

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA RADIOELEKTRONIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Určování polohy s využitím signálů komunikačních systémů

Position determination using communication systems signals

Bc. JAKUB POPP

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Bezdrátové komunikace

Vedoucí práce: Prof. Ing. František Vejražka CSc.

Praha rok 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám a použil jsem podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 11. 5. 2015:

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Popp Jakub**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Bezdrátové komunikace

Název tématu: **Určování polohy s využitím signálů komunikačních systémů.**

Pokyny pro vypracování:


Určování polohy pomocí GNSS systémů selhává v tzv. obtížných podmínkách (tj. v budovách, pod vegetací apod.), protože družicový signál má malou úroveň. Proto jsou snahy využívat signály jiných rádiových systémů, např. systémů pro mobilní komunikaci. V práci analyzujte možnosti využití signálů základnových stanic mobilních komunikačních systémů pro určení polohy. Navrhněte algoritmy zpracování signálů s odhadem přesnosti. Bude-li to možné, pokuste se experimentálně zjistit velikost chyby měření vzdálenosti.

Seznam odborné literatury:

- [1] Bensky, A.: Wireless positioning. Technologies and applications. London, Artech House, 2008.
- [2] SAND, S.; DAMMANN, A.; MENSING, Ch.: Positioning in Wireless Communications Systems. John Wiley & Sons, 2014.

Vedoucí: prof. Ing. František Vejražka, CSc.

Platnost zadání: LS 2015/2016


Prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 13. 2. 2015

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce prof. Františku Vejražkovi za pomoc, vedení a zabezpečení pracovních podmínek.

Dále panu José A. Del Peral-Rosado PhD za cenné rady při vývoji algoritmu.

Nakonec bych chtěl poděkovat přítelkyni, její rodině a své rodině za podporu a vytvoření podmínek pro vypracování této práce.

Anotace:

Diplomová práce se zabývá návrhem algoritmu pro určování polohy pomocí signálů vysílaných sítěmi LTE. Algoritmy jsou navrženy v software Matlab. Pro vývoj algoritmů byly využity signály generované dle platných norem.

Klíčová slova:

SDR, LTE, určování polohy, OFDM

Summary:

This master thesis describes the design of algorithms for determination of position with signals from LTE networks. Algorithms are designed in Matlab. For the development of algorithms were used signals generated by valid standards.

Index Terms:

SDR, LTE, Position determination, OFDM

Obsah

1. Úvod.....	1
1.1. Cíl práce.....	1
1.2. Přínos práce	1
1.3. Definice pojmů	2
2. Historie a vývoj mobilních sítí.....	3
3. Určování polohy v mobilních sítích.....	5
3.1. Hierarchie určování polohy	5
3.2. Algoritmy určování polohy	5
3.3. Základní metody určování polohy.....	6
3.3.1. Cell ID + TA	6
3.3.2. Angle of arrival (AOA).....	7
3.3.3. Time of arrival (TOA)	8
3.3.4. Time difference of arrival (TDOA)	9
3.3.5. Enhanced Observed Time Difference (E-OTD)	10
3.4. Zpracovávaná metoda.....	10
4. Sítě LTE	11
4.1. Architektura.....	11
4.2. Fyzická vrstva.....	12
5. Generované signály.....	16
5.1. Primární synchronizační signál (PSS)	16
5.2. Sekundární synchronizační signál (SSS).....	17
5.3. Referenční signály buňky (CRS).....	19
5.4. Signály pro určování polohy (PRS).....	21
6. Zpracování signálu LTE pro určování polohy	23
6.1. Model signálu	23
6.2. Struktura generovaného LTE rámce.....	26
6.3. Hledání počátku symbolu	27
6.4. Hledání buňky (Cell ID).....	30
6.5. Určování polohy	35
7. Závěr.....	39
8. Seznam příloh.....	39
9. Seznam literatury.....	40

1. Úvod

1.1. Cíl práce

Jelikož určování polohy pomocí GNSS systémů selhává v tzv. obtížných podmínkách (tj. v budovách, pod vegetací apod.), objevují se snahy o využití jiných rádiových systémů k určování polohy.

Cílem této práce je analyzovat možnosti využití signálů vysílaných základnovými stanicemi mobilních operátorů pro určování polohy a navrhnout algoritmy zpracování těchto signálů.

1.2. Přínos práce

V letošním roce (2015) vydala americká komise pro komunikace FCC (Federal Communications Commission) materiál [1], ve kterém jsou uvedeny následující požadavky na přesnost lokalizování tísňového volání na linku 911 v horizontální rovině.

- Do dvou let lokalizovat 40% všech volání s přesností větší než 50m.
- Do tří let lokalizovat 50% všech volání s přesností větší než 50m.
- Do pěti let lokalizovat 75% volání pomocí technologie VOLTE s přesností větší než 50m.
- Do šesti let lokalizovat 80% volání pomocí technologie VOLTE s přesností větší než 50m.

Technologie VOLTE slouží pro přenos hlasu v sítích LTE, proto se budeme v této práci zabývat možnostmi a algoritmy určování polohy v těchto sítích.

1.3. Definice pojmů

- VOLTE – Voice over LTE – Technologie pro přenos hlasu pomocí LTE
- LTE – Long Term Evolution – mobilní síť třetí generace
- LTE-Advanced - Long Term Evolution Advanced – mobilní síť čtvrté generace
- BS – Base station – Základnová stanice (vysílač)
- BTS – Base Transceiver Station – Základnová stanice v sítích GSM
- eNode-B – Základnová stanice v sítích 3G
- MS – Mobile Station – mobilní stanice (přijímač)
- UE – User equipment – mobilní stanice v sítích 3G
- FDD – frekvenční multiplex
- TDD – časový multiplex
- GI- guard interval – ochranný interval
- CP – cyclic prefix
- OFDM – Orthogonal frequency-division multiplexing – širokopásmová modulace
- ISI – Inter Symbol Interference – mezisymbolové rušení
- RB – Resource block – základní blok přidělovaný buňkou
- RE – Resource element – základní blok frekvenčně časové mřížky
- PSS – Primary synchronization signal – primární synchronizační signál
- SSS – Secondary synchronization signal – sekundární synchronizační signál
- CRS – Cell specific reference signal – signál sloužící k odhadu sestupného kanálu
- MBSFN – multicast-broadcast single-frequency network – konfigurace sítě pro přenos TV
- UE-RS – UE-specific reference signal – Signál sloužící k demodulaci dat v PDSCH
- PRS – Positioning reference signal – signál sloužící k určování polohy UE
- PBCH – Physical broadcast channel – kanál s informacemi o buňce, šířce pásma
- PDSCH – Physical downlink shared channel - kanál nesoucí provozní data
- PDCCH – Physical downlink control channel – kanál s informacemi o přiděleném kanálu a řídicí informace.
- PMCH – Physical multicast channel - kanál přenášející informace při vysílání informace více uživatelům
- SDR – Software define radio- Softwarově definované rádio

2. Historie a vývoj mobilních sítí

V osmdesátých letech dvacátého století vznikalo v Evropě mnoho analogových buňkových systémů (sítě první generace označované jako 1G), především ve Skandinávii, Velké Británii, Francii a Německu. V každé zemi byl vyvinut samostatný systém, který však nebyl slučitelný s ostatními. Tento způsob řešení byl dále neudržitelný, zejména kvůli nepoužitelnosti zařízení za hranicemi z důvodu omezeného trhu pro jednotlivá zařízení a postupného snižování významu hranic ve sjednocující se Evropě.

Z těchto důvodů vytvořila Konference evropských správ a pošt (CEPT) novou standardizační skupinu GSM (Groupe Spécial Mobile), která měla za úkol vytvořit standardy pro nový digitální systém kompatibilní v zemích celé Evropy a později i světa. Hlavními kritérii, které musel nově vznikající systém splňovat byly: dobrá subjektivní kvalita přenášené řeči, nízká cena zařízení a služeb, podpora mezinárodního roamingu a hospodárnost s frekvenčním spektrem.

V roce 1989 byla zodpovědnost za standardizaci přesunuta na Evropský telekomunikační normalizační institut (ETSI) a v roce 1991 vznikl standard fáze 1 sítě GSM označované jako 2G.

Komerční provoz první GSM sítě (Finsko) byl zahájen v polovině roku 1991 a již o dva roky později fungovalo 36 sítí ve 22 zemích. Z hlediska kompatibility zvolily tento systém i země v Jižní Africe, Austrálii a mnoho dalších zemí středního a dálného východu. S jistým zpožděním začali tuto technologii v pásmu 1900MHz používat i v USA pod názvem PCS 1900.

Systém GSM je využíván na všech kontinentech a zkratka GSM je interpretována jako „Global System for Mobile Communication.“ Analogové systémy začaly postupně upadat a byly nahrazeny digitálním GSM.

Sítě GSM začaly být nasazovány v roce 1992 a rychle se staly nejrozšířenějším standardem na celém světě.

GSM pracuje v několika pásmech. Původní standard počítal s využitím v pásmu 900 MHz. V roce 1993 byla ve Velké Británii spuštěna GSM síť v pásmu 1800 MHz označovaná DCS1800 a v roce 1995 přejmenovaná na GSM1800. Podobně v USA vznikl systém v pásmu 1900 MHz pod názvem PCS1900 přejmenovaný v roce 1995 na GSM1900.

Vedle CSD přenosů (Circuit Switched Data) zavedl GSM standard GPRS, umožňující přenos dat pomocí paketů. GPRS bylo později nahrazeno rychlejším EDGE.

V roce 1998 vznikl „The 3rd Generation Partnership Project“ (3GPP). Cílem 3GPP bylo vyvinout sítě třetí generace v rozsahu projektu ITU-2000 založené na rozvinutých GSM specifikacích označované jako UMTS. Ve stejné době vznikaly sítě třetí generace založené na IS-95 (CDMA), které měl na starost 3GPP2 a jsou označovány jako sítě 3G.

Následoval vývoj technologie LTE (od roku 2004), u které se delší dobu diskutovalo o jejím zařazení. Nakonec se rozhodlo o zařazení mezi sítě 3G, po stanovení požadavků na rychlost sítí 4G, které splňuje až LTE-Advance.

3. Určování polohy v mobilních sítích

3.1. Hierarchie určování polohy

Většina metod určování polohy v bezdrátových sítích je založena na principech definovaných před desítkami let. MS provádí měření signálů k jednomu nebo více BS a poté je prováděn výpočet polohy podle jednoho ze tří vzorů.

- Určení polohy sítí – Síť zpracovává signály od MS a vypočítává z nich polohu.
- Určení polohy mobilní stanicí – MS provede měření signálů od základnových stanic a zároveň vypočítá polohy.
- Hybridní určení polohy – MS provede měření a s využitím pomocných dat poskytnutých sítí spočítá odhad své polohy, nebo změřená data odešle do sítě, která provede výpočet polohy.

V buňkových sítích je preferován princip určení polohy sítí, protože z principu v některých případech nevyžaduje úpravu MS. Bohužel v mnoha případech selhává z těchto důvodů:

- Poskytovatelé nejsou ochotni nést náklady na implementaci těchto služeb.
- Mohou nastat problémy s ochranou osobních údajů, pokud operátor zná polohu mobilní stanice.

3.2. Algoritmy určování polohy

K určení polohy lze využít různé algoritmy výpočtu. Tyto algoritmy jsou vázány na zvolenou metodu (kapitola 3.3). Mezi tyto algoritmy patří:

- Laterace (Lateration) – poloha je získána jako průsečík geometrických útvarů (například kružnice nebo hyperboly) zkonstruovaných na základě měření vzdálenosti MS od BS. Tento algoritmus využívají například TOA nebo TDOA.
- Měření úhlu příchodu signálu (Angulation) – k určení polohy se využívá směr příchodu signálu. Toho využívá například AOA.
- Blížkost (Proximity) – Známa poloha obsluhující BS je přiřazena jako poloha MS. Příkladem je CellID, která je v různých modifikacích nejvyužívanější metodou pro určování polohy v GSM sítích.

- Analýza scény (Scene analysis) – Algoritmus je založen na hledání nejlepší shody změřených dat s databází. Tento algoritmus je využíván u metody fingerprinting.
- Hybridní – kombinace předchozích algoritmů může vést ke zlepšení přesnosti nebo k podpoře algoritmu, který nelze využít samostatně z důvodu nedostatečného počtu měření.

3.3. Základní metody určování polohy

Pro určování polohy mobilní stanice je možné využít několika známých metod. Tyto metody se liší zejména finančními nároky na implementaci, dosažitelnou přesností a způsobem zpracování signálů.

3.3.1. Cell ID + TA

Základní metodou je tzv. Cell Identity. Princip je založen na určení polohy pomocí jedinečného identifikátoru (Cell ID), kterým je jednoznačně určena každá BS v síti. Pokud zároveň známe zeměpisné souřadnice základnové stanice BS, můžeme určit přibližnou polohu.

Tato metoda využívá parametrů, které jsou nutné pro fungování komunikace v síti a nevyžaduje úpravu sítě, ani MS. Pozice MS je dána těžištěm oblasti, ve které má daná BS nejlepší signál (je tzv. bestserverem). Tuto metodu využívá například T-Mobile.

Přesnost je závislá na hustotě rozmístění BS stanic. Maximální poloměr jedné buňky je 35 km, čemuž odpovídá teoretická přesnost 70km.

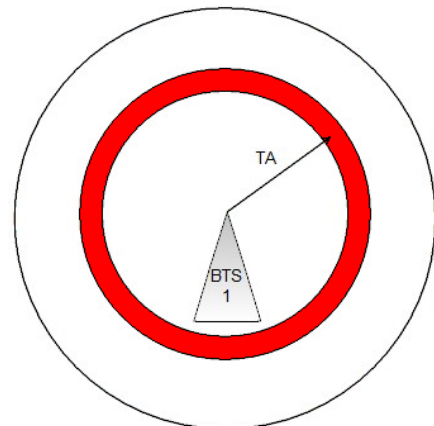
Rozšířením Cell ID je metoda Enhanced Cell ID. Tato metoda využívá další parametr, který je k dispozici pro MS a tím je timing advance (TA). Jedná se o šestibitové číslo, které nabývá hodnot 0-63, které vyjadřuje zpoždění signálu na cestě od BS k MS a zpět. Primárně slouží tento parametr k synchronizaci mobilní a základnové stanice, zajišťující komunikaci v přiděleném časovém slotu. Přesnost určení vzdálenosti mobilní stanice od BS je podle (1) $d=553,5m$. Nevýhodou této metody je znalost parametru TA pouze u obsluhující BS.

$$d = \frac{t_b * c}{2} = \frac{3,69 * 10^{-6} * 3 * 10^8}{2} = 553,5m \quad (1)$$

Kde: t_b je doba trvání jednoho bitu (3,69 μ s)

c je rychlost šíření světla

d je rozlišení určení vzdálenosti

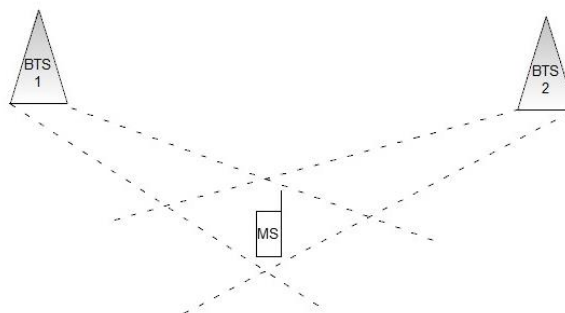


Obr. 1 – Cell ID + TA

3.3.2. Angle of arrival (AOA)

Technologie AOA využívá směrových anténních řad na straně BS. Určení polohy je možné při příjmu signálu od dvou vysílačů, u kterých je známá jejich poloha a díky použitým anténním řadám i úhel, pod kterým se nachází přijímač. Úhel je určen z rozdílu fáze přijatého signálu na jednotlivých prvních anténní řady.

Neznámá poloha se určuje z průsečíku přímek vedoucích od jednotlivých vysílačů. Pro dosažení přesných výsledků je vyžadována přímá viditelnost mezi BS a MS, proto se tato technika nehodí například do městských zástaveb. Dosažená přesnost závisí na počtu BS, jejich rozložení a vícecestném šíření. Výhodou této metody je možnost určení polohy při viditelnosti pouze dvou vysílačů.



Obr. 2 – AOA

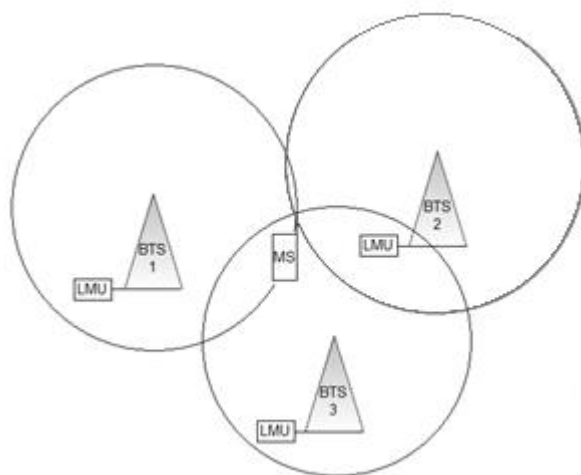
Hlavním problémem bránícím nasazení této techniky v sítích mobilních operátorů je nutnost vybavit BS anténními řadami a nevhodnost nasazení do zastavěných oblastí, kde hrozí vícecestné šíření, které snižuje přesnost určení polohy. Dalším problémem je omezená kapacita sítě, protože při měření k více BS je obtížné obsloužit větší počet žádostí o polohu.

3.3.3. Time of arrival (TOA)

TOA je základní metoda určování polohy v pozemních sítích na principu měření doby šíření signálů. Známý signál od MS musí být přijat třemi nebo více BS. BS následně předá signál zařízení LMU (Location Measurement Unit). Jednotka LMU označí dobu šíření signálu mezi MS a BS jako „TOA value“. Pomocí TOA value je možné určit množinu bodů, které jsou ve stejné vzdálenosti od BS. Tato množina se nazývá polohová čára. Pokud známe tři a více těchto kružnic, můžeme určit polohu MS.

U této metody je důležitá přesnost hodin v LMU (1 μ s odpovídá chybě přibližně 300m). Vysoké přesnosti hodin je dosaženo využitím synchronizace LMU s časem získaným z GPS.

K nasazení této technologie je nutné vybavit každou BS jednotkou LMU. Zároveň je nutná SW úprava všech MS, které chtějí využívat tuto metodu určování polohy.



Obr. 3 - TOA

3.3.4. Time difference of arrival (TDOA)

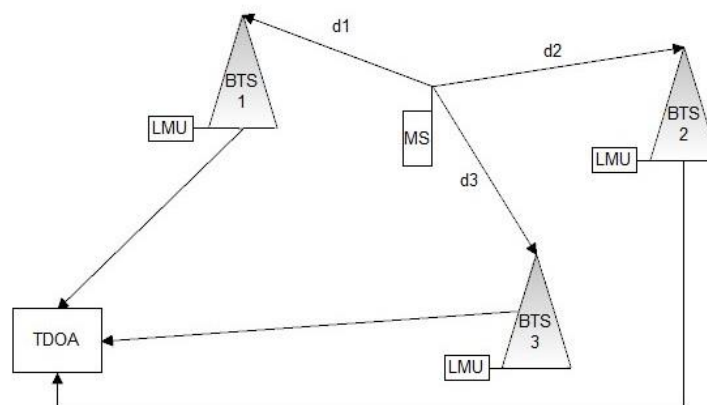
Metoda TDOA je variantou TOA a je možné ji využít, pokud je neznámý čas vyslání signálu, nebo je tento údaj nedostatečně přesný. Místo měření absolutního času (jako je využíváno u TOA) je měřen rozdíl časů příchodu jednotlivých signálů. Stejně jako u metody TOA je nutné vybavit BS jednotkami LMU. Jednotka LMU určí čas příchodu signálu od MS k BTS 1 (d_1 na Obr. 4). Tato hodnota se odečte od doby šíření signálu k BTS 2 (d_2). Rozdíl těchto dvou časů je hodnotou TDOA (TDOA value). Následně je vypočtena hyperbola, na které je tento rozdíl konstantní. Při využití dvou párů (minimálně tři BTS) lze určit dvě hyperboly a jejich průsečík je odhadovanou polohou MS. Rovnice hyperbol v rovině pro zvolený příklad jsou následující:

$$d_{12} = \sqrt{(x_{BTS1} - x_{MS})^2 + (y_{BTS1} - y_{MS})^2} - \sqrt{(x_{BTS2} - x_{MS})^2 + (y_{BTS2} - y_{MS})^2} \quad (2)$$

$$d_{23} = \sqrt{(x_{BTS2} - x_{MS})^2 + (y_{BTS2} - y_{MS})^2} - \sqrt{(x_{BTS3} - x_{MS})^2 + (y_{BTS3} - y_{MS})^2} \quad (3)$$

Kde d_{12} , d_{23} jsou změřené rozdíly časů

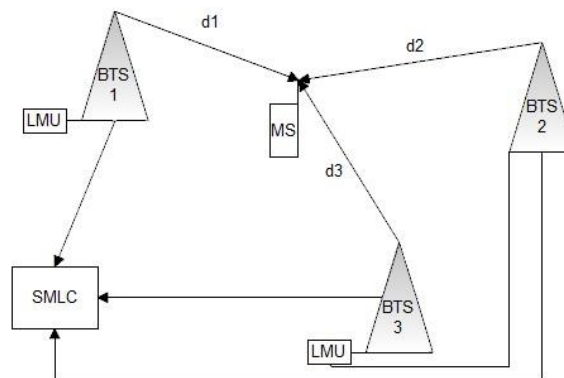
x , y jsou souřadnice jednotlivých stanic (pevných a mobilní)



Obr. 4 – TDOA

3.3.5. Enhanced Observed Time Difference (E-OTD)

E-OTD je modifikace TOA metody. Funguje na principu měření doby šíření signálu, konkrétně rozdíl doby šíření signálu od minimálně tří pseudosynchronizovaných BTS, což znamená, že více BTS stanic využívá jednu LMU jednotku. Typicky se u této metody používá jedna LMU jednotka pro 3 až 5 BS. Změřené časy jsou zaslány do SMLC (Service Mobile Location Center). Když je signál z minimálně tří BTS přijat MS, časový rozdíl doby šíření od každé BTS a LMU slouží k výpočtu hyperbol umožňující určení odhadované polohy podobně jako u TDOA. Přesnost této metody je dle [2] 50-150m v městské zástavbě.



Obr. 5 – E-OTD

3.4. Zpracovávaná metoda

Pro určování polohy v mobilních sítích byla vybrána síť třetí generace LTE. Hlavním důvodem je možnost využít v těchto sítích metody založené na době šíření signálu podobně jako je tomu u GNSS systémů. Síť LTE využívají modulaci OFDM a vysílače jsou navzájem synchronizované, na rozdíl od předchozích generací mobilních sítí, kde bylo nutné tuto synchronizaci řešit dodatečně.

Dalším důvodem je rychlý rozvoj této technologie po celém světě.

Tato práce se zabývá metodou označovanou v sítích LTE jako OTDOA (Observed Time Difference Of Arrival). Jedná se o metodu založenou na principu TDOA (3.3.4). Poloha se určuje ze známého rozdílu příchodu signálu od dvojice BS. Tento rozdíl tvoří hyperbolu, a při znalosti více těchto hyperbol je možné určit polohu MS.

4. Sítě LTE

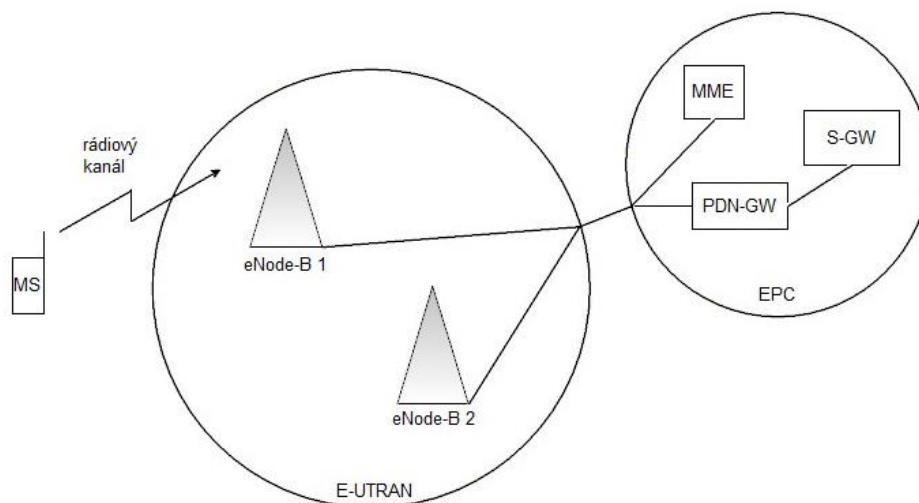
4.1. Architektura

Sítě LTE jsou založeny na komunikaci pomocí IP paketů. Sítě LTE se skládají ze dvou základních částí.

- EPC (Evolved Packet Core)
- E-UTRAN (Evolved Terrestrial Radio Access Network).

E-UTRAN je spojení jednotlivých BS (v LTE sítích značeno e-NodeB), které tvoří bránu mezi rádiovým rozhraním a páteří sítě.

EPC slouží k přidělování služeb a řízení. Součástí EPC je MME (Mobility Management Entity) zajišťující mobilitu, zabezpečení apod., S-GW (serving Gateway) nahrazující uživatelské rozhraní u starších typů sítě a PDN-GW (Packet Data Network Gateway).



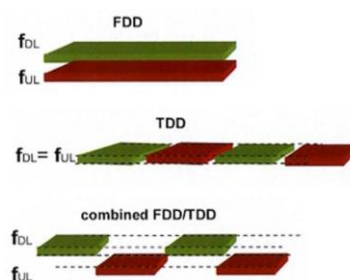
Obr. 6 – Architektura LTE sítě

4.2. Fyzická vrstva

Pro určování polohy využíváme sestupný (downlink) kanál definovaný LTE Release 9 [6]. Přenosový sestupný kanál je definovaný v čase, frekvenci a prostoru. Prostorová dimenze je využívána u technik s více anténami. Ve frekvenci je šířka pásma definována v rozmezí 1,4-20 MHz. V současné době jsou využívány dvě možnosti komunikace.

První je symetrická komunikace, při níž jsou využity dva separátní kanály na odlišné frekvenci (FDD), což umožňuje dosáhnout vyšších komunikačních rychlostí. Rámec trvá 10 ms a je rozdělen na 10 subrámců trvajících 1 ms, které se skládají každý ze dvou 0,5 ms trvajících slotů.

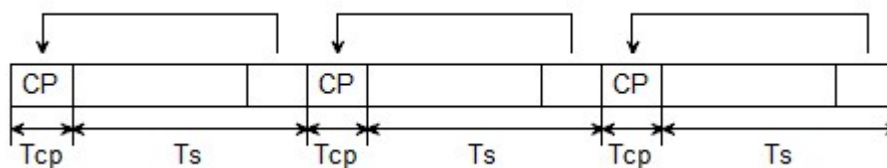
Druhou možností je využití jednoho kanálu pro uplink i downlink a směr komunikace se mění v závislosti na čase. V tomto případě se využívá dvou půlrámců o délce 5 ms. Tyto dva speciální subrámce se skládají z DwPTS (Downlink Pilot Timeslot), GP (guard Period) a UpPTS (Uplink Pilot Timeslot).



Obr. 7 – časový a frekvenční duplex (FDD, TDD) [3]

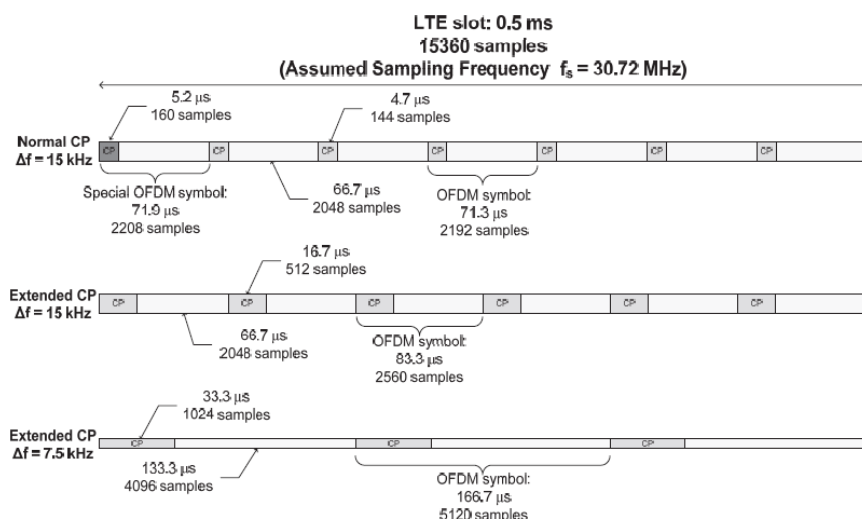
V LTE sítích je definována minimální alokace zdrojů, kterou nazýváme zdrojový blok (RB). Ten se skládá z jednotlivých RE (resource element), které jsou tvořeny jednou subnosnou ve frekvenční oblasti a jedním OFDM symbolem v časové oblasti. Velikost RB je závislá na rozteči subnosných (která je nepřímo úměrná délce OFDM symbolu) a délce CP (cyclic prefix).

Vzdálenost mezi subnosnými umožňuje určitou toleranci vůči Dopplerovu posunu, který vzniká při pohybu uživatele. CP zavádí do přenosového kanálu redundantní informaci přidáním konce OFDM symbolu před jeho začátek (Obr. 8) pro zabránění vzniku mezisymbolové interference (ISI). Délka CP musí být větší nebo rovna zpoždění mezi prvním a posledním příchozím signálem vznikajícím vícecestným šířením.



Obr. 8 – Cyklický prefix

V LTE jsou specifikovány dvě délky CP. První je normální (normal CP) jehož délka je 5,2 μ s. Druhým je rozšířený (extended CP) o délce 16,7 μ s, který se používá u rozlehlých buněk k zabránění ISI při vícecestném šíření. Rozteč mezi subnosnými je 15 kHz, případně u extended CP je možné využít i rozteč 7,5 kHz při prodloužení extended CP na 33,3 μ s. Tento mód je využíván u mnohobuněčných jednofrekvenčních sítí (MBSFN – multicast-broadcast single frequency network).



Obr. 9 - Struktura LTE rámce [4]

Současné sítě jsou konfigurovány v režimu, kdy RB obsahuje 12 subnosných a 7 OFDM symbolů což odpovídá šířce pásma 180 kHz a jednomu slotu. Základní jednotkou času v LTE je:

$$T_{s,min} = \frac{1}{\Delta f * 2048} \quad (4)$$

Kde: Δf – rozteč subnosných (Hz)

Základnímu času $T_{s,min}$ odpovídá vzorkovací frekvence 30,72 MHz. Tato základní jednotka umožňuje zpětnou kompatibilitu se staršími technologiemi. Podle [6] je počet RB přidělován podle dostupné šířky pásma a může nabývat hodnot od 6 do 110. Pro maximální přenosovou rychlost se v praxi využívá 100 RB.

Šířka pásma (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Šířka pásma pro data (MHz)	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18
Počet zdrojových bloků RB (-)	6	15	25	50	75	100
Počet vzorků FFT (-)	128	256	512	1024	1536	2048
Vzorkovací frekvence (MHz)	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

Tab. 1 – Šířky pásma v LTE

V sítích LTE jsou přenášeny čtyři druhy signálů [6]:

- Synchronizační signály
- Referenční signály
- Datové signály
- Řídící signály

Synchronizační a referenční signály nazýváme piloty, jsou pro nás známé a jsou vhodné pro určování polohy. Pilotními signály v LTE jsou:

- Primární synchronizační signál (PSS) a sekundární synchronizační signál (SSS). Tyto signály slouží k určení Cell ID a akvizici signálu.
- Referenční signály (RS) slouží zejména pro účely demodulace a synchronizace.

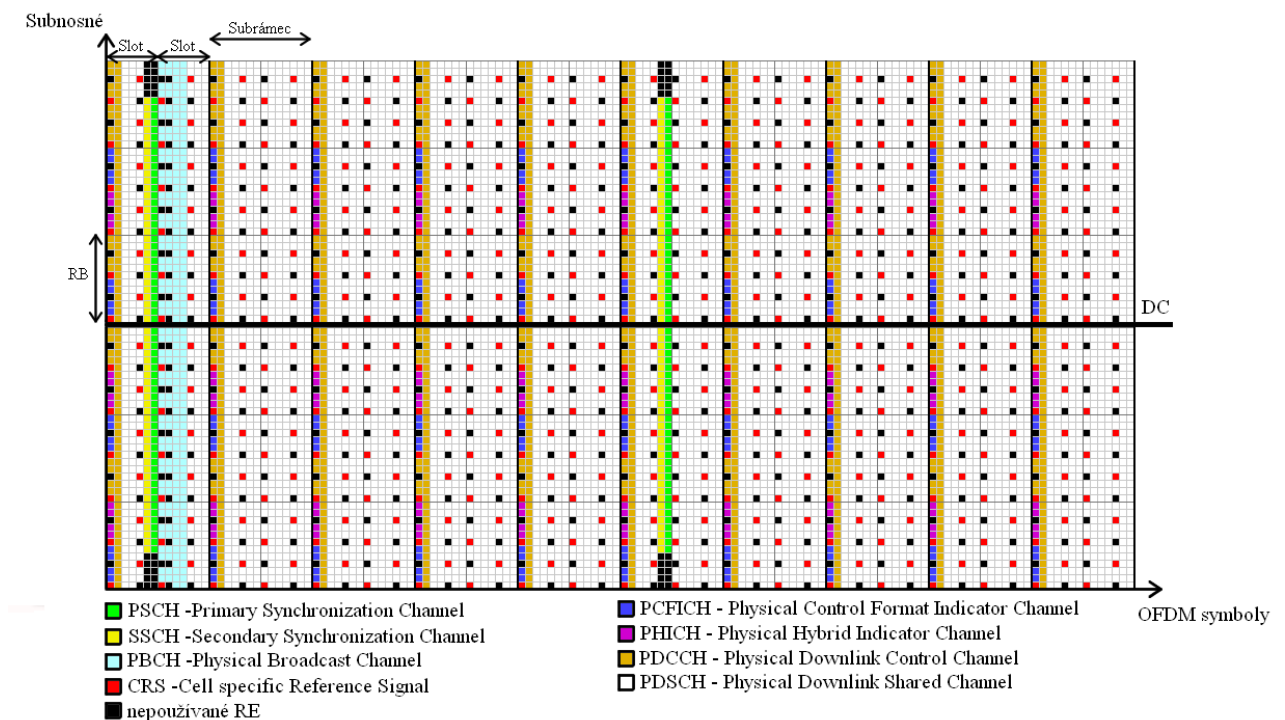
V LTE Release 9 [6] jsou specifikovány následující RS:

- Referenční signál buňky (CRS) se používá pro odhad sestupného kanálu PDSCH přenosu.
- MBSFN referenční signál. Tento signál je přenášen pouze v MBSFN režimu a jsou definovány pouze pro extended CP. Tyto signály jsou ve frekvenční doméně blíže u sebe, proto je možné dosáhnout lepšího odhadu přenosového kanálu.
- PRS je signál vyhrazený pro určování polohy na základě časového zpoždění.

Uživatelská a kontrolní data nejsou přenášena v DC složkách subnosných a v RE určených pro synchronizaci. Uživatelská a kontrolní data jsou přenášena v následujících kanálech:

- Fyzický vysílací kanál (PBCH) je fyzický kanál, který nese hlavní informaci o buňce, jako je například šířka pásma pro sestupný kanál
- Fyzický sestupný kanál (PDSCH) je fyzický kanál přenášející provozní data.
- Fyzická kontrola sestupného kanálu (PDCCH) je fyzický kanál, nesoucí informaci o přiděleném kanálu a řídicí informace.
- Fyzický „multicast“ kanál (PMCH) je fyzický kanál přenášející informaci při vysílání informace více uživatelům (point-to-multipoint).

Na Obr. 10 můžeme vidět frekvenčně časovou mřížku LTE signálu pro RB=6, rámce typu 1 (FDD), normální CP a vzorkovací frekvenci 1,92 MHz, což jsou parametry signálu, jehož zpracování je popsáno dále v této práci.



Obr. 10 – Frekvenčně časová mřížka LTE signálu

5. Generované signály

5.1. Primární synchronizační signál (PSS)

Primární synchronizační signál PSS je tvořen sekvencí ve frekvenční doméně. Jedná se o Zadoff-Chu sekvenci definovanou dle [6] následujícím předpisem:

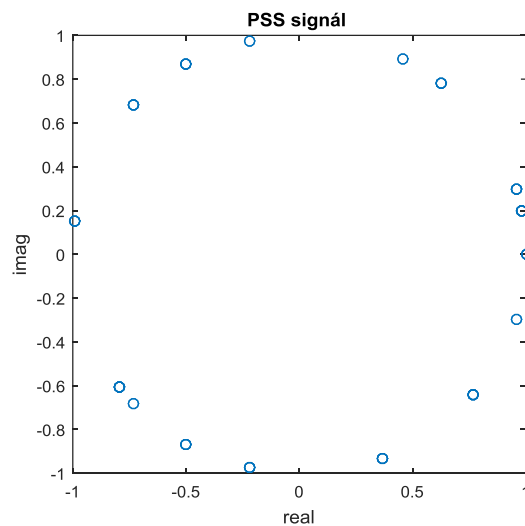
$$d_u(n) \begin{cases} \exp(-j \frac{\pi u n(n+1)}{63}) & (n = 0, 1, 2, \dots, 30) \\ \exp(-j \frac{\pi u (n+1)(n+2)}{63}) & (n = 31, 32, \dots, 61) \end{cases} \quad (5)$$

Kde index u je kořen Zadoff-Chu sekvence (Tab. 2).

$N_{ID}^{(2)}$	kořen u
0	25
1	29
2	34

Tab. 2 – kořeny Zadoff-Chu sekvencí

Příklad vygenerovaného signálu zobrazeného v konstelačním diagramu pro $N_{ID}^{(2)}=0$ (Obr. 11). Výsledkem je posloupnost 62 komplexních vzorků. Abychom mohli tuto sekvenci využít k detekci sektoru buňky, je nutné doplnit tuto sekvenci nulami, protože nosná (DC) a postranní pásma se nevyužívají k přenosu těchto signálů (Obr. 12).



Obr. 11 – PSS signál v konstelačním diagramu



Obr. 12 – struktura PSS signálu ve frekvenční doméně

5.2. Sekundární synchronizační signál (SSS)

Sekundární synchronizační signál (SSS) je tvořen dvěma posloupnostmi délky 31 bitů prokládaných podle (6) a (7). Jednotlivé bity nabývají hodnot 1 nebo -1. SSS signál je závislý na dvou parametrech. Jedním je číslo skupiny, ve které se nachází buňka ($N_{ID}^{(1)}$) nabývající hodnot 0 až 167 a druhým je subrámeček, ve kterém je signál vysílán.

$$d(2n) = \begin{cases} s_0^{(m_0)}(n) * c_0(n) & \text{pro subrámeček 0} \\ s_1^{(m_1)}(n) * c_0(n) & \text{pro subrámeček 5} \end{cases} \quad (6)$$

$$d(2n + 1) = \begin{cases} s_1^{(m_1)}(n) * c_1(n) * z_1^{(m_0)}(n) & \text{pro subrámeček 0} \\ s_0^{(m_0)}(n) * c_1(n) * z_1^{(m_1)}(n) & \text{pro subrámeček 5} \end{cases} \quad (7)$$

Kde $0 \leq n \leq 30$. Indexy m_0 a m_1 jsou odvozeny z $N_{ID}^{(1)}$:

$$m' = N_{ID}^{(1)} + \frac{q(q+1)}{2}, \quad q = \left\lfloor \frac{N_{ID}^{(1)} + q'(q'+1)/2}{30} \right\rfloor, \quad q' = \lfloor N_{ID}^{(1)}/30 \rfloor \quad (8)$$

$$m_1 = \left(m_0 + \left\lfloor \frac{m'}{31} \right\rfloor + 1 \right) \text{mod} 31 \quad (9)$$

$$m_0 = m' \text{mod} 31 \quad (10)$$

Kde mod je celočíselný zbytek po dělení a $\lfloor \cdot \rfloor$ značí nejbližší celé nižší číslo (v Matlabu funkce fix()).

Dvě posloupnosti $s_0^{(m_0)}(n)$ a $s_1^{(m_1)}(n)$ jsou definovány jako posunuté m -posloupnosti $\tilde{s}(n)$:

$$s_0^{(m_0)}(n) = \tilde{s}((n + m_0) \bmod 31) \quad (11)$$

$$s_1^{(m_1)}(n) = \tilde{s}((n + m_1) \bmod 31) \quad (12)$$

Kde $\tilde{s}(i) = 1 - 2x(i)$ pro $0 \leq i \leq 30$ definované jako

$$x(\bar{i} + 5) = (x(\bar{i} + 2) + x(\bar{i})) \bmod 2 \quad (13)$$

pro $0 \leq \bar{i} \leq 25$ s počátečními podmínkami $x(0)=0$, $x(1)=0$, $x(2)=0$, $x(3)=0$, $x(4)=1$.

Dvě kódovací posloupnosti $c_0(n)$ a $c_1(n)$ jsou závislé na $N_{ID}^{(2)}$ nebo-li PSS a jsou dány cyklickým posunem:

$$c_0(n) = \tilde{c}((n + N_{ID}^{(2)}) \bmod 31) \quad (14)$$

$$c_1(n) = \tilde{c}((n + N_{ID}^{(2)} + 3) \bmod 31) \quad (15)$$

Kde $\tilde{c}(i) = 1 - 2x(i)$ pro $0 \leq i \leq 30$ definované jako

$$x(\bar{i} + 5) = (x(\bar{i} + 3) + x(\bar{i})) \bmod 2 \quad (16)$$

pro $0 \leq \bar{i} \leq 25$ s počátečními podmínkami $x(0)=0$, $x(1)=0$, $x(2)=0$, $x(3)=0$, $x(4)=1$.

Dvě šifrovací posloupnosti $z_1^{(m_0)}(n)$ a $z_1^{(m_1)}(n)$ jsou definovány jako cyklicky posunuté posloupnosti $\tilde{z}(n)$:

$$z_1^{(m_0)}(n) = \tilde{z}((n + (m_0 \bmod 8)) \bmod 31) \quad (17)$$

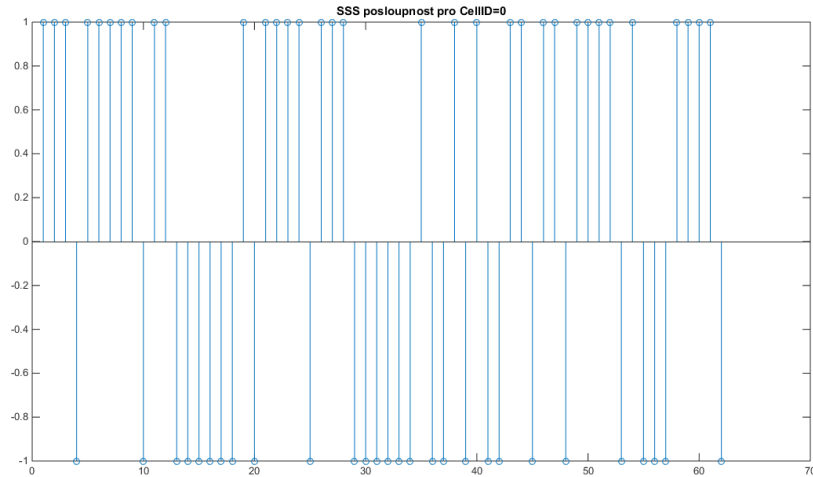
$$z_1^{(m_1)}(n) = \tilde{z}((n + (m_1 \bmod 8)) \bmod 31) \quad (18)$$

Kde $\tilde{z}(i) = 1 - 2x(i)$ pro $0 \leq i \leq 30$ definované jako:

$$x(\bar{i} + 5) = (x(\bar{i} + 4) + x(\bar{i} + 2) + x(\bar{i} + 1) + x(\bar{i})) \bmod 2 \quad (19)$$

pro $0 \leq \bar{i} \leq 25$ s počátečními podmínkami $x(0)=0, x(1)=0, x(2)=0, x(3)=0, x(4)=1$.

Výstupem je posloupnost ± 1 o délce 62 (příklad na Obr. 13).



Obr. 13 – SSS posloupnost délky 62 bitů pro CellID=0 ve slotu 0

5.3. Referenční signály buňky (CRS)

Signály CRS jsou přenášeny v sestupném kanálu PDSCH. Definovány jsou pouze pro rozteč subnosných $\Delta f=15$ kHz.

$$r_{l,n_s}(m) = \frac{1}{\sqrt{2}} * (1 - 2 * c(2m)) + j * \frac{1}{\sqrt{2}} * (1 - 2 * c(2m + 1)) \quad (20)$$

Kde: $m - 0, 1, \dots, 2 * N_{RB}^{\max, DL} - 1$

n_s - číslo slotu v rámci

l - číslo OFDM symbolu ve slotu

$c(i)$ - pseudonáhodná sekvence

$N_{RB}^{\max, DL} = 110$

Pseudonáhodná posloupnost $c(i)$ je generována podle:

$$c(n) = (x_1(n + N_C) + x_2(n + N_C)) \bmod 2 \quad (21)$$

$$x_1(n + 31) = (x_1(n + 3) + x_1(n)) \bmod 2 \quad (22)$$

$$x_2(n + 31) = (x_2(n + 3) + x_2(n + 2) + x_2(n + 1) + x_2(n)) \bmod 2 \quad (23)$$

Kde $N_C=1600$ a první m -posloupnost je inicializována: $x_1(0)=1, x_1(n)=0, n=1,2,\dots,30$. Druhá m -posloupnost je popsána rovnicí:

$$c_{init} = \sum_{i=0}^{30} x_2(i) * 2^i \quad (24)$$

Pro signál CRS:

$$c_{init} = 2^{10} * (7 * (n_s + 1) + l + 1) * (2 * N_{ID}^{cell} + 1) + 2 * N_{ID}^{cell} + N_{CP} \quad (25)$$

Kde $N_{CP}=1$ pro normální CP a $N_{CP}=0$ pro rozšířený CP.

Inicializace x_2 získáme převedením dekadické hodnoty c_{init} do binárního tvaru jak uvádí (24).

Po vygenerování je nutné jednotlivé QPSK symboly mapovat do příslušných RE.

$$a_{k,l} = r_{l,n_s}(m') \quad (26)$$

Kde: $k = 6 * m + (v + v_{shift}) \bmod 6$

$$l = \begin{cases} 0, N_{symb}^{DL} - 1 \dots p \in \{0,1\} \\ 1 \dots p \in \{2,3\} \end{cases}$$

$$m = 0,1, \dots, 2 * N_{RB}^{DL} - 1$$

$$m' = m + N_{RB}^{max,DL} - N_{RB}^{DL}$$

$$v_{shift} = N_{ID}^{cell} \bmod 6$$

$$v = \begin{cases} 0 & \text{if } p = 0 \text{ and } l = 0 \\ 3 & \text{if } p = 0 \text{ and } l \neq 0 \\ 3 & \text{if } p = 1 \text{ and } l = 0 \\ 0 & \text{if } p = 1 \text{ and } l \neq 0 \\ 3(n_s \bmod 2) & \text{if } p = 2 \\ 3 + 3(n_s \bmod 2) & \text{if } p = 3 \end{cases}$$

5.4. Signály pro určování polohy (PRS)

Pro synchronizaci s okolními buňkami pomocí signálů CRS (kapitola 5.3) je nutný odstup SINR > -6 dB. Z tohoto důvodu byly do specifikace LTE release 9 [6] přidány další signály PRS (Positioning reference signals) pro určování polohy.

Signály PRS jsou přenášeny pouze v sestupném kanálu, pro který je definována metoda určování polohy OTDOA [8].

PRS signály nelze přenášet v RE určených pro PBCH, PSS a SSS. PRS signály jsou definovány a modulovány stejně jako signály CRS (5.3), liší se jen způsobem mapování:

$$a_{k,l} = r_{l,n_s}(m') \quad (27)$$

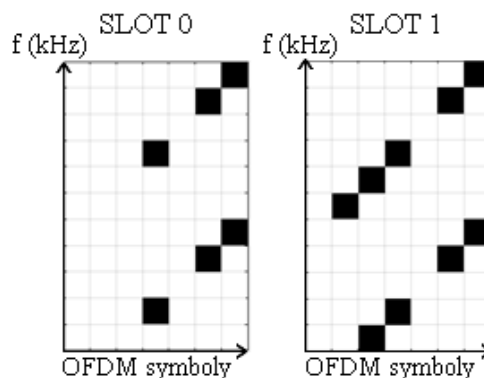
Kde: $k = 6 * (m + N_{RB}^{DL} - N_{RB}^{PRS}) + (6 - l + v_{shift}) \bmod 6$

$$l = \begin{cases} 3,5,6 \dots n_s \bmod 2 = 0 \\ 1,2,3,5,6 \dots n_s \bmod 2 = 1 \text{ a } p = 1 \text{ nebo } 2 \\ 2,3,5,6 \dots n_s \bmod 2 = 1 \text{ a } p = 4 \end{cases}$$

$$m = 0,1, \dots, 2 * N_{RB}^{PRS} - 1$$

$$m' = m + N_{RB}^{max,DL} - N_{RB}^{PRS}$$

Modulované a mapované PRS symboly jsou obsaženy společně s CRS v tzv. navigačních subrámcích, ve kterých nejsou přenášena žádná uživatelská data [7] a slouží k určování polohy pomocí metody OTDOA [8]. Mapování zajišťuje cyklický posun signálů ve frekvenční oblasti, díky čemuž je zamezeno interferencím mezi sousedními buňkami. Mapování je rozdílné pro sudý a lichý slot v subrámcí (Obr. 14).



Obr. 14 – Mapování PRS signálů pro 1 RB

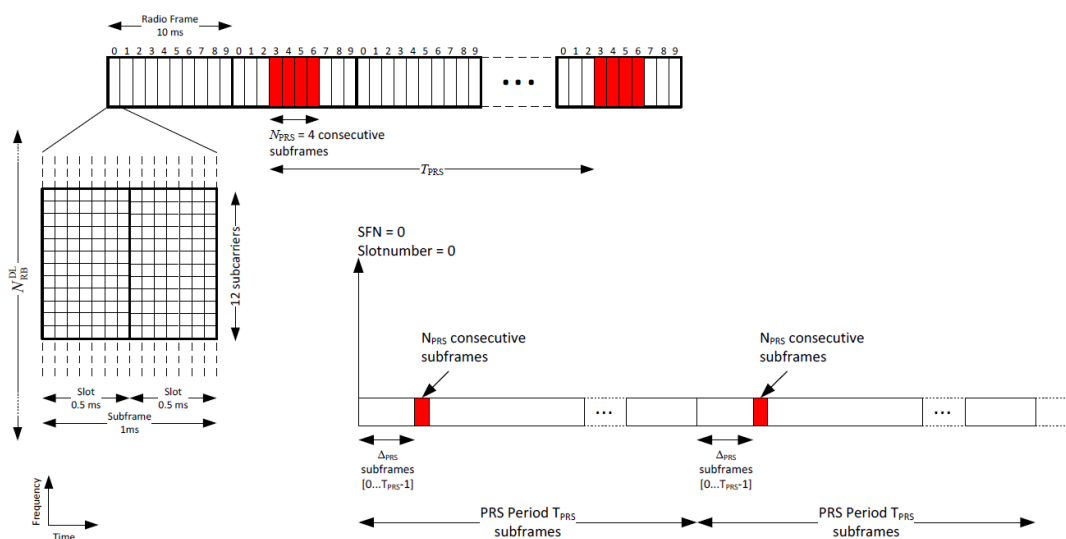
Navigační subrámcce jsou vysílány v předem definovaných skupinách o délce N_{PRS} , které jsou nazývány navigačními příležitostmi „position occasion“. Počet subrámců ve zmíněné skupině může být 1, 2, 4 nebo 6. Skupiny jsou vysílány s periodou T_{PRS} . Ta může být 160, 320, 640 nebo 1280 ms.

Třetím parametrem je offset signálů PRS Δ_{PRS} , který je společně s periodou T_{PRS} definován PRS konfiguračním indexem I_{PRS} podle Tab. 3.

I_{PRS}	T_{PRS}	Δ_{PRS}
0-159	160	I_{PRS}
160-479	320	$I_{PRS}-160$
480-1119	640	$I_{PRS}-480$
1120-2399	1280	$I_{PRS}-1120$
2400-4095	rezervováno	

Tab. 3 – Periodicita navigačních subrámců

Pro názornou ukázkou je zobrazen na Obr. 15 příklad z [8] pro $N_{PRS}=4$.



Obr. 15 – Příklad navigačních příležitostí [8]

6. Zpracování signálu LTE pro určování polohy

6.1. Model signálu

Pro vývoj algoritmu byl vybrán software Matlab [11]. Nejdříve byly vyvinuty funkce generující potřebné signály pro další zpracování popsané v kapitole 5.

Pro synchronizaci a identifikaci buňky je nutné mít k dispozici primární a sekundární synchronizační signál. K tomu slouží funkce *gen_pss* a *gen_sss*. (Příloha 1 a Příloha 2).

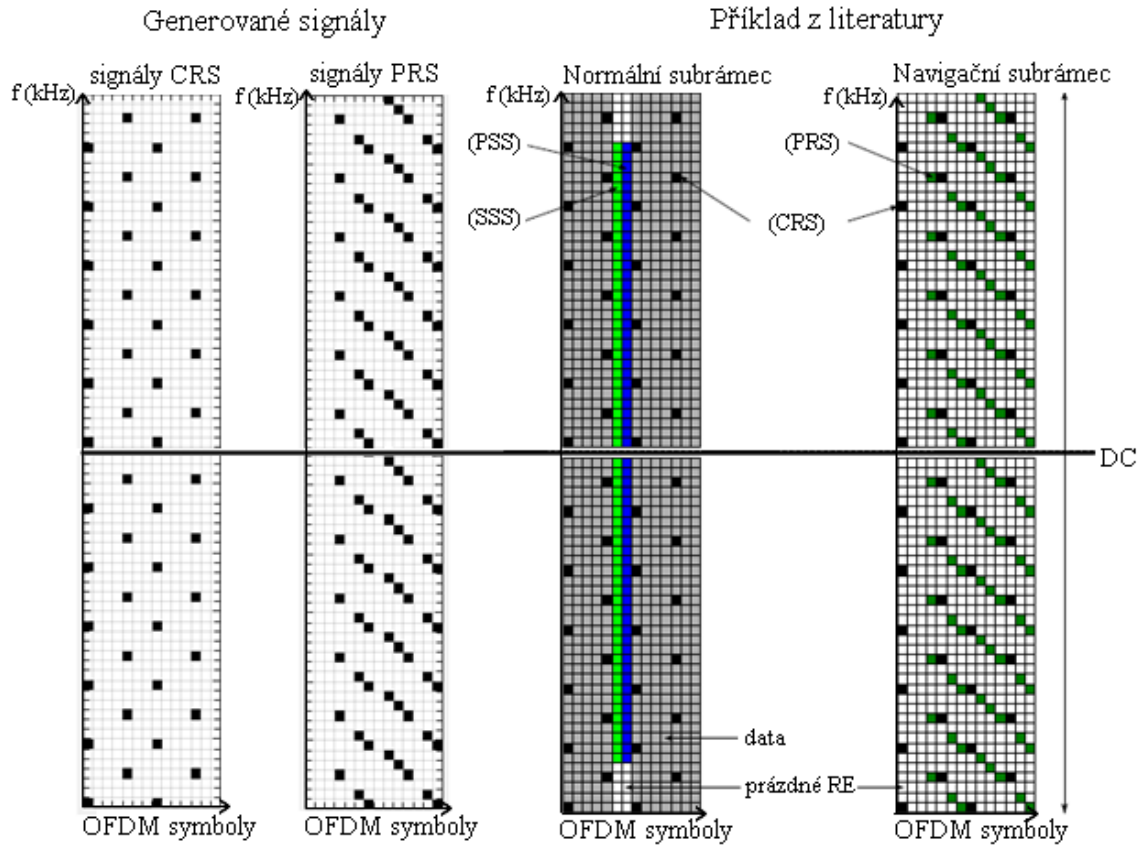
Funkce *gen_pss(N_{ID})* generuje posloupnost 62 komplexních čísel, která tvoří PSS posloupnost. Vstupní proměnnou je N_{ID} , představující sektor buňky a nabývající hodnot 0 až 2.

Funkce *gen_sss(N_{ID1},N_{ID2},ts)*, generuje posloupnost délky 62 hodnot ± 1 . N_{ID1} je skupina buňky 0 až 167, N_{ID2} je sektor 0 až 2 a ts značí 1. nebo 10. slot v LTE rámci (Obr. 10).

Dále jsou součástí vysílaného LTE rámce signály CRS, které slouží k odhadu kanálu. Pro generování těchto signálů byla napsána funkce *gen_crs(Cell ID,ns,NRBDL)* (Příloha 3), kde Cell ID je číslo buňky, ns číslo slotu a NRBDL šířka pásma sestupného kanálu v jednotkách RB. Výstup je stejný jako v případě funkce *gen_prs*.

Pro určování polohy potřebujeme generovat a mapovat signály PRS. Pro tento účel byla napsána funkce *gen_prs(Cell ID,ns,NRBDL,NRBPRS)* (Příloha 4), kde Cell ID je číslo buňky, ns je číslo slotu, NRBDL je šířka pásma sestupného kanálu v jednotkách RB a NRBPRS je šířka pásma, ve kterém jsou přenášeny signály PRS v jednotkách RB. Výstupem je matice, jejíž řádky představují jednotlivé subnosné a jejich počet je $12 \cdot NRBPRS$. Sloupce představují jednotlivé OFDM symboly v LTE slotu (Obr. 10).

Výstupy funkcí byly srovnány s výstupy z LTE toolboxu Matlabu [13] a literatury [14], [15].



Obr. 16 – Srovnání generovaných signálů s příkladem z literatury [15]

Pro návrh algoritmu určování polohy bylo vymodelováno území s rozmístěnými čtyřmi buňkami, které jsou rozmístěné na ploše s poloměrem 5km, pro modelování městských mikro buněk podle normy 3GPP [16].

$$L_{dB} = 40 \log_{10}(d) + 7.8 - 18 \log_{10}(h'_{BS}) - 18 \log_{10}(h'_{MS}) + 2 \log_{10}(f_c) \quad (28)$$

Kde: L_{dB} – útlum signálu od dané buňky (dB)

h'_{BS} – efektivní výška antény BS (m)

h'_{MS} – efektivní výška antény MS (m)

f_c – nosná frekvence (GHz)

d – vzdálenost mezi MS a BS (m)

Dále je zvolena poloha, kde se nachází přijímač, kterou potřebujeme k výpočtu zpoždění signálů od jednotlivých základnových stanic. Pro výpočet zpoždění slouží funkce $gen_radius(a,b)$ (Příloha 5), kde a a b jsou vektory o dvou prvcích představující souřadnice x a y MS a BS. Výstupem je vzdálenost v metrech, ze které určíme zpoždění ve vzorcích:

$$DS = \frac{R}{c} * f_{vz} \quad (29)$$

Kde: DS – zpoždění ve vzorcích

R – vzdálenost mezi MS a BS (m)

c – rychlost světla (m/s)

Signál na straně přijímače je následně složen ze signálů od jednotlivých buněk, které jsou utlumeny v závislosti na vzdálenosti.

$$tx = \sum_{i=1}^{N_{BS}} \frac{tx_{BS}(i)}{L(i)} \quad (30)$$

Kde: tx – výsledný přijatý signál

$tx_{BS}(i)$ – zpožděný signál od i -té BS

$L(i)$ – útlum signálu od i -té MS

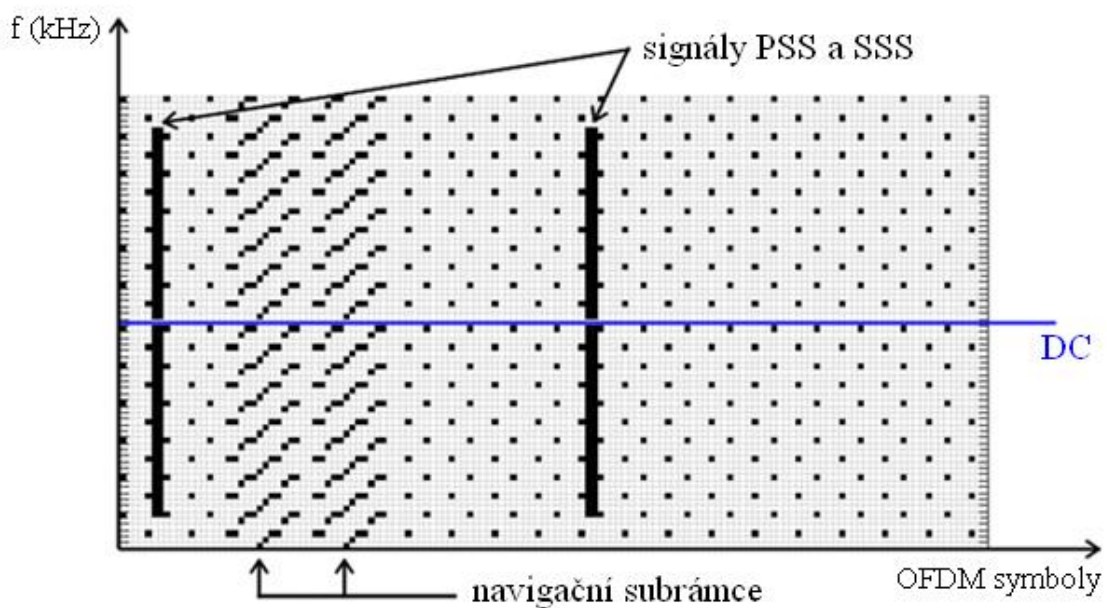
N_{BS} – počet přijímaných BS

6.2. Struktura generovaného LTE rámce

Pro určování polohy byly vygenerovány testovací LTE rámce, které obsahují navigační subrámce pro demonstraci algoritmu pro určování polohy a signály nutné k identifikaci buňky.

Generovaný LTE rámec se skládá z dvaceti subrámců. V každém subrámci jsou modulovány CRS signály podle [14]. Ve slotu 0 subrámce 0 a subrámce 5 jsou signály SSS a PSS pro identifikaci buňky (Obr. 20). Dále jsou modulovány signály PRS v navigačních subrámcích, které jsou v rámci umístěny podle Tab. 3. Signály PRS nesmí být obsaženy v subrámcích s PSS, SSS a PBCH [8]. Data nejsou generována, protože podle [18] je buňka vysílá jen při komunikaci s mobilní stanicí a tato komunikace není nezbytná pro určování polohy. V subrámcích pro určování polohy nejsou data přenášena nikdy.

Pro generování LTE rámce byla naprogramována funkce $gen_frame(N_{ID1}, N_{ID2}, NRBDL)$, kde N_{ID1} je skupina buňky (nabývající hodnoty z rozmezí 0 až 167), N_{ID2} je sektor 0 až 2 a $NRBDL$ je šířka pásma v RB. Výstupem je signál v časové oblasti, dlouhý 19200 vzorků, což odpovídá jednomu LTE rámci při zvolené šířce pásma 6 RB. Na Obr. 17 můžeme vidět vygenerovaný LTE rámec v podobě frekvenčně časové mřížky před převedením do časové oblasti a obsahuje dva navigační subrámce, signály pro identifikaci buňky (PSS a SSS) a signály CRS.



Obr. 17 – generovaný LTE rámec zobrazený v mřížce.

6.3. Hledání počátku symbolu

Prvním krokem při zpracování přijatého signálu modulovaného OFDM modulací je nalezení počátku OFDM symbolu. K tomu je využíván Van de Beckův algoritmus [21], který funguje na základě funkce maximální věrohodnosti a je popsán v této kapitole.

$$\hat{\tau}_0 = \arg \max_{\tau} \{|\gamma(\tau)| - \rho * \Phi(\tau)\} \quad (31)$$

$$\gamma(\tau) = \sum_{k=\tau}^{\tau+N_{CP}-1} x(k) * x^*(k+N) \quad (32)$$

$$\Phi(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{k=\tau}^{\tau+N_{CP}-1} |x(k)|^2 + |x(k+N)|^2 \quad (33)$$

Kde: $x(k)$ - jednotlivé vzorky diskrétního signálu

k - posun celého výpočtu

N_{CP} - délka CP ve vzorcích

$\hat{\tau}_0$ - index maxima odpovídající časovému posunu

ρ - korelační koeficient

$$\rho = \left| \frac{E\{x(k) * x(k+N)\}}{\sqrt{E\{|x(k)|^2 E\{|x(k+N)|^2\}}}} \right| = \frac{SNR}{SNR + 1} \quad (34)$$

Algoritmus využívá redundantní informace v podobně CP k hrubému odhadu časového posunu počátku symbolu pomocí autokorelační funkce $\gamma(\tau)$, energie $\Phi(\tau)$ a posuvného okna o velikosti N_{CP} .

OFDM modulace je velmi citlivá na frekvenční offset (CFO). Ten se skládá ze dvou částí:

Hrubý frekvenční offset (FFO) je možné vyjádřit vztahy:

$$\hat{\nu}_0 = -\frac{1}{2\pi T} \arg\{\gamma(\hat{\tau}_0)\} \quad (35)$$

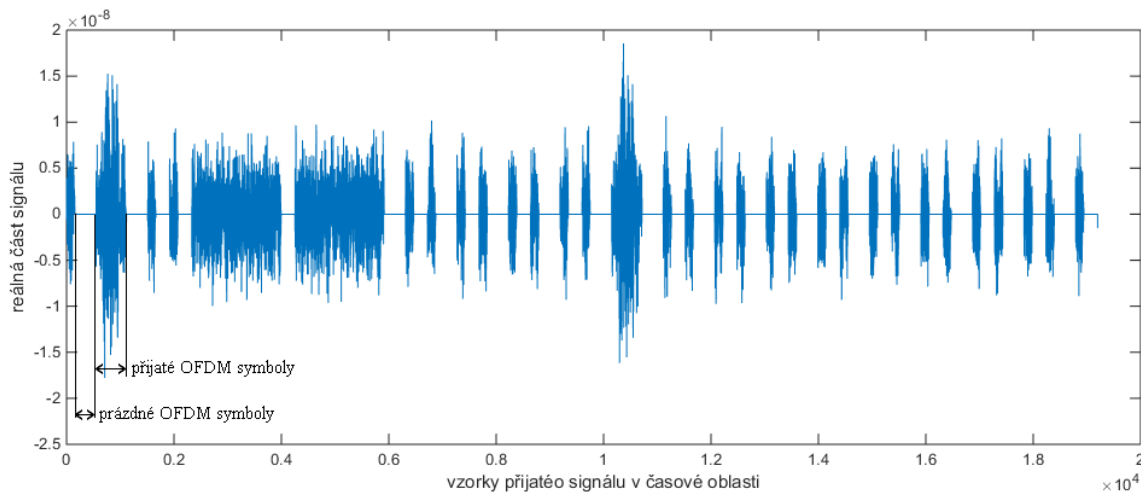
$$\hat{f}_0 = \hat{\nu}_0 * T = -\frac{1}{2\pi} \arg\{\hat{\tau}_0\} \quad (36)$$

Kde T je perioda OFDM symbolu (66,67us).

Nyní lze provést kompenzaci časového ($\hat{\tau}_0$) a frekvenčního offsetu (\hat{f}_0).

$$y(k) = x(k + \hat{\tau}_0) * \exp(-j \frac{2\pi k \hat{f}_0}{N}) \quad (37)$$

Bohužel v LTE síti nelze využít tohoto přístupu přímo, protože BS nevysílá data nepřetržitě, ale jen na vyžádání MS. Zobrazíme-li si reálnou část modelovaného signálu v časové oblasti, který přijme MS (Obr. 18), vidíme přijaté a prázdné OFDM symboly.



Obr. 18 – reálná část modelovaného signálu v časové oblasti

Van de Beckův algoritmus [21] počítá s nepřetržitým datovým tokem bez prázdných symbolů. Dalším problémem je zpracovávání nejnižší využívané šířky pásma, které odpovídají malé počty vzorků připadající na CP.

Přístupů k řešení těchto problémů je více. Autor [4] řeší problém hledáním počátku symbolu a výpočtu korelačního koeficientu ρ přes celý slot. Koeficient ρ je konstanta, jejíž hodnota není správná právě při zpracování prázdných symbolů. To má za následek vysokou pravděpodobnost falešné detekce v případě přerušového datového toku. Při hledání přes celý slot se snižuje pravděpodobnost falešného určení počátku symbolu [18].

Dále lze využít průměrování přes více OFDM symbolů [22]. Průměrování probíhá přes sedm OFDM symbolů odpovídající trvání jednoho LTE slotu a zahrnuje vliv delšího CP u prvního symbolu v LTE slotu.

$$\gamma(\tau) = \sum_{m=0}^{M1-1} x(\tau + m) * x^*(\tau + N + m) + \sum_{k=0}^5 \sum_{m=0}^{M2-1} x^*(\tau + M1 + k * M2 + (k + 1) * N + m) * x(\tau + M1 + k * M2 + (k + 2) * N + m) \quad (38)$$

$$\Phi(\tau) = \sum_{i=0}^{M1-1} x(\tau + i) * x^*(\tau + i) + \sum_{k=0}^5 \sum_{i=0}^{M2-1} x(\tau + M1 + k * M2 + (k + 1) * N + i) * x^*(\tau + M1 + k * M2 + (k + 1) * N + i) \quad (39)$$

$$\hat{\tau}_0 = \arg \max_{\tau} \left\{ \left(\frac{|\gamma(\tau)|}{\Phi(\tau)} \right)^2 \right\} \quad (40)$$

$$\hat{f}_o = \frac{1}{2\pi} \arg\{\hat{\tau}_0\} \quad (41)$$

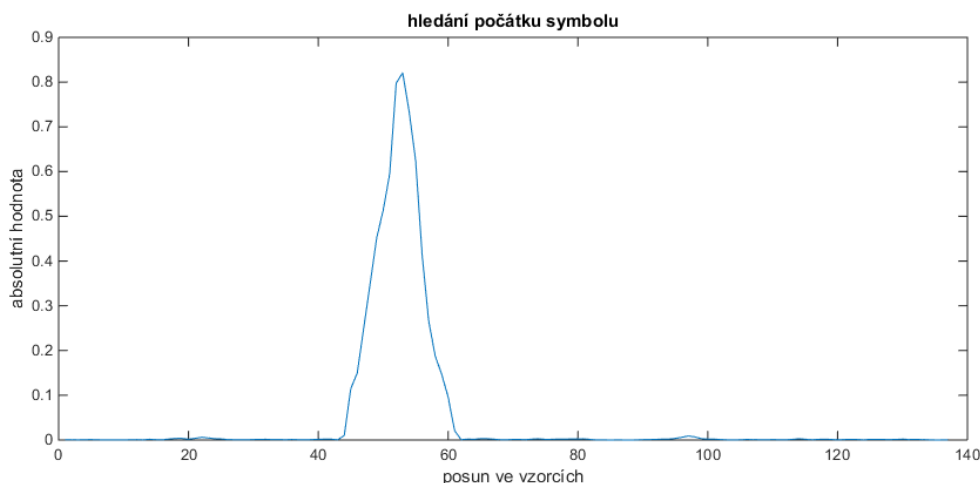
Kde: M1 – delší CP

M2 – kratší CP

N – délka OFDM symbolu ve vzorcích

Tento algoritmus umožňuje detekovat nejen počátek symbolu, ale i počátek slotu. Bohužel při zpracování signálu s vzorkovací frekvencí 1,92 MHz (Tab. 1) je rozdíl v délce prefixů jen jeden vzorek (Obr. 9) a detekce počátku slotu není spolehlivá. Další metody jsou popsány v [27] v kapitole 4.2.

Detekce počátku symbolu s tímto algoritmem dosahuje stejných výsledků jako řešení podle autora [4]. Pro kompenzaci časového offsetu hledáme maximum funkce, jak je uvedeno v (40). Příklad průběhu funkce pro prvních 137 vzorků odpovídajících délce OFDM symbolu s CP je na Obr. 19. Ke hledání počátku OFDM symbolu slouží funkce *det_poc_sym(signal,prepo)* (Příloha 1), kde *signal* je přijatý navzorkovaný signál v časové oblasti a *prepo* je hodnota pro přepočítání počtu vzorků FFT podle zpracovávané šířky pásma.



Obr. 19 – funkce hledání počátku symbolu

6.4. Hledání buňky (Cell ID)

Po prvotní synchronizaci je možné přistoupit k hledání identifikačního čísla buňky.

$$N_{ID}^{cell} = 3 * N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} \quad (42)$$

Kde:

$N_{ID}^{(1)}$ – skupina (nabývá hodnot 0 až 167)

$N_{ID}^{(2)}$ - sektor ze skupiny (nabývá hodnot 0, 1 nebo 2)

Pro hledání buňky bylo vyvinuto několik různých metod například: [23], [24], [25] a [26]. Z informací získaných při hledání buňky se zároveň provádí synchronizace LTE rámce.

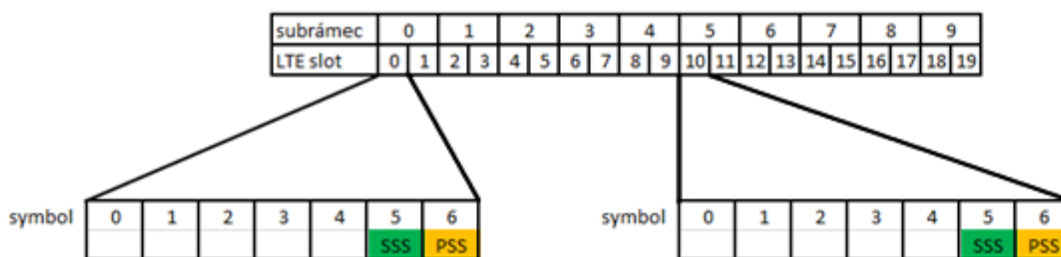
Signál určující sektor je jednou ze tří sekvencí, které jsou popsány v kapitole 5.1. Pomocí těchto signálů zároveň zajistíme synchronizaci poloviny rámce.

Signál určující skupinu je jednou ze 168 sekvencí popsanych v kapitole 5.2. Druhým účelem těchto signálů je dokončení synchronizace rámce, protože sekvence je závislá na slotu, ve kterém se nachází.

Nejčastěji se jako první hledá sektor buňky. Vyhledávání může být provedeno v časové, nebo frekvenční oblasti. Vyhledáváním v časové oblasti se v této práci zabývat nebudeme, protože synchronizační signály jsou přenášeny na 62 subnosných okolo DC nosné (Obr. 12). Dále je přenášeno 10 prázdných subnosných a zbytek slouží k přenosu dat. Pro detekci v časové doméně je tedy nutné provést nejdříve filtraci, která sebou nese zvýšené nároky na

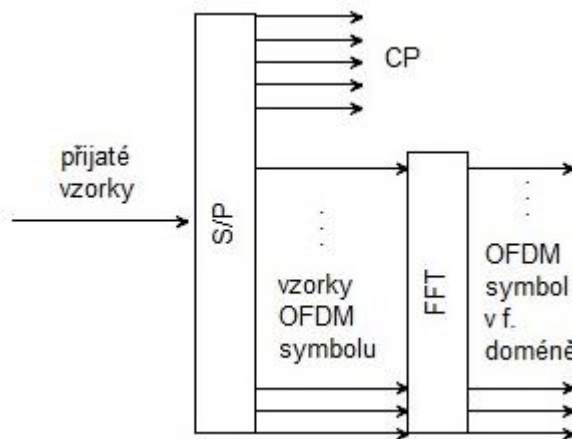
hardware a může být narušena synchronizace [29]. Z těchto důvodů se doporučuje detekce ve frekvenční oblasti po aplikaci FFT, kterou se zabývá i tato práce.

Pro detekci signálu PSS použijeme 70 po sobě následujících OFDM symbolů, které dohromady tvoří polovinu LTE rámce, protože PSS signály jsou vysílány dvakrát za dobu trvání jednoho LTE rámce (Obr. 20).



Obr. 20 – Umístění signálů PSS a SSS v LTE rámci

Pro OFDM demodulaci je nutné získat symboly vysílané na jednotlivých subnosných. K tomu slouží rychlá Fourierova transformace implementovaná v Matlabu jako funkce `fft()` [28]. Ta je aplikována na přijatý OFDM symbol v časové oblasti po odstranění ochranného intervalu CP (Obr. 21).



Obr. 21 - OFDM demodulace

Počet vzorků, který odpovídá jednomu OFDM symbolu je závislý na šířce pásma zpracovávaného signálu (Tab. 1).

Každý ze zpracovávaných přijatých 70 OFDM symbolů je pomocí kruhové korelace (43) porovnáván s generovanou PSS sekvencí.

$$corr = \text{ifft}(OFDMsymbol.* \text{conj}(PSS)) \quad (43)$$

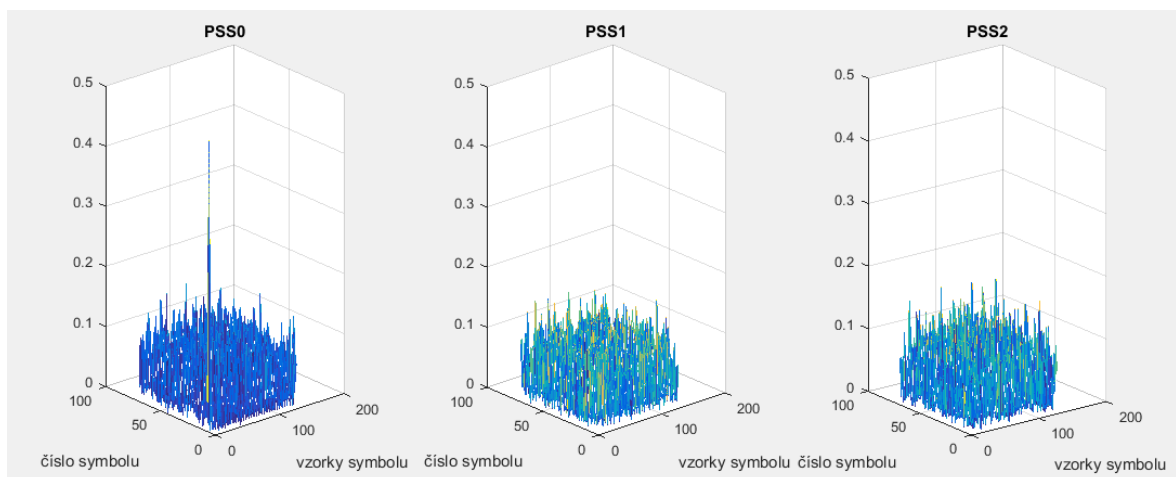
Kde: `ifft()` – implementace inverzní diskrétní Fourierovy transformace

OFDM symbol – vektor vzorků jednoho OFDM symbolu

`conj()` – komplexně sdružené vzorky

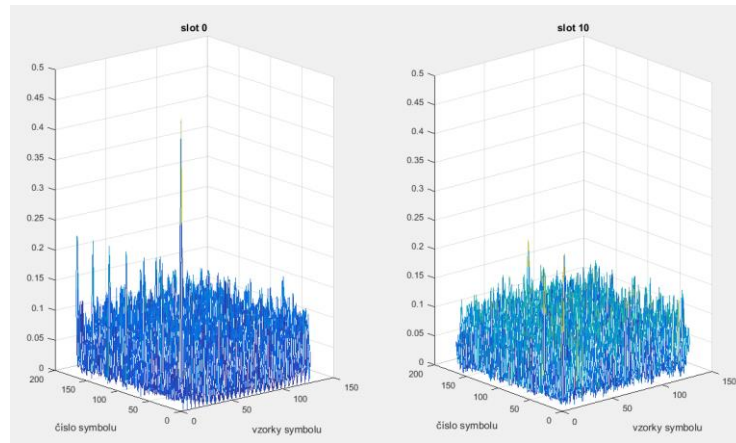
PSS – generovaná replika PSS sekvence

Výsledkem je výrazné maximum v jednom symbolu pro jednu PSS posloupnost určující sektor obsluhující buňky (Obr. 22).



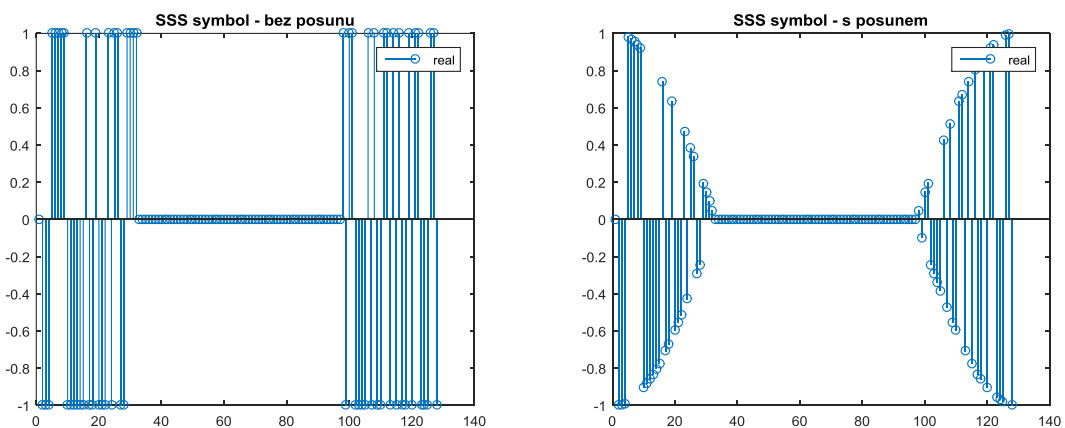
Obr. 22 – Detekován PSS signál pro sektor 0

Po detekci sektoru je vybrán OFDM symbol předcházející OFDM symbolu, ve kterém byla detekována posloupnost PSS (podle Obr. 20) a tento symbol je pomocí kruhové korelace porovnáván se všemi SSS 168 sekvencemi pro slot 0 a 10. Výsledkem je opět výrazné maximum pro jednu sekvenci (Obr. 23).



Obr. 23 – Detekována skupina buňky pro slot 0

Pro detekci SSS sekvence je důležitá správná synchronizace. Pokud vybereme posloupnost vzorků posunutou v časové oblasti, projeví se tento posun ve frekvenční oblasti jako násobení komplexní exponenciálou, jak můžeme vidět na Obr. 24.



Obr. 24 – vliv časového posunu na SSS symbol

Po synchronizaci buňky máme veškeré informace, které potřebujeme k synchronizaci LTE rámce.

Popsaný algoritmus pro vyhledání buňky obstarává funkce *det_cell(signal,prepo)* (Příloha 7), kde *signal* je posloupnost přijatých vzorků, která je synchronizována pomocí algoritmu

z kapitoly 6.3 a *prepo* je hodnota pro přepočítání počtu vzorků FFT podle šířky pásma zpracovávaného signálu. Výstupem funkce *det_cell* je Cell ID, nebo-li číslo obsluhující buňky a dále počátek, který určuje počet vzorků, o který musíme posunout počátek signálu, aby odpovídal začátku LTE rámce.

Algoritmus pro určení počátku LTE rámce je následující:

- Podle detekované SSS posloupnosti určíme, zda zpracovávané OFDM symboly jsou z první nebo druhé poloviny LTE rámce. Tuto informaci získáme detekcí SSS sekvence (Obr. 23).
- Podle pořadí symbolu, ve kterém je detekována PSS sekvence vybereme OFDM symboly tak, aby byl OFDM symbol obsahující PSS sekvenci v sedmém OFDM symbolu (Obr. 20).
 - Je-li pořadí OFDM symbolu s PSS sekvencí menší než 7, musíme se synchronizovat na následující LTE rámec, protože zpracovávaný LTE rámec není přijatý celý. Pak můžeme určit počátek LTE rámce:

$$poc = -[(sym - 7) * (N + N_{CP})] + frame + (N_{CPd} - N_{CP}) \quad (44)$$

Kde: *poc* – o kolik vzorků musíme posunout počátek signálu
sym – kolikátý symbol obsahuje PSS sekvenci (1 až 70)
N – délka OFDM symbolu ve vzorcích
N_{CP} – délka ochranného intervalu ve vzorcích
N_{CPd} – *N_{CP}* pro první OFDM symbol v subrámcí
frame – délka LTE rámce ve vzorcích

- Je-li detekováno PSS v sedmém OFDM symbolu, posuneme počátek rámce pouze o rozdíl délky ochranného intervalu prvního OFDM symbolu subrámcí *N_{CPd}* a *N_{CP}*.

$$poc = N_{CPd} - N_{CP} \quad (45)$$

- Je-li pořadí OFDM symbolu s PSS sekvencí 8 a více:

$$poc = [(sym - 7) * (N + N_{CP})] + fix\left(\frac{sym}{7}\right) * (N_{CPd} - N_{CP}) \quad (46)$$

Kde: $fix\left(\frac{sym}{7}\right)$ určuje počet N_{CPd}

Funkčnost algoritmu pro hledání buňky a LTE rámce byl ověřen na modelu signálu generovaného pomocí Matlab LTE Toolboxu [13]. K tomu slouží funkce `lteTestModelTool`. Vstupními parametry jsou šířka pásma pro sestupný kanál, číslo modelu (popsáno v [19] kapitola 6.1.1) a číslo buňky Cell ID a dále na signálu generovaném postupem popsáným v kapitole 6.2.

6.5. Určování polohy

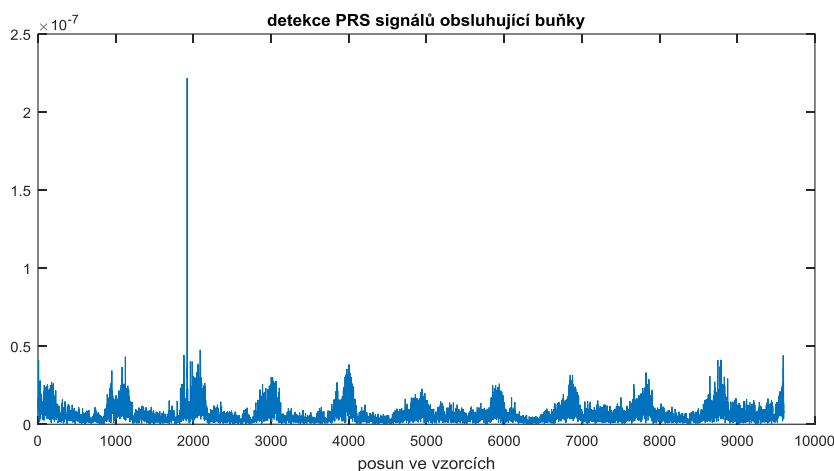
Po synchronizaci LTE rámce je možné přistoupit k určování polohy. V této práci je zkoumána metoda OTDOA [30] v LTE síti, které využívá signály PRS (5.4) vysílané v navigačních subrámcích.

Pro určení polohy potřebujeme znát rozdíly doby příchodu signálu od dvojic buněk. Dvojici tvoří vždy obsluhující buňka a jedna z buněk okolních.

Pro určení polohy si vygenerujeme repliky skupin navigačních subrámců, které tvoří tzv. navigační příležitosti (5.4) v časové oblasti pro všechny přijímané buňky. K tomu slouží funkce $gen_ref_prs(N_{ID1}, N_{ID2}, NRBDL, prepo)$ (Příloha 9), kde N_{ID1} je skupina buňky 0 až 167, N_{ID2} je sektor 0 až 2, $NRBDL$ je šířka pásma v RB a $prepo$ slouží k přepočtu počtu vzorků FFT podle zpracovávané šířky pásma.

Jednotlivé repliky pak pomocí korelace v časové oblasti [34] porovnáváme se synchronizovaným přijatým signálem.

Výsledkem jsou signály s jedním výrazným maximem (příklad pro obsluhující buňku na Obr. 25).



Obr. 25 – detekce PRS signálů obsluhující buňky

Z polohy jednotlivých maxim určíme rozdíly doby příchodu signálů ve vzorcích a ty následně jednoduše přepočítáme na vzdálenost t_{doa} (m) pro výpočet polohy.

$$t_{doa}(i) = \frac{t(1) - t(i)}{f_{vz}} * c \quad (47)$$

Kde: $t_{doa}(i)$ – konstantní vzdálenost pro konstrukci hyperbol (m)

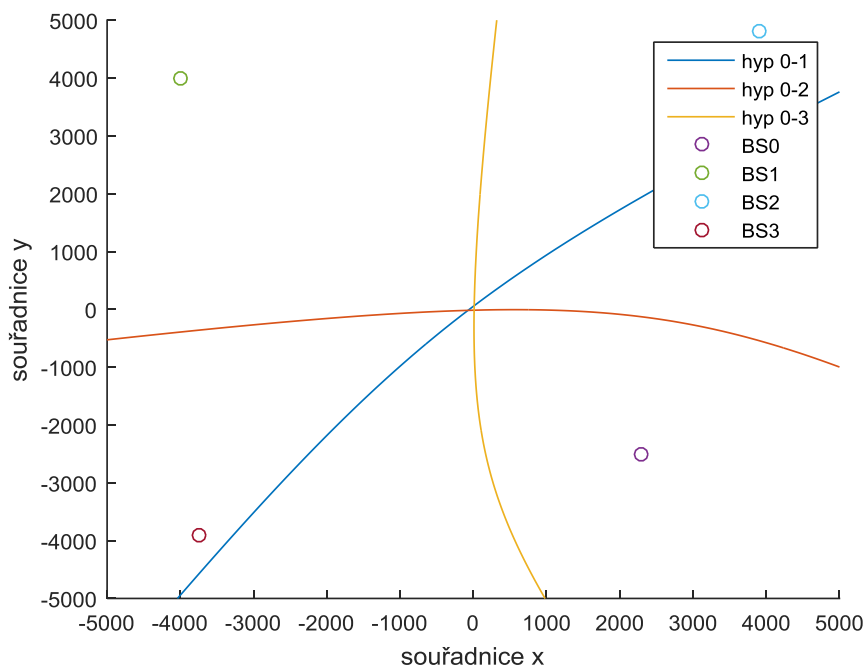
$t(i)$ – poloha maxima korelace ve vzorcích

f_{vz} – vzorkovací frekvence (Hz)

c – rychlost světla (m/s)

Vypočítaná vzdálenost t_{doa} odpovídá konstantní hodnotě rozdílu vzdáleností od BS. Body s touto konstantní vzdáleností tvoří hyperbolu, která je množinou možných poloh MS. Pro názorné vykreslení těchto hyperbol je možné využít funkci $hyperbola(a,b,t_{doa})$ (Příloha 5), kde vstupem jsou vektory a a b obsahující vždy dvojici souřadnic BS. Vzdálenost t_{doa} je konstantní rozdíl vzdáleností. Výstupem jsou vektory x a y se souřadnicemi jednotlivých bodů hyperboly.

Na Obr. 26 můžeme vidět jednotlivé BS a vypočítané hyperboly v kartézském souřadnicovém systému.



Obr. 26 – Vykreslené hyperboly z vypočtených tdoa hodnot

Protože je poloha počítána z tdoa hodnot, které vychází z rozdílu času příchodu signálů, který je vyjádřen počtem vzorků, projeví v určení polohy chyba. Tuto chybu můžeme vidět na Obr. 26. Hyperboly se neprotínají v jednom bodě. Příčinou této chyby je právě rozlišení na celé vzorky. Jeden vzorek odpovídá chybě vzdálenosti v závislosti na vzorkovací frekvenci, v našem případě odpovídá 156 m.

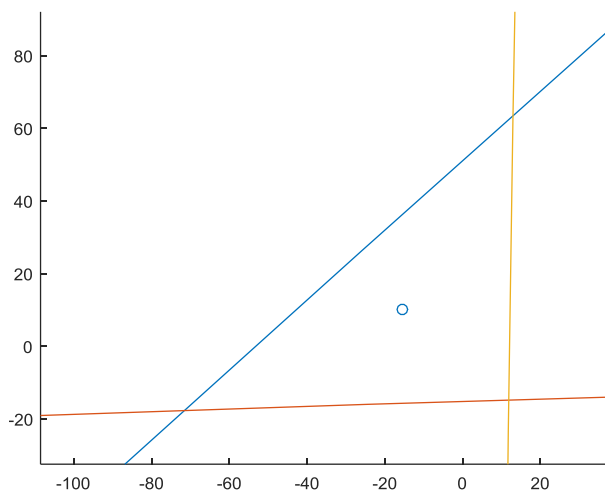
$$d_{vz} = \frac{1}{f_{vz}} * c \quad (48)$$

Kde: d_{vz} – vzdálenost, kterou signál urazí za dobu trvání jednoho vzorku (m)

f_{vz} – vzorkovací frekvence (Hz)

c – rychlost světla (m/s)

Pro určení polohy jsou nejdříve určeny průsečíky dvojic hyperbol. K tomu byla využita funkce *intersection()* [33]. Výsledkem je plošné těleso (v našem případě trojúhelník) a následně se vypočítá poloha jako těžiště tohoto tělesa (detail na Obr. 27).



Obr. 27 – Poloha MS jako těžiště mnohoúhelníku

7. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout algoritmus pro určení polohy ze signálů komunikačních systémů. Komunikačními systémy byly v tomto případě myšleny sítě určené pro mobilní komunikaci.

V první části práce byly popsány principy metod určování polohy v mobilních sítích.

Ze sítí, které v současné době slouží k mobilní komunikaci, byly pro určování polohy vybrány sítě LTE, které v současné době pokrývají velkou část území nejen v České republice, ale po celém světě [35], [36]. Dále jsou vysílače v síti synchronizované, tudíž je možné využít je k určování polohy z rozdílů dob šíření signálů.

Dále byla stručně popsána architektura LTE sítí, zejména fyzická vrstva, ve které pracují vyvíjené algoritmy.

V další části jsou detailně popsány jednotlivé signály, které jsou definované a slouží k jednotlivým krokům pro určení polohy.

V praktické části práce byl podle norem generován LTE signál obsahující definované signály pro určování polohy metodou OTDOA.

Algoritmus určování polohy pracuje se signálem, obsahujícím příspěvky od čtyř základnových stanic. Provede synchronizaci s vysílačem, od kterého je přijatý signál nejsilnější a z rozdílů dob příchodu dvojic signálů určí hyperboly. Průsečíky hyperbol vytvoří geometrický útvar (v našem případě trojúhelník) a jeho těžiště určuje odhadovanou polohu.

8. Seznam příloh

Příloha 1 – funkce gen_pss a det_poc_sym

Příloha 2 – funkce gen_sss

Příloha 3 – funkce gen_crs

Příloha 4 – funkce gen_prs

Příloha 5 - funkce gen_radius a hyperbola

Příloha 6 – funkce gen_frame

Příloha 7 – funkce det_cell

Příloha 8 – algoritmus určování polohy

Příloha 9 – funkce gen_ref_prs

9. Seznam literatury

- [1] Dokument komunikační komise 911 FCC-15-9A1 [online], 2/2015 Dostupné z WWW: http://transition.fcc.gov/Daily_Releases/Daily_Business/2015/db0310/FCC-15-9A1.pdf
- [2] Kos, T.; Grgic, M.; Sisul, G., "Mobile User Positioning in GSM/UMTS Cellular Networks," *Multimedia Signal Processing and Communications, 48th International Symposium ELMAR-2006 focused on*, vol., no., pp.185,188, červen 2006 doi: 10.1109/ELMAR.2006.329545
- [3] Navrátil, P.: *Modely systému LTE*, Brno, 2013. Diplomová práce VUT-FEKT
- [4] Peral-Rosado J.: Evaluation of the LTE positioning capabilities in realistic navigation channels. Ballaterra, 2014. Disertační práce UAB
- [5] JiaoXianjun.: rtl-sdr-LTE Project. [online], 10/2014 Dostupné z: <https://github.com/JiaoXianjun/rtl-sdr-LTE>
- [6] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 36.211 V 9.1.0: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation [on-line], 04/2010 Dostupné z: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/09.01.00_60/ts_136211v090100p.pdf
- [7] del Peral-Rosado, J.A.; Lopez-Salcedo, J.A.; Seco-Granados, G.; Zanier, F.; Crisci, M., "Evaluation of the LTE positioning capabilities under typical multipath channels," *Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), 2012 6th*, vol., no., pp.139,146, 5-7 září 2012 doi: 10.1109/ASMS-SPSC.2012.6333065
- [8] Fisher S. "Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA) Positioning in 3GPP LTE". Červen 2014 [online]. Dostupné z <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/otdoa-positioning-in-3gpp-lte.pdf>
- [9] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP [on-line], 2012. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/>
- [10] del Peral-Rosado, J.A.; Parro-Jimenez, J.M.; Lopez-Salcedo, J.A.; Seco-Granados, G.; Crosta, P.; Zanier, F.; Crisci, M., "Comparative results analysis on positioning with real LTE signals and low-cost hardware platforms," *Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), 2014 7th ESA Workshop on*, vol., no., pp.1,8, 3-5 Prosinec. 2014
- [11] Software Matlab 2014b: [online]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/>
- [12] Katalogový list tuneru R820T: [online] [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: http://superkuh.com/gnuradio/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked.pdf
- [13] Matlab LTE Toolbox: [online]. Dostupné: <http://www.mathworks.com/products/lte-system/>
- [14] Interaktivní LTE mřížka: [online]. Dostupné z: http://niviuk.free.fr/lte_resource_grid.html

- [15] del Peral-Rosado, J.A.; Lopez-Salcedo, J.A.; Seco-Granados, G.; Zanier, F.; Crisci, M., "Evaluation of the LTE positioning capabilities under typical multipath channels," *Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), 2012 6th*, vol., no., pp.139,146, 5-7 září 2012 doi: 10.1109/ASMS-SPSC.2012.6333065
- [16] 3GPP TR 36.814 v9.0.0. Technical Report. [online]. Dostupné z: <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36814-900.pdf>
- [17] Husain Y. „Simulace vlivu interference signálů GPS přijímačů“ [online]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB09/prispevky/042_husain.pdf
- [18] Emailová korespondence s del Peral-Rosado PhD
- [19] ETSI TS 136 141 v10.1.0. Technical Specification. [online]. 2011 Dostupné z: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136141/10.01.00_60/ts_136141v100100p.pdf
- [20] The recognition of consolidated research group [online], 2015 Dostupné z: <http://spcomnav.uab.es/main.php>
- [21] J.J. van de Beek, M. Sandell, P.O. Borjesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems", *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 45, no 7, pages. 1800–1805, červenec 1997.
- [22] Ding, Na; Chen, Chen; Fan, Wenhua; Chen, Yun; Xiaoyang Zeng, "An improved coarse synchronization scheme in 3GPP LTE downlink OFDM systems," *Circuits and Systems (ISCAS), 2012 IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.1516,1519, 20-23 Květen 2012 doi: 10.1109/ISCAS.2012.6271537
- [23] Zhongshan Zhang; Jian Liu; Keping Long, "Low-Complexity Cell Search With Fast PSS Identification in LTE," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol.61, no.4, pp.1719,1729, Květen 2012 doi: 10.1109/TVT.2012.2188109
- [24] Jung-In Kim; Jung-Su Han; Hee-Jin Roh; Hyung-Jin Choi, "SSS detection method for initial cell search in 3GPP LTE FDD/TDD dual mode receiver," *Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009. 9th International Symposium on*, vol., no., pp.199,203, 28-30 Zář 2009 doi: 10.1109/ISCIT.2009.5341260
- [25] Silva C, E.M.; Dolecek, G.J.; Harris, F.J., "Cell search in Long Term Evolution systems: Primary and secondary synchronization," *Circuits and Systems (LASCAS), 2012 IEEE Third Latin American Symposium on*, vol., no., pp.1,4, Feb. 29 2012-Březen 2 2012 doi: 10.1109/LASCAS.2012.6180345
- [26] Yukai Gao; Gang Zhu; Xia Chen; Di Wu; Buri Ban, "A modified algorithm of synchronization signal detection for LTE initial cell search," *Communications and Networking in China (CHINACOM), 2011 6th International ICST Conference on*, vol., no., pp.1211,1215, 17-19 Srpen 2011 doi: 10.1109/ChinaCom.2011.6158342

- [27] Charbel El Hajjar.: Synchronization Algorithms for OFDM Systems (IEEE802.11a, DVB-T) : Analysis, Simulation, Optimization and Implementation Aspects. Ballaterra, 2007. Disertační práce FAU
- [28] Implementace diskrétní Fourierovy transformace. [online]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>
- [29] Lih-Chang Wung; Yung-Chuan Lin; Yun-Jhen Fan; Szu-Lin Su, "A robust scheme in downlink synchronization and initial cell search for 3GPP LTE system," *Wireless and Pervasive Computing (ISWPC), 2011 6th International Symposium on* , vol., no., pp.1,6, 23-25 Únor 2011 doi: 10.1109/ISWPC.2011.5751336
- [30] 3GPP TS 36.305. Technical report "Evolved universal terrestrial radio access network (EUTRAN). Stage 2 functional specification of user equipment (UE) positioning in E-UTRAN", Rel. 9, V9.10.0, leden 2013.
- [31] Fletcher R. „A Modified Marquardt Subroutine for Non-linear Least Squares” Tech. rep., Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Anglie, 1971.
- [32] M. Balda, “LMFsolve.m: Levenberg-Marquardt-Fletcher algoritmus pro nelineární řešení metody nejmenších čtverců”, MathWorks, File Exchange, ID 16063, 2007.
- [33] Funkce pro hledání průsečíku křivek, [online]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11837-fast-and-robust-curve-intersections/content/intersections.m>
- [34] Korelační funkce v software Matlab. [online]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/xcorr.html>
- [35] Mapa pokrytí LTE v ČR. [online]. Dostupné z: <http://lte.ctu.cz/pokryti/>
- [36] Mapa pokrytí LTE. [online]. Dostupné z: <http://www.worldtimezone.com/4g.html>


```

function [PSS] = gen_pss(Nid);
% generator PSS sekvence - Nid - sektor buňky (0,1,2)

if Nid==0
    u=25;
elseif Nid==1
    u=29;
elseif Nid==2
    u=34;
else
    error('Nid musí být 0,1, nebo 2!');
end

for i=1:62
    if i<31
        PSS(i)=exp(-1j*(pi*u*i*(i+1))/(63));
    else
        PSS(i)=exp(-1j*(pi*u*(i+1)*(i+2))/(63));
    end
end

PSS=circshift(PSS,[0 1]);

End

function [tau e] = det_poc_sym(signal,prepo)
% =====
% počátek OFDM symbolu [van de beck algorithm] vylepšený
    N=2048/prepo;
    M1=160/prepo;
    M2=144/prepo;
    slot=M1+N;

for d=1:slot
    P(d)=sum(conj(signal(d:d+M1-1)) .* signal(d+N:d+N+M1-1));
    for k=0:5
        P2(k+1,d)=sum(conj(signal(d+M1+(k*M2)+(k+1)*N:d+M1+(k*M2)+(k+1)*N+(M2-
1))))...
                .*signal(d+M1+(k*M2)+(k+2)*N:d+M1+(k*M2)+(k+2)*N+(M2-
1)));
        end
    end
P=P+sum(P2);
for d=1:slot
    E(d)=sum(signal(d:d+(M1-1)).*conj(signal(d:d+(M1-1))));
    for k=0:5
        E2(k+1,d)=sum(signal(d+M1+(k*M2)+(k+1)*N:d+M1+(k*M2)+(k+1)*N+(M2-1)).*...
                conj(signal(d+M1+(k*M2)+(k+1)*N:d+M1+(k*M2)+(k+1)*N+(M2-1))));
    end
end
E=E+sum(E2);
gama=(abs(P))./E).^2;
figure
plot(gama)
title('hledání počátku symbolu')
xlabel('posun ve vzorcích')
ylabel('absolutní hodnota')
clear E E2 P2 d k M1 slot
% hledání posunu signálu
[a,i]=find(gama==(max((gama)))); % kolikátým prvkem je maximum = i
tau = i; %posun počátku symbolu od počátku příjmu signálu
tau=mod(tau,137);
clear a i
e=angle(gama(tau));
end

```

```

function [vys]= gen_sss(Nid,Nid2,ts)
% generator SSS sekvence Nid(0-167), Nid2(0-2), ts - slot 1 nebo 10
if Nid2>2
    error('Nid2 musí být 0,1, nebo 2!');
end
if Nid>167
    error('Nid1 musí být z intervalu 0 až 167!');
end
q_carka=fix(Nid/30); q=fix((Nid+q_carka*(q_carka+1)/2)/30);
m_carka=Nid+q*(q+1)/2;
m0=mod(m_carka,31); m1=mod((m0+fix(m_carka/31)+1),31);

x(1)=0; x(2)=0; x(3)=0; x(4)=0; x(5)=1;
for i=0:25
    x(i+5+1)=mod((x(i+2+1)+x(i+1)),2);
end

for i=1:length(x)
    s_carka(i)=1-2*x(i);
end

for i=0:30
    s0m0(i+1)=s_carka(mod((i+m0),31)+1);
    s1m1(i+1)=s_carka(mod((i+m1),31)+1);
end

x(1)=0; x(2)=0; x(3)=0; x(4)=0; x(5)=1;
for i=0:25
    x(i+5+1)=mod((x(i+3+1)+x(i+1)),2);
end

for i=1:length(x)
    c_carka(i)=1-2*x(i);
end

for i=0:30
    c0(i+1)=c_carka(mod((i+Nid2),31)+1);
    c1(i+1)=c_carka(mod((i+Nid2+3),31)+1);
end

x(1)=0; x(2)=0; x(3)=0; x(4)=0; x(5)=1;
for i=0:25
    x(i+5+1)=mod((x(i+4+1)+x(i+2+1)+x(i+1+1)+x(i+1)),2);
end

for i=1:length(x)
    z_carka(i)=1-2*x(i);
end
%%
for i=0:30
    z1m0(i+1)=z_carka(mod((i+mod(m0,8)),31)+1);
    z1m1(i+1)=z_carka(mod((i+mod(m1,8)),31)+1);
end

for i=0:30
    SSS_0(2*i+1)=s0m0(i+1)*c0(i+1); % subframe 0
    SSS_0(2*i+2)=s1m1(i+1)*c1(i+1)*z1m0(i+1);
    SSS_5(2*i+1)=s1m1(i+1)*c0(i+1); % subframe 5
    SSS_5(2*i+2)=s0m0(i+1)*c1(i+1)*z1m1(i+1);
end

if ts==1
    vys=SSS_0;
elseif ts==10
    vys=SSS_5;
else
    error('SSS je pouze ve slotu 1 nebo 10');
end; end

```

```

function [crs] = gen_crs(CellID,ns,NRBDL);
% generování CRS - CellID - číslo buňky,ns - číslo slotu,
% NRBDL - šířka pásma (v RB), NRBDL - šířka pásma (v RB)
=====
% proměnné
NCP=1; %normal CP      % NCP=0; %extended CP
NRBmaxDL=110; %největší nastavení BW dělitelné RB
PBCH=1; % 1 2 nebo 4 (počet antén) p=0; %port antény
vshift=mod(CellID,6); Nc=1600; MPN=Nc+62;
% posloupnost x1
x1=[1 zeros(1,30)];
for n=1:2009
    x1(n+31)=mod((x1(n+3)+x1(n)),2);
end
% m_carka (QPSK symboly které budou mapovány v rámci jednoho symbolu)
for m=0:2*NRBDL-1
    m_carka(m+1)=(m)+NRBmaxDL-NRBDL;
end
% vybrání symbolů, ve kterých bude PRS signál
if p==0
    l1=[0 4];
elseif p==1
    l1=[0 4];
elseif p==2
    l1=1;
elseif p==3
    l1=1;
end
for la=1:length(l1)
    l=l1(la);
    % inicializace pro posloupnost x2
    cinit=de2bi(2^10*(7*(ns+1)+l+1)*(2*CellID+1)+2*CellID+NCP);
    x2=[cinit zeros(1,(31-length(cinit)))];
    for n=1:2009
        x2(n+31)=mod((x2(n+3)+x2(n+2)+x2(n+1)+x2(n)),2);
    end
    for n=1:4*NRBmaxDL
        c(n)=mod((x1(n+Nc)+x2(n+Nc)),2);
    end
    for m=1:2*NRBmaxDL
        r(m)=(1/(sqrt(2)))*(1-2*c(2*m))+1j*(1/(sqrt(2)))*(1-2*c(2*m-1));
    end
if p==0 % mapování QPSK symbolu PRS do OFDM symbolu
    if l==0
        v=0;
    else
        v=3;
    end
elseif p==1
    if l==0
        v=3;
    else
        v=0;
    end
elseif p==2
    v=3*(mod(ns,2));
elseif p==3
    v=3+3*(mod(ns,2));
end
    for m=0:2*NRBDL-1
        k(m+1)=6*m+mod((v+vshift),6);
    end
    for i=1:length(k)
        a(k(i)+1,(l+1))=r(m_carka(i));
    end
end
crs=a;
end

```

```

function [prs] = gen_prs(CellID,ns,NRBDL,NRBPRS);
% ===== generování PRS
% CellID - číslo buňky, ns - číslo slotu,
% NRBDL - šířka pásma (v RB), NRBP RS - šířka pásma PRS (v RB)
% =====
% proměnné
NCP=1; %normal CP      % NCP=0; %extended CP
NRBmaxDL=110; %největší nastavení BW dělitelné RB
PBCH=1; % 1 2 nebo 4 (počet antén)
vshift=mod(CellID,6);
Nc=1600;
MPN=Nc+62;

% posloupnost x1
x1=[1 zeros(1,30)];
for n=1:2009
    x1(n+31)=mod((x1(n+3)+x1(n)),2);
end

% m_carka (QPSK symboly které budou mapovány v rámci jednoho symbolu)
for m=0:2*NRBPRS-1
    m_carka(m+1)=(m)+NRBmaxDL-NRBDL;
end
% =====
% generování QPSK symbolu PRS
% vybrání symbolů, ve kterých bude PRS signál
if mod(ns,2)==0;
    l1=[3 5 6];
elseif mod(ns,2)==1;
    if PBCH==1
        l1=[1 2 3 5 6];
    elseif PBCH==2
        l1=[1 2 3 5 6];
    elseif PBCH==4
        l1=[2 3 5 6];
    end
end
a=zeros(12*NRBPRS,7);
for la=1:length(l1)
    l=l1(la);
    % inicializace pro posloupnost x2
    cinit=de2bi(2^10*(7*(ns+1)+1+1)*(2*CellID+1)+2*CellID+NCP);
    x2=[cinit zeros(1,(31-length(cinit)))];
    for n=1:2009
        x2(n+31)=mod((x2(n+3)+x2(n+2)+x2(n+1)+x2(n)),2);
    end
    for n=1:4*NRBmaxDL
        c(n)=mod((x1(n+Nc)+x2(n+Nc)),2);
    end
    for m=1:2*NRBmaxDL
        r(m)=(1/(sqrt(2)))*(1-2*c(2*m))+1j*(1/(sqrt(2)))*(1-2*c(2*m-1));
    end
% =====
% mapování QPSK symbolu PRS do OFDM symbolu
for m=0:2*NRBPRS-1
    k(m+1)=(6*(m+NRBDL-NRBPRS)+mod((6-l+vshift),6));
end

for i=1:length(k)
    a(k(i)+1,(l+1))=r(m_carka(i));
end
end
prs=a;
end

```

```

function [radius] = gen_radius(a,b);
% a=[x y] b=[x y]
x=abs(a(1)-b(1));
y=abs(a(2)-b(2));
radius=sqrt(x^2+y^2);
end

function [x,y] = hyperbola(f1,f2,tdoa)
% f1 = souradnice jedne BTS (x,y) kartezske
% f2 = souradnice druhe stanice BTS (x,y) kartezske
% tdoa = rozdíl doby příchodu signálu vzdálenost v m

% Vektor mezi ohnisky
delta = f1-f2;

% převod do polárních souřadnic
[phi,r] = cart2pol(delta(1),delta(2));

% vzdálenost mezi ohniskem osou hyperboly
rd = (r+tdoa)/2;

% parametry hyperboly
a = (r/2)-rd;
e = r/(2*a);
c = a*e;
b = sqrt(c^2-a^2);

% Výpočet jednotlivých bodů hyperboly z parametrické rovnice.
x = zeros(1,499);
y = zeros(1,499);
for k = 1:499
    mu = (k-249)/50;
    x(k) = a*cosh(mu);
    y(k) = b*sinh(mu);
    x(k) = x(k)-c;
    y(k) = y(k);
    [phi2,r2] = cart2pol(real(x(k)), real(y(k)));
    [x(k), y(k)] = pol2cart(phi2+phi, r2);
end
x = x+f1(1);
y = y+f1(2);
end

```

```

function [vys]= gen_frame(NID1,NID2,NRBDL)
% =====
% Generování LTE Rámce pro buňku
% NID1 0 až 167, NID2 0 až 2
% NID1=0; NID2=0; %NID2=0,1,2
CellID=3*NID1+NID2;
NRBPRS=NRBDL;
Nfft=128;
% =====
%   CRS pro celý rámec
crs=gen_crs(0,0,NRBDL);
crs=[zeros(1,7); crs(37:72,:); zeros(55,7); crs(1:36,:)];
for a=1:19
    crs0=gen_crs(0,a,NRBDL);
    crs0=[zeros(1,7); crs0(37:72,:); zeros(55,7); crs0(1:36,:)];
    crs=[crs crs0];
end
%   PSS pro celý rámec
pss=gen_pss(NID2);
pss=[0 pss(32:62) zeros(1,65) pss(1:31)];
pss=conj(pss);
pss=[zeros(128,6) pss'];

pss=[pss zeros(Nfft,7*9) pss zeros(Nfft,7*9)];
%   SSS pro celý rámec
sss0=gen_sss(NID1,NID2,1);
sss0=[0 sss0(32:62) zeros(1,65) sss0(1:31)];
    sss0 = [sss0(1) flip(sss0(2:128))];
sss0=[zeros(128,5) sss0' zeros(128,1)];
sss5=gen_sss(NID1,NID2,10);
sss5=[0 sss5(32:62) zeros(1,65) sss5(1:31)];
    sss5 = [sss5(1) flip(sss5(2:128))];
sss5=[zeros(128,5) sss5' zeros(128,1)];
sss=[sss0 zeros(Nfft,7*9) sss5 zeros(Nfft,7*9)];
%   PRS pro celý rámec
prs=gen_prs(CellID,2,NRBDL,NRBPRS);
prs=[zeros(1,7); prs(37:72,:); zeros(55,7); prs(1:36,:)];
for a=3:5
    prs1=gen_prs(CellID,a,NRBDL,NRBPRS);
    prs1=[zeros(1,7); prs1(37:72,:); zeros(55,7); prs1(1:36,:)];
    prs=[prs prs1];
end
    prs=[zeros(Nfft,14) prs zeros(Nfft,7*14)];

%   LTE rámec
frame=pss+sss+prs+crs;

% převod do časové oblasti
tx_t=(frame(:,1))'; %vybrání OFDM symbolu
tx_t=ifft(tx_t); %převod do časové oblasti
tx=[tx_t(119:128) tx_t]; % přidání CP
b=1;
l=(8:7:141);
for i=2:length(frame(1,:))
    tx_t=(frame(:,i))'; %vybrání OFDM symbolu
    tx_t=ifft(tx_t); %převod do časové oblasti
%   tx_t=[tx_t(120:128) tx_t]; % přidání CP
    if i==l(b)
        b=b+1;
        tx_t=[tx_t(119:128) tx_t]; % přidání CP
    else
        tx_t=[tx_t(120:128) tx_t]; % přidání CP
    end
    end
    tx=[tx tx_t];
end
vys=tx;
end

```

```

function [cellID pocatek] = det_cell(signal_comp,prepo);
    slot=15360/prepo; %počet vzorků v jedno LTE slotu
    M1=160/prepo; %první CP ve slotu
    M2=144/prepo; %normální CP
    N=2048/prepo; %počet vzorků pro FFT
% =====generování PSS
for i=1:3
    pss(i,:)=gen_pss(i-1);
    pssd(i,:)=[0 pss(i,32:62) zeros(1,65) pss(i,1:31)];
end
% =====plnění matice jednotlivými symboly
for i=1:70
    symbol(i,:)=signal_comp(1+(i-1)*(N+M2):1+i*(N+M2)-1);
    symbol_nonCP(i,:)=symbol(i,10:137);
    symbol_f(i,:)=fft(symbol_nonCP(i,:));
end
% =====detekce PSS v f doméně
for i=1:70
    kor(i,:,1)=ifft(symbol_f(i,:).*(pssd(1,:)));
    kor(i,:,2)=ifft(symbol_f(i,:).*(pssd(2,:)));
    kor(i,:,3)=ifft(symbol_f(i,:).*(pssd(3,:)));
end
% =====které PSS je v signálu, v jakém symbolu a jakým vzorkem je maximum
    maxima=[max(max(abs(kor(:, :, 1)))) max(max(abs(kor(:, :, 2))))
max(max(abs(kor(:, :, 3))))];
    [i,detPSS]=find(maxima==(max(maxima)));
    [detPSSsymbol,detPSSvzorek]=find(abs(kor(:, :, detPSS))== (max(max(abs(kor(:, :, detPSS
S))))));
    detPSS=detPSS-1;
% DETEKCE SSS
% =====symbol s SSS v f. domene
    prijSSS=symbol_f(detPSSsymbol-1,:);
% =====korelace
    for i=1:168
        sss = gen_sss(i-1,detPSS,1);
        sss=[0 sss(32:end) zeros(1,65) sss(1:31)];
        korSSS0(i,:) = ifft(prijSSS.*sss);
        sss = gen_sss(i-1,detPSS,10);
        sss=[0 sss(32:end) zeros(1,65) sss(1:31)];
        sss = [sss(1) flip(sss(2:128))];
        korSSS5(i,:) = ifft(prijSSS.*sss);
    end
    lim=[max(max(abs(korSSS0))) max(max(abs(korSSS5)))];
% =====určení slotu (0 nebo 5)
    maximaSSS=[max(max(abs(korSSS0))) max(max(abs(korSSS5)))];
    if maximaSSS(1)>maximaSSS(2)
        detslot=0;
        korSSS_fin=korSSS0; %pro hledání čísla SSS
    else
        detslot=5;
        korSSS_fin=korSSS5; %pro hledání čísla SSS
    end
% =====určení které SSS je v signálu
    [detSSSsymbol,detSSSvzorek]=find(abs(korSSS_fin)==(max(max(abs(korSSS_fin)))));
    detSSS=detSSSsymbol-1;
% =====výpočet CELL ID
    cellID=3*detSSS+detPSS;
% synchronizace rámce
    if max(maximaSSS)==maximaSSS(1) %detekován slot nula
        halfframe=0;
    elseif max(maximaSSS)==maximaSSS(2)
        halfframe=9600;
    end
    if detPSSsymbol<8
        pocatek=-((detPSSsymbol-7)*(N+M2))+halfframe+(2*halfframe)+(M1-M2);
    elseif detPSSsymbol>8
        pocatek=((detPSSsymbol-7)*(N+M2)+fix(detPSSsymbol/7)*(M1-M2))+halfframe;
    end; end

```

```

% =====
clear all
clc
close all
% =====
% proměnné
f=0.860; %frekvence (pro útlum v GHz)
samplerate=1.92e6; %vzorkovací frekvence
c=299792458.0; % rychlost světla v m/s
prepo=16; %prepočet parametrů signalu pro RB=6;

% =====
% generování signálu pro jednotlivé buňky
% =====
signal0=gen_frame(0,0,6); %BS 0
signal1=gen_frame(0,1,6); %BS 1
signal2=gen_frame(0,2,6); %BS 2
signal3=gen_frame(1,0,6); %BS 3
signals=[signal0;signal1;signal2;signal3];
signals=[signals signals]; %dva rámce za sebou pro ověření počátku rámce
clear signal0 signal1 signal2 signal3

% polohy jednotlivých buněk (m) a MS
position(1,:)=[2300 -2500]; %BS 0
position(2,:)=[-4000 4000]; %BS 1
position(3,:)=[3900 4800]; %BS 2
position(4,:)=[-3750 -3900]; %BS 3
positionMS=[0 0]; %MS

% výpočet doby šíření signálu od buněk k MS (pro generování signálů
for i=1:length(position(:,1))
radius(i)=gen_radius(positionMS,position(i,:)); %vzdálenost od buňky
delay(i)=radius(i)/c;
delay_sample(i)=round(delay(i)*samplerate); %zpoždění (vzorky)
end; clear positionMS
% výpočet útlumů jednotlivých signálů podle FSL
for i=1:length(position(:,1))
FSLdb(i)=40*log10(radius(i))+7.8-18*log10(9)-18*log10(0.5)+2*log10(f);
FSL(i)=10^(FSLdb(i)/10);
end
% % modelování signálu přijatého MS
for i=1:length(position(:,1))
tx(i,:)=[zeros(1,delay_sample(i)) signals(i,:) ...% doplnění generovaných
signálů nulami pro posun
zeros(1,(max(delay_sample)-delay_sample(i)))];
tx(i,:)=tx(i,:)./(sqrt(FSL(i)));% váhování signálů podle útlumu
end
tx=sum(tx); % suma signálů (výsledkem je signál přijatý MS)
% =====
% zpracování signálu v MS
% hledání počátku symbolu
[tau]=det_poc_sym(tx);
% tau_def=delay_sample(1)+2;

% hledání buňky
[cellID pocatek]= det_cell(tx(1+tau:length(tx)),prepo);
% synchronizace LTE rámce
tx=tx(pocatek+tau:pocatek+tau+19200-1); %vybrání jednoho rámce
% Generování PRS signálů pro jednotlivé buňky
ref(1,:)=gen_ref_prs(0,0,6); %generování referenčního PRS v časové doméně
ref(2,:)=gen_ref_prs(0,1,6); %generování referenčního PRS v časové doméně
ref(3,:)=gen_ref_prs(0,2,6); %generování referenčního PRS v časové doméně
ref(4,:)=gen_ref_prs(1,0,6); %generování referenčního PRS v časové doméně
% vyhledávání časových rozdílů pomocí PRS
for i=1:length(ref(:,1))
corr(i,:)=abs(xcorr(tx,ref(i,:))); %korelace přijatého signálu s definovaným
PRS
end

```



```

for i=1:4
    peak(i,:)=find((corr(i,')==max(corr(i,:)))); %vyhledání maxima korelace
end
for i=1:4
    tdoa_sample(i,:)=peak(1,:)-peak(i,:); %prozdíl příchodu PRS signálů
        tdoa_sample_def(i,:)=delay_sample(1)-delay_sample(i);
    tdoa(i,:)=peak(1,:)-peak(i,:); %rozdíl doby příchodu ve vzorcích
    tdoa(i,:)=tdoa(i,:)/samplerate; %rozdíl doby příchodu v sekundách
    tdoa(i,:)=tdoa(i,:)*c; %rozdíl doby příchodu v metrech
end
% vykreslení hyperbol
figure
hold on
[x1 y1] = hyperbola(position(1,:),position(2,:),tdoa(2,:));
plot(x1,y1)
[x2 y2] = hyperbola(position(1,:),position(3,:),tdoa(3,:));
plot(x2,y2)
[x3 y3] = hyperbola(position(1,:),position(4,:),tdoa(4,:));
plot(x3,y3)
plot(position(1,1),position(1,2),'o');
plot(position(2,1),position(2,2),'o');
plot(position(3,1),position(3,2),'o');
plot(position(4,1),position(4,2),'o');
xlim([-5000 5000])
ylim([-5000 5000])
% hledání průsečíků hyperbol
[pr(1,1),pr(1,2)] = intersections(x1,y1,x2,y2);
[pr(2,1),pr(2,2)] = intersections(x1,y1,x3,y3);
[pr(3,1),pr(3,2)] = intersections(x3,y3,x2,y2);
% určení polohy výpočtem těžiště
t1=[((pr(1,1)-pr(2,1))/2)+pr(2,1) ((pr(1,2)-pr(2,2))/2)+pr(2,2)];
t1(2,1)=pr(3,1);
t1(2,2)=pr(3,2);
t2=[((pr(1,1)-pr(3,1))/2)+pr(3,1) ((pr(1,2)-pr(3,2))/2)+pr(3,2)];
t2(2,1)=pr(2,1);
t2(2,2)=pr(2,2);
[MS(1) MS(2)] = intersections(t1(:,1),t1(:,2),t2(:,1),t2(:,2));

plot(MS(1),MS(2),'o')
legend('hyp 0-1','hyp 0-2','hyp 0-3','BS0','BS1','BS2','BS3','MS'

```

```

function [vys]= gen_ref_prs (NID1,NID2,NRBDL,prepo)
% Generování LTE Rámce pro buňku
% NID1 0 až 167, NID2 0 až 2
CellID=3*NID1+NID2;
NRBPRS=NRBDL;
Nfft=2048/prepo;
% CRS pro celý rámeč
crs=gen_crs (CellID,0,NRBDL);
crs=[zeros (1,7); crs (37:72,:); zeros (55,7); crs (1:36,:)];

for a=3:5
crs0=gen_crs (CellID,a,NRBDL);
crs0=[zeros (1,7); crs0 (37:72,:); zeros (55,7); crs0 (1:36,:)];
crs=[crs crs0];
end
% PRS pro celý rámeč
prs=gen_prs (CellID,2,NRBDL,NRBPRS);
prs=[zeros (1,7); prs (37:72,:); zeros (55,7); prs (1:36,:)];

for a=3:7
prs1=gen_prs (CellID,a,NRBDL,NRBPRS);
prs1=[zeros (1,7); prs1 (37:72,:); zeros (55,7); prs1 (1:36,:)];
prs=[prs prs1];
end
frame=prs;
% pro vykreslení s DC uprostřed
for i=1:length (frame (1,:))
frame1 (:,i)=fftshift (frame (:,i));
end
% převod do časové oblasti
tx_t=(frame (:,1))'; %vybrání OFDM symbolu
tx_t=ifft (tx_t); %převod do časové oblasti
tx=[tx_t (119:128) tx_t]; % přidání CP

b=1;
l=(8:7:141);

for i=2:length (frame (1,:))
tx_t=(frame (:,i))'; %vybrání OFDM symbolu
tx_t=ifft (tx_t); %převod do časové oblasti

if i==l (b)
b=b+1;
tx_t=[tx_t (119:128) tx_t]; % přidání CP

else
tx_t=[tx_t (120:128) tx_t]; % přidání CP
end

tx=[tx tx_t];
end
vys=tx;
end

```