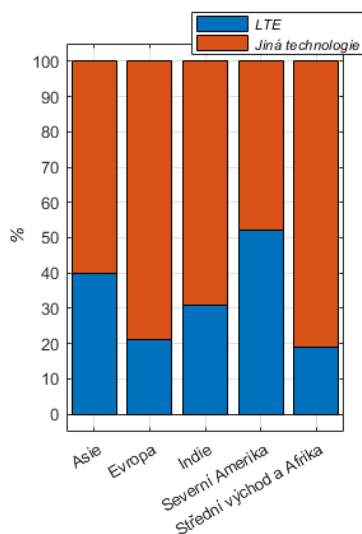
⁵² Konkrétní hodnoty 15, 30, 60, 120 nebo 240 kHz, viz [49] a [50]

⁵³ Pro komunikaci D2D je počítáno i s využitím volně přístupného spektra (tzv. „*unlicensed spectrum*“ [51]).

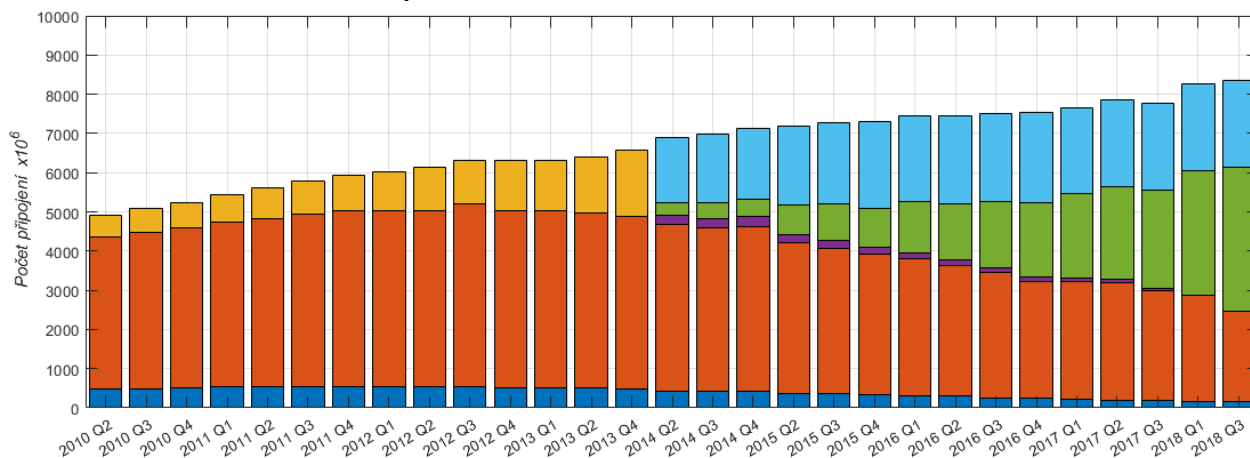
⁵⁴ Operátor Swisscom



Obrázek 5.2.3: Časový vývoj penetrace⁵⁵ sítí LTE. Zpracováno na základě dat z [58].



Obrázek 5.2.4: Procentuální zastoupení LTE jako přístupové metody na internet⁵⁶ pro rok 2017, zpracováno na základě dat z [59].



Obrázek 5.2.5: Globální vývoj počtu bezdrátových připojení. Tmavěmodře je vyznačena technologie CDMA, oranžově GSM, žlutě UMTS, LTE a HSPA, červeně TD-SCDMA⁵⁷, světle modře HSPA, a zeleně LTE – Advanced (v roce 2014 došlo k změnám standardizace, LTE a HSPA jsou od roku 2014 odděleny). Zpracováno na základě dat z [60]

⁵⁵ Penetrace je definována jako podíl unikátních připojení a celkové populace daného regionu.

⁵⁶ Pojmem „Jiná technologie“ zahrnuje hlavně metalická vedení.

⁵⁷ Čínský standard pro sítě III. generace

5.3 Dosažené výsledky a další pokračování

V předešlých kapitolách byly uvedeny významné aspekty sítí LTE z hlediska určování polohy přístupem „*signals of opportunity*“. Poté byly prezentovány vybrané výsledky příjmů signálů. V kapitole 5.1 jsou uvedeny nejvýraznější chybové faktory, částečně pramenící z původu použité databáze⁵⁸.

Na základě výsledků lze konstatovat, že systémy mobilních sítí IV. generace mají potenciál doplnit určování polohy i za přístupu „*signals of opportunity*“. Teoretická přesnost se (v závislosti na hustotě eNB) pohybuje v rozmezí stovek až desítek metrů. Značnou odchylku výsledních hodnot odhadů polohy od skutečné lze vysvětlit nepřesnostmi použitých databází. Dále bylo ověřeno, že v případě poskytnutí databáze stanic přímo mobilními operátory lze předpokládat zvýšení přesnosti odhadu polohy.

Určování polohy přístupem „*signals of opportunity*“ představuje vhodný doplněk k systémům GNSS i vzhledem k tomu, že k vysílání „falešných“ signálů, dle kterých by zařízení detekovalo nesprávnou polohu, je v případě LTE potřeba větší množství sofistikovaného vybavení [53] (než je tomu například u signálů GPS [35]).

S ohledem na změny⁵⁹, přinášených V. generací mobilních sítí lze očekávat zlepšení přesnosti určování polohy pomocí mobilních sítí přístupem „*signals of opportunity*“.

⁵⁸ Možnost alespoň částečného zpřístupnění poloh vybraných stanic je v době psaní této práce předmětem jednání s mobilními operátory.

⁵⁹ Viz kapitola 5.2, nejpodstatnější jsou tyto: nově navržené SSS, PTRS, stejné délky OI, širší pásmo a větší počet menších buněk, tzv. „*ultra-dense network*“.

6 Seznam použité literatury

- [1] Search & Browse Standards. *ETSI* [online]. [cit. 2019-04-20].
Dostupné z: <http://www.etsi.org/standards-search#Pre-definedCollections>
- [2] Deliverable Status. *ETSI* [online]. [cit. 2019-04-20].
Dostupné z: <https://portal.etsi.org/TB/ETSIDeliverableStatus.aspx>
- [3] SAUTER, Martin. *From GSM to LTE: an introduction to mobile networks and mobile broadband*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-66711-8.
- [4] SESIA, Stefania., Issam. TOUFIK a Matthew BAKER. *LTE--the UMTS long term evolution: from theory to practice*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011. ISBN 978-047-0660-256.
- [5] Hein, G. a kol.: The digital TV case – Positioning using signals-of-opportunity based on OFDM modulation. *Inside GNSS*, 2011, 6 (6), pp 54-62.
- [6] *LTE Resource grid* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://niviuk.free.fr/lte_resource_grid.html
- [7] *LTE Resources by Sandesh Dhagle* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://dhagle.in/LTE>
- [8] WEINSTEIN, S. a P. EBERT. Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform. *IEEE Transactions on Communication Technology*. 1971, 19(5), 628-634.
DOI: 10.1109/TCOM.1971.1090705. ISSN 0018-9332
- [9] Geolocation API | Google Developers: Developer Guide. *Location Data* [online]. [cit. 2019-04-20].
Dostupné z: <https://developers.google.com/maps/documentation/geolocation/intro>
- [10] *LTE Random Access Procedure* [online]. [cit. 2019-04-20].
Dostupné z: <https://www.eventhelix.com/lte/random-access-procedure/lte-random-access-procedure.pdf>
- [11] Český telekomunikační úřad: Pokrytí | Veřejné širokopásmové mobilní sítě LTE [online]. [cit. 2019-04-20].
Dostupné z: <https://digi.ctu.cz/>
- [12] HYDER, Md Mashud a Kaushik MAHATA. *Zadoff-Chu sequence design for random access initial uplink synchronization*.
- [13] *All about Wired and Wireless Technology: Overview of LTE 3GPP releases* [online]. [cit. 2019-04-20].
Dostupné z: <http://www.simpletechpost.com/2015/02/overview-of-lte-3gpp-releases.html>
- [14] *5G timeline 3GPP* [online]. In: . [cit. 2019-04-20].
Dostupné z: http://www.3gpp.org/images/articleimages/2015_03_5G-timeline-in-3GPP_v3_2000px.jpg
- [15] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Radio Resource Control (RRC)* [online]. 2016 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136331/13.00.00_60/ts_136331v130000p.pdf
- [16] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical channels and modulation* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/13.01.00_60/ts_136211v130100p.pdf
- [17] *MathWorks Documentation: Generate root Zadoff-Chu sequence of complex symbols* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/ltezadoffchuseq.html>
- [18] A. DEL PERAL-ROSADO, José. *Evaluation of the LTE Positioning Capabilities in Realistic Navigation Channels*. Ph.D. Dissertation. Department of Telecommunications and Systems Engineering Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).
- [19] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User Equipment (UE) radio transmission and reception* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/13.03.00_60/ts_136101v130300p.pdf
- [20] STONE, John John. *Method of determining the direction of space-telegraph signals*. United States of America. US716134A. Uděleno 16.12.1902. Zapsáno 23.1.1901. Dostupné také z:
<https://patentimages.storage.googleapis.com/10/5a/f1/7ec9d6737a981a/US716134.pdf>
- [21] 3GPP TS 36.104: *Technical Specification Group Radio Access Network: Base Station (BS) radio transmission and reception*
- [22] FACCIO, Daniele, Matteo CLERICI a Davide TAMBUCHI. Revisiting the 1888 Hertz experiment. *American Journal of Physics*. 2006, 74(11), 992-994.
DOI: 10.1119/1.2238886. ISSN 0002-9505.
- [23] *How to write a m file code to cfar for fmcw radar: MATLAB Answers* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://se.mathworks.com/matlabcentral/answers/165561-how-to-write-a-m-file-code-to-cfar-for-fmcw-radar>
- [24] SHOBA, B. a K. JAYANTHI. Low complex primary and secondary synchronization signal structure design for LTE systems. *2015 International Conference on Microwave, Optical and Communication Engineering (ICMOCE)*. IEEE, 2015, 2015, , 467-470. DOI: 10.1109/ICMOCE.2015.7489794. ISBN 978-1-4673-6981-7.

- [25] LI, Xiaona, XUE XIE, JUAN ZENG a Yongming WANG. Vulnerability analysis and verification for LTE initial synchronization mechanism. *2015 36th IEEE Sarnoff Symposium*. IEEE, 2015, 2015, , 150-154. DOI: 10.1109/SARNOF.2015.7324660. ISBN 978-1-4673-8042-3.
- [26] *History R&S@WinIQSIM2™ Simulation Soft... R&S@SMBV100A Vector Signal Gen... R&S@WinIQSIM2™ Simulation Software: Generation of digital I/Q signals according to various radio standards* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/winiqsim2-productstartpage_63493-7614.html
- [27] *R&S@SMBV100A Vector Signal Generator: Generating signals for today and tomorrow* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/smbv100a-productstartpage_63493-10220.html
- [28] USRP N210 Software Defined Radio (SDR) - Ettus Research. *Ettus Research, a National Instruments Brand* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.ettus.com/all-products/un210-kit/>
- [29] UBX 10-6000 MHz Rx/Tx (40 MHz, N Series and X Series). *Ettus Research, a National Instruments Brand* [online]. [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.ettus.com/all-products/UBX40/>
- [30] USRP® Support Package from Communications Toolbox. *USRP® Support Package from Communications Toolbox: Hardware Support - MATLAB & Simulink* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://nl.mathworks.com/hardware-support/usrp.html>
- [31] Common Problem and Fixes. *Hardware Support - MATLAB & Simulink* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://nl.mathworks.com/help/supportpkg/usrpradio/ug/common-problems-and-fixes.html>
- [32] 3GPP TS 36.141: *Technical Specification Group Radio Access Network: Base Station (BS) conformance testing*. V16.0.0. 2018-12.
- [33] VAN DEN BEEK, Jan-Jaau, Magnus SANDELL a Per Ola Börjesson. On Synchronization in OFDM Systems Using the Cyclic Prefix. *Radiovetenskaplig Konferens*. 1996, , 663-667.
- [34] *Differential GNSS - Navipedia* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Differential_GNSS
- [35] *GNSS jamming and road tolling* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.septentrio.com/en/insights/gnss-jamming-and-road-tolling>
- [36] *An overview of LTE Positioning: White paper*. Sunnyvale, California, 2012. Dostupné z: https://www.spirent.com/~media/white%20papers/mobile/lte_lbs_white_paper_2012.pdf
- [37] P. GAVIN, Henri. The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems: Department of Civil and Environmental Engineering. *Duke University*. (10. 1. 2019).
- [38] Keysight Technologies: *OFDMA Introduction and Overview for Aerospace and Defense Applications: Application Note*. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-4596EN.pdf>
- [39] *Ettus Research a National Instruments Brand: Networked Software Defined Radio (SDR)* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.ettus.com/product-categories/USRP-Networked-Series/>
- [40] *3GPP Release-15: Further LTE Enhancements and 5G Normative Work Kick-off* [online]. 26.4.2017 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.grandmetric.com/2017/04/26/3gpp-release-15-further-lte-enhancements-and-5g-normative-work-kick-off/>
- [41] WANG, Peng a Fredrik BERGGREN. Secondary Synchronization Signal in 5G New Radio. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2018, 2018, , 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2018.8422145. ISBN 978-1-5386-3180-5.
- [42] MATLAB Answers: Drawing hyperbola using patch function. *MathWorks* [online]. 17.7.2017 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://nl.mathworks.com/matlabcentral/answers/340757-drawing-hyperbola-using-patch-function>
- [43] MATLAB Answers: Curve Intersections: Fast computation of intersections and self-intersections of curves using vectorization.. *MathWorks* [online]. 17.7.2017 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://nl.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22441-curve-intersections?focused=c4c070c3-800a-6793-94b4-18a3a0d20f62&tab=function>
- [44] *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Base Station (BS) conformance testing*. V 16.1.0. 3rd Generation Partnership Project, 2019.
- [45] *Index of /android/netmonster* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.gsmweb.cz/android/netmonster/>
- [46] DAMMANN, Armin, Christian GENTNER a Emanuel STAUDINGER. *LTE Positioning Methods*: North American LTE Forum, In: . 3.4.2012 [cit. 2019-04-20].
- [47] HANUS, Stanislav. *Bezdrátové a mobilní komunikace*. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1833-8.
- [48] *5G Development with MATLAB: MathWorks*. 2017. Dostupné z: <https://nl.mathworks.com/campaigns/offers/5g-technology-ebook.html>

- [49] *Frame Structure - Candidates before 3GPP: ShareTechnote* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure_Candidate.html
- [50] *Frame Structure: ShareTechnote* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure.html
- [51] ZAIDI, Ali. A, Robert BALDEMAIR, Mattias ANDERSSON, Sebastian FAXÉR, Vincent MOLÉS-CASES a Zhao WANG. Designing for the future: THE 5G NR PHYSICAL LAYER. *ERICSSON TECHNOLOGY*. 2017. ISSN 0014-0171.
- [52] *5G commercial network in 2019 world coverage map: Countries with world coverage 5G network technology country list* [online]. 2019 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.worldtimezone.com/5g.html>
- [53] LI, Xiaona, XUE XIE, JUAN ZENG a Yongming WANG. Vulnerability analysis and verification for LTE initial synchronization mechanism. *2015 36th IEEE Sarnoff Symposium*. IEEE, 2015, 2015, , 150-154. DOI: 10.1109/SARNOF.2015.7324660. ISBN 978-1-4673-8042-3.
- [54] KOVÁŘ, Pavel. *Družicová navigace: od teorie k aplikaci v softwarovém přijímači*. Praha: ČVUT v Praze, Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-05989-0.
- [55] *Measure distance & elevation: Google Earth Help* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://support.google.com/earth/answer/148134?hl=en>
- [56] MENSING, C. a S. PLASS. Positioning Algorithms for Cellular Networks Using TDOA. *2006 IEEE International Conference on Acoustics Speed and Signal Processing Proceedings*. IEEE, 2006, IV-513-IV-16. DOI: 10.1109/ICASSP.2006.1661018. ISBN 1-4244-0469-X. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1661018/>
- [57] *GPS.gov: Data From the First Week Without Selective Availability* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/data>
- [58] 5G Americas. n.d. *LTE penetration rate* worldwide in 2017 and 2018, by region*. Statista. Accessed May 3, 2019. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/751448/worldwide-lte-penetration-by-region/>.
- [59] Syniverse. n.d. *Relative LTE vs. non-LTE inbound data traffic worldwide in 2017, by region*. Statista. Accessed May 3, 2019. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/750896/worldwide-lte-vs-non-lte-inbound-data-traffic-by-region/>.
- [60] 5G Americas. n.d. *Number of global mobile/wireless subscriptions by technology from 2010 to 2018 (in millions)*. Statista. Accessed May 3, 2019. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/206604/global-wireless-subscription-growth-by-technology-since-2010/>.
- [61] *World Geodetic System 1984 (WGS84)* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://confluence.gps.nl/qinsy/en/world-geodetic-system-1984-wgs84-29855173.html>

7 Přílohy

Přílohy práce se skládají ze souborů a algoritmů, řešících zadání práce. Algoritmy byly vyvíjeny v prostředí MatLab verze R2018a.

Na přiloženém datovém nosiči jsou tyto programy uloženy v textovém souboru „*programy.pdf*“. Následuje stručný popis činnosti jednotlivých programů. Číslování nadpisů dalších kapitol odpovídá číslování v přiloženém dokumentu.

7.1 Příjem signálu

Algoritmy, realizující příjem signálů do počítače ze zařízení N210 (anebo DVB-T „klíčenky“). Nezbytností je tzv. „*communication system toolbox*“ [30], [31]. V algoritmech probíhá mj. nastavování středního kmitočtu a decimálního faktoru. Maximální vzorkovací kmitočet N210 je 100 MHz.

7.2 Hlavní program

Program, sloužící k odhadu polohy přijímače. Pro řešení dílčích problémů jsou použity funkce, které jsou uvedeny v kapitolách 7.2.1 až 7.2.18.

7.2.1 Algoritmus hrubé časové synchronizace

Algoritmus časové synchronizace s modifikací pro vztah (4.2.1), viz obrázky 4.2.2 a 4.2.5.

7.2.2 Algoritmus průměrování

Průměrování a odhad toho, který vrchol funkce γ odpovídá delšímu OI.

7.2.3 Algoritmus průběžného vypočtu funkce $\gamma(m)$

Ilustrace nárůstu chyby funkce γ postupným kreslením, viz video „723.mp4“.

7.2.4 Algoritmus detekce počtu zachycených stanic

S ohledem na odhad pozice delšího OI je provedeno průměrování funkce γ a odhad počtu stanic (viz obrázek 4.2.7).

7.2.5 Algoritmus generování indexů

Generování indexů symbolů pro případ nulového časového offsetu.

7.2.6 Algoritmus výpočtu maximálního indexu

Pojistka pro případ zpracování signálu, kterého délka je kratší, než 20 slotů (10 ms).

7.2.7 Algoritmus odhadu kmitočtového offsetu

Odhad kmitočtového offsetu dle vztahu (4.2.2) s ohledem na pozici delších OI.

7.2.8 Algoritmus korekcí kmitočtového offsetu

Korekce a kontrola odhadovaných hodnot kmitočtového offsetu pro případ chybné detekce.

7.2.9 Algoritmus doladění časového offsetu

Algoritmus jemného doladění časového offsetu, ideálně s přesností na vzorek.

7.2.10 Algoritmus detekce synchronizačních signálů

Detekce synchronizačních signálů na základě vlastností, popsaných v kapitolách 3.2.8 až 3.8.10 a 4.3. Algoritmus dále provádí odebrání OI, FFT a ořez subnosných (v tomto pořadí).

7.2.11 Algoritmus odhadu Cell Id

Funkce, používající funkci 7.2.12 a následně realizující opravný algoritmus z kapitoly 4.4.

7.2.12 Algoritmus korelační funkce synchronizačních signálů

Program, odhadující hodnotu *Cell Id* a číslo slotu pro jednu dvojici SS, viz obrázky 4.3.5 a 4.3.6.

7.2.13 Algoritmus výpočtu hyperbol

Algoritmus načte databázi souřadnic stanic pro příslušného operátora a vyhledá v ní souřadnice pro dané Cell Id. Následně jsou na základě hodnot časových rozdílů (7.2.4) spočteny hyperboly.

7.2.14 Algoritmus filtrace

Pomocný algoritmus pro funkci 7.2.13, provádějící filtraci databáze konkrétního operátora.

7.2.15 Algoritmus výpočtu jedné hyperboly

Pomocný algoritmus pro výpočet jedné křivky hyperboly.

Algoritmus byl převzat a upraven z [42].

7.2.16 Algoritmus hledání průsečíků hyperbol

Algoritmus, hledající průsečíky hyperbol. Pokud se daná dvojice hyperbol neprotíná, je vybrán bod, ležící na úsečce, spojující dva body hyperbol, které mají nejmenší vzdálenost.

7.2.17 Algoritmus transformace souřadnic

Algoritmus transformace souřadnic z LLA do ENU byl použit se souhlasem autora Ing. Václava Navrátila.

7.2.18 Algoritmus odhadu polohy

Implementace odhadu polohy jako bodu, ležícího v těžišti plochy, vymezené průsečíky hyperbol.

7.3 Přehled varovných a chybových hlášek programů

Hláška	Popis (Řešení)	Závažnost
Prijímac uvolnen.	Indikace odebrání požadovaného počtu vzorků z přijímače, ukončení relace (UDP protokol).	Nulová
Chyba detekce sirsiho vrcholu.	Pravděpodobné kvůli šumu, nebo příliš krátkému měření se nepovedlo odhadnout, který ze 7 vrcholů funkce γ odpovídá delšímu OI.	Vysoká
Chyba detekce stanic - nezhoduje se počet detekovaných stanic pro dlouhé a krátké úseky.	Navzdory průměrování se zřetelem na pozice delších OI nejsou detekované stanice shodné pro dlouhé a krátké úseky. Nastává při výrazné degradaci funkce γ (například šumem).	Vysoká
Zachycena pouze jedna stanice.	Informativní hláška (nemožnost vykreslení hyperboly)	Nízká
Pocet detekovaných stanic: Odpovídající drahové rozdíly:	Informativní hlášky	Nízká
Chyba, je indikován jiný počet stanic, než počet rozpoznatelných (upravit parametr prominence).	Algoritmus neví, ke které stanici má přiřadit indikovanou hodnotu kmitočtového offsetu. Parametr prominence lze volit z intervalu (0;1)	Vysoká
Chyba urcovani kmitoctoveho offsetu u X. stanice, pouzita je pouze jedna hodnota.	Upozornění na možnost snížené přesnosti hodnoty odhadovaného kmitočtového offsetu.	Střední
Chyba urcovani kmitoctoveho offsetu u X. stanice, není k dispozici vhodná hodnota.	Nebylo možné stanovit hodnotu kmitočtového offsetu signálu, chyba způsobena zpravidla značně degradovaným vstupním signálem.	Vysoká
Chyba detekce kmitoctoveho offsetu pro X. stanici - nezhodují se znaménka.	Indikované hodnoty kmitočtového offsetu jsou stejné (resp. s rozdílem do 25 %), ale liší se znaménky.	Střední
Chyba detekce kmitoctoveho offsetu pro X. stanici - nezhodují se výsledky metod.	Rozdíl indikovaných hodnot kmitočtových offsetů z různých metod je větší, než 25 %	Vysoká
Chyba, u nalezených synchronizacních signalu se nezhodují rozestupy.	Rozestup nalezených SS je jiný, než 5 ms a odchylka je větší, než 71 μ s.	Vysoká
Detekovane SS maji vetsi fazovy offset, detekce Cell Id muze byt ovlivnena. Jedna se o X. stanici, X. dvojici SS.	Indikace zbytkového fázového offsetu, určeného z BPSK (SSS). Natočení konstelací je pro některé symboly větší, než 45°.	Nízká
Chyba ve vyberu subnosnych, detekce Cell Id muze byt ovlivnena. Jedna se o X. stanici, X. dvojici SS.	Špatný výběr subnosných může způsobit nesprávnou detekci Cell Id. Kritériem posouzení je na maximum autokorelační funkce sekvence PSS v nule.	Střední
Chybna detekce cisla slotu u X. stanice, detekce Cell Id muze byt ovlivnena.	Detekovaná čísla slotů se shodují. Indikace nesprávného odhadu jedné z dvojice hodnot $N_{ID}^{(2)}$	Vysoká
Opravena hodnota N2 pro X. stanici, X. zachycena dvojice SS.	Indikace neshodujících se hodnot $N_{ID}^{(2)}$, provedena oprava (viz kapitola 4.4)	Střední

Hláška	Popis (Řešení)	Závažnost
Hodnotu Cell Id nebylo potřeba korigovat.	Na detekovaných hodnotách Cell Id nebylo nutné provádět žádné opravy z kapitoly 4.4	Nízká
Databáze není k dispozici.	K měření na daném střeňím kmitočtu (f_c) není asociována žádná databáze s polohami eNB.	Vysoká
Stanice s Cell Id X nebyla v databázi nalezena.	Pro dané Cell Id nebyl v databázi nalezen žádný záznam, snižuje se počet dvojic stanic, pro které jsou počítány hyperboly (původně $\binom{n}{2}$ kombinací, snížení n o 1).	Střední
Cell Id X bylo v databázi nalezeno X krát, vybrána je nejbližší stanice k referenci.	Vzhledem k počtu adres (504) lze očekávat jejich opakování. Algoritmus vyžaduje zadání (poslední) polohy.	Střední
Chyba při výpočtu polohy X. dvojice, nesmyslný čas dráhového rozdílu.	Hyperbola nemohla být spočtena, protože zadaný dráhový rozdíl je větší než vzdálenost zadaných ohnisek.	Vysoká
Počet spočtených kuzelosecek:	Informace o tom, z kolika hyperbol jsou počítány průsečíky.	Nízká
Poloha nemohla být stanovena.	Kombinace výše popsaných chyb způsobila, že matice průsečíků hyperbol je prázdná.	Vysoká

7.4 Seznam příloh

a.) Obsažených v textu práce

- | | |
|-----------------|--|
| 7.1 | Stručný popis algoritmů pro příjem signálů |
| 7.2 | Stručný popis hlavního programu |
| 7.2.1 až 7.2.18 | Stručný popis algoritmů, řečících dílčí problémy |
| 7.3 | Přehled informačních a chybových hlášek programů |

b.) Na přiložení datového nosiči

- Video „723.mp4“
- Mapové podklady „AA.jpg“ a „Dejvice.jpg“
- Textový soubor s programy „programy.pdf“
- Soubory .kml s databází stanic operátora T-Mobile a Vodafone, ukázkami hyperbol a vybraných výsledků měření.
- Soubor „k_5_3.m“, umožňující vykreslit měření z tabulky 4.5.1