



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

Makai Lajos Bence

**AZ LTE ÉS AZ 5G NR DINAMIKUS SPEKTRUM-
MEGOSZTÁS LEHETŐSÉGEI ÉS KORLÁTAI**

KONZULENSEK

Dr. Varga Pál

Barta József Gábor

BUDAPEST, 2020

Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	3
Abstract.....	5
1 Bevezetés	7
2 Mobilhálózatok.....	11
2.1 LTE - Long Term Evolution.....	11
2.2 5G NR – New Radio.....	12
2.2.1 5G NSA – Non-Standalone.....	14
3 DSS – Dynamic Spectrum Sharing.....	16
3.1 Elvárások, kihívások.....	16
3.2 Technikai megvalósítás.....	18
3.3 A fizikai réteg erőforrásmegosztása.....	18
3.3.1 LTE.....	18
3.3.2 5G NR.....	20
3.3.3 DSS.....	21
3.4 Terminál oldali elvárások.....	26
4 A DSS vizsgálatának céljai és elvárásai.....	27
4.1 A forgalmi mérések során elvárható átviteli sebesség.....	28
4.2 A hálózatanalizátoros elemzések hasznosságáról	29
5 Mérések bemutatása, eredmények értékelése	31
5.1 Teszhálózat	31
5.2 Mérési összeállítás.....	32
5.3 Hálózatanalizátoros vizsgálat.....	33
5.4 Forgalmi mérések	36
5.4.1 Erőforrás kiosztás.....	37
5.4.2 Dinamizmus, ütemezés.....	40
6 Összegzés és továbbfejlesztési lehetőségek	42
Köszönetnyilvánítás	43
Rövidítésjegyzék.....	44
Irodalomjegyzék.....	46

Összefoglaló

A 4. generációs mobilhálózatok elindulása óta már több, mint tíz év telt el, melyek ez idő alatt folyamatosan fejlődtek, ezzel együtt a felhasználók száma, valamint az általuk forgalmazott adatmennyiség is jelentősen növekedett. Ezen felül a hálózatba kapcsolt eszközök száma is folyamatosan nő és típus-választéka is szélesedik. A nagy áttörést az 5. generációs mobilhálózatoktól várják, melyek a korábbiaknál nagyobb átviteli sebességet, lényegesen kisebb késleltetést, gazdaságosabb energiafelhasználást ígérnek és sokkal több eszközt tudnak kiszolgálni. Ennek az új technológiának a bevezetésére többféle megoldást dolgoztak ki. Az első 5G szolgáltatások az úgynevezett 5G NSA (non-standalone) architektúrára épülnek, melyben a szolgáltatók a már meglévő LTE (Long-Term Evolution) EPC (Evolved Package Core) segítségével szoftverfrissítés után tudnak 5G támogatást nyújtani. Később természetesen szükség lesz önálló 5G (SA-standalone) architektúra alapján kiépített hálózatokra, hiszen ezek által tudják majd biztosítani az ígért és egyben elvárt teljesítményt.

A szolgáltatók egyik legnagyobb problémája, hogy a meglévő 2., 3. és 4. generációs szolgáltatások mellett korlátozottan áll rendelkezésre szabad frekvenciasáv az 5. generációs mobilhálózatok bevezetéséhez. Mivel még nem sok 5G képes készülék van forgalomban, valamint a hálózat kiépítéséhez, fejlesztéséhez is időre van szükség, nem lehet – és nem is érdemes – gyorsan áttérni a felhasználókat az új technológiára. Erre a problémára jelent megoldást a dinamikus spektrumhasználat (DSS - Dynamic Spectrum Sharing), mellyel egyidejűleg ugyanabban a frekvenciatartományban, valamint a már meglévő rádiós hardverekkel nyújthatnak LTE és 5G NR (New Radio) szolgáltatást. A DSS bevezetésével a fő célok a minél jobb spektrumkihasználtság, valamint a lefedettség és cellakapacitás növelése. Ennél a technológiánál alapvető kihívás az, hogy az LTE és az 5G NR ugyanazon rádiós spektrumot kénytelen használni, tehát a két csatorna ütközését valahogyan el kell kerülni. Erre a 3GPP nem ír le konkrét megoldásokat, de a mobilhálózat-gyártók a már definiált lehetőségeket ügyesen felhasználva találtak arra lehetőséget, hogy az ütközéseket elkerülve a két technológia a közös sávban legyen mégis megvalósítható.

Dolgozatomban az FDD (Frequency Division Duplexing) spektrum párhuzamos kihasználását vizsgálom LTE és 5G NR FDD szolgáltatások esetén egy konkrét hálózati

konfiguráción, melyek kulcs-paramétereivel szemben matematikailag is könnyen meg tudunk fogalmazni elvárt elméleti határértékeket. Ismertetésre kerülnek a terminál-oldali elvárások is, melyek elengedhetetlenek a hálózattal való együttműködéshez. A bemutatott end-to-end mérések eredményeivel a DSS alkalmazásának előnyeit és hátrányait, illetve korlátait fogalmazom meg és támasztom. A tesztelések során megvizsgálom a technológia erőforrás kiosztásának módját, valamint dinamizmusát is.

Abstract

The launch of the first 4th generation mobile networks has passed over ten years. They have been evolving constantly during the time in many terms: functionally, as well as in the significant increase of subscribers and the amount of data they distributed. In addition, the number of connected devices is constantly growing, and they appear in various new types as well. The great breakthrough is expected from the 5th generation mobile networks is associated with higher transmission speeds, significantly lower latency, lower energy consumption and that they can serve many more devices. Several architectural solutions have been developed for the implementation of this new technology. The first 5G services are already based on the 5G NSA (non-standalone) architecture, in which service providers offer 5G support after a software upgrade using the existing LTE (Long-Term Evolution) EPC (Evolved Package Core). Later, of course, networks will be built on a standalone 5G SA (standalone) architecture, allowing the delivery of the initially promised and expected performance.

One of the biggest problems for service providers is that, near the existing 2nd, 3rd and 4th generation services, there is a limitation in free frequency bands for the installation of 5th generation mobile networks. As there are not many 5G-capable devices on the market yet, and it takes time to build and develop the network, it is not possible – and not worthwhile – to quickly transfer users to the new technology. One solution to this problem is the Dynamic Spectrum Sharing (DSS), with which LTE and 5G NR (New Radio) services can be provided simultaneously in the same frequency range and with existing radio hardware. With the installation of DSS, the main goals are better spectrum utilization, and the increase of coverage and cell capacity. A fundamental challenge with this technology is that LTE and 5G NR are forced to use the same radio spectrum, so collisions between the two channels should somehow be avoided. 3GPP does not describe specific solutions for this, but mobile network manufacturers have already skilfully found the possibility for the two technologies to be implemented in the common band.

In my paper I inspect the parallel utilization of the FDD (Frequency Division Duplexing) spectrum for LTE and 5G NR FDD services on a specific network

configuration, so we can calculate the theoretical limits of key parameters. Terminal-side expectations that are essential for networking are also described. With the results of the presented end-to-end measurements, I formulate and support the advantages, disadvantages and limitations of the application of DSS. Furthermore, during this evaluation, I also examine the resource-allocation features and the related dynamism of the technology.

1 Bevezetés

A mobilhálózatok megjelenésük óta világszerte gyorsan, dinamikusan fejlődnek főként az egyre növekvő és változó felhasználói igények hatására. A növekvő fogyasztói elvárás és fokozódó piaci verseny miatt gyorsabban kerülnek piacra az újabb készülékek, melyek rendszeresen kisebb-nagyobb újításokat tartalmaznak, valamint az új alkalmazások is egyre több adatforgalmat generálnak. Ezzel párhuzamosan a szolgáltatóknak is fejleszteniük kell a hálózatukat, nagyobb kapacitásra és adatátviteli sebességre van szükség, hogy a megnövekedett adatforgalom mellett is biztosítani tudják a megfelelő minőségű szolgáltatást. Erre a problémára a lehetséges megoldások a meglévő rendszer spektrális hatékonyságának növelése, vagy egy új rendszer kidolgozása. A meglévő rendszerek fejlesztésének több lehetősége is van, melyeket alkalmaztak is hálózataikban a szolgáltatók, például a magasabb szintű moduláció (downlinken 64 QAM-ről 256 QAM-re, Quadrature Amplitude Modulation), a MIMO (Multiple Input and Multiple Output) antennák és az ehhez kapcsolódó új jelfeldolgozási technológia, vagy több vivő aggregációja mellyel szomszédos sávokat egyidejűleg tudnak használni.

Az utóbbi néhány évben megjelent egy új típusú „felhasználói csoport”, melyek működése szintén a vezeték nélküli hálózatokra épül. Ezek az IoT (Internet of Things) eszközök, melyek lehetnek közüzemi mérők, háztartási eszközök vagy akár önvezető autók is, valamint az okos gyártósorok. Utóbbiak nem a publikus mobilhálózatra csatlakoznak, így nagy fejtörést okoz annak egy újfajta megoldása, hogy a működési területükön ne foglaljanak le egy frekvenciasávot. Az IoT rendszerek általában M2M (machine-to-machine) kommunikációt alkalmaznak, melyben az emberi tényező már nincs jelen. Ez azt jelenti, hogy a működésük sokkal gyorsabb tud lenni, mint az emberek által használt eszközöké, ha ezt a hálózat is lehetővé teszi. Ezeknél az eszközöknél nagyon fontos paraméter a kommunikáció során a késleltetés, ezen felül a hálózat kapacitása, ami alatt most azt értjük, hogy mennyi eszköz tud egy cellára csatlakozni. Az 1.1. ábrán is látható becslés szerint a következő években a hálózatba kapcsolt eszközök száma olyan nagy mértékben és gyorsasággal fog növekedni, hogy azt a meglévő LTE (Long Term Evolution) mobilhálózat nem fogja tudni kezelni.

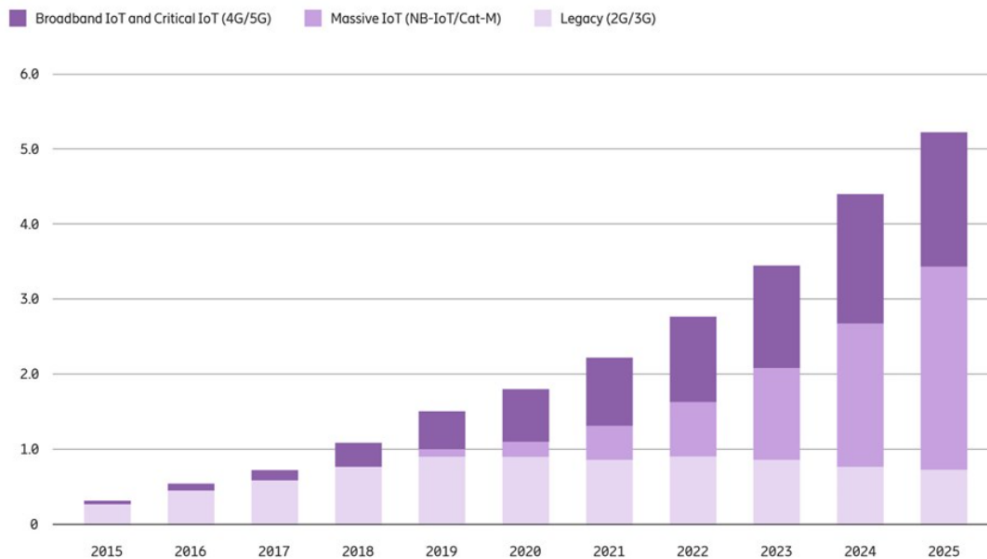


Figure 22: Cellular IoT connections by segment and technology (billion)

1.1. ábra: IoT hálózati kapcsolatok becsült száma [1]

Főként ezeknek az új alkalmazási területeknek a kiszolgálására fejlesztik az 5. generációs mobilhálózatokat, melyek akár 1 ms-os késleltetéssel tudnak majd adatokat továbbítani, lényegesen több – akár 100-szor több, mint LTE-n – kliens kiszolgálását teszik lehetővé, az adatátviteli sebességük pedig elérheti az 1 Gbps-ot [3]. Az új típusú hálózatoknak a kiépítésével a szolgáltatók fenn tudják tartani a vállalt minőséget (QoS – Quality of Service). Az 5. generációs mobilhálózatok nagy változást hoznak a távközlésben, mely nagy hatással lesz a gazdaságra is. Új technológia új hardverekkel, és még sok ismeretlen felhasználási területtel. Ez év elején hazánkban is frekvencia-árverést tartottak, ahol a szolgáltatók új frekvencia-használati jogosultságokat tudtak vásárolni, melyekkel elindíthatják első 5G technológián alapuló rádiós hálózatukat. Ezt az új technológiát nagy várakozás övezi, a távközléssel foglalkozó vállalatok rengeteg pénzt investálnak a fejlesztésébe évente. Az első RAN (Radio Access Network) műszaki specifikációkkal, melyekből „5G” szabványok lettek, a 3GPP 15. kiadása [13] foglalkozik (rel.15). Ebben meghatározták a lehetséges 5G megvalósításokat. A 3GPP Rel. 15 szabványcsoport emellett tanulmányokat is tartalmaz, melyek például különböző 5G architektúrákra, a továbbfejlesztett mobil szélessávra (eMBB, enhanced Mobile Broadband), biztonságra, kompatibilitásra és az ígért forgalmi teljesítményekre fókuszálnak. Az új generációs rádiós interface az NR azaz New Radio elnevezést kapta.

Az 5. generációs mobilhálózatok elindításában nagy a verseny a szolgáltatók között. Az új technológia kifejlesztése és megvalósítása jelentős költséget jelent, ami az elején a felhasználók kis száma miatt még nem fog jelentős profitot termelni. Mivel a teljes értékű 5G lefedettséghez új hálózati elemekre van szükség, ezért kidolgoztak átmeneti megoldásokat is, hogy megkönnyítsék az új technológia bevezetését. A szolgáltatók úgy is tudnak 5G (NSA, Non-Standalone) lefedettséget biztosítani, hogy nem építenek ki teljes 5G hálózatot, hanem a már meglévő LTE EPC-ket (Evolved Package Core) használják fel, melyeken elég egy szoftverfrissítést elvégezni. A másik nehézség a frekvenciasávok biztosítása az új szolgáltatáshoz, ugyanis ezek korlátozottan állnak a szolgáltatók rendelkezésére, és a jelenleg meglévők eléggé telítettek. Mivel a digitális mobilhálózatok bevezetése (2G) óta az újítások kibocsátásával párhuzamosan, nem vonták ki a forgalomból a régebbi generációs szolgáltatásokat, ezért egy olyan megoldásra van szükség, aminek a segítségével a már meglévő szolgáltatások mellett az új generációt is be tudják vezetni, valamint élő környezetben tesztelni.

A dinamikus spektrum-megosztás (DSS, Dynamic Spectrum Sharing) megoldást jelent erre a problémára [4]. Ennek a technológiának az implementálására vannak olyan szabványosított építőelemek, amikből a mobilhálózat-gyártók hasonló, de nem pontosan egyforma megoldásokat fejlesztettek ki. Dinamikus spektrum-megosztás során a spektrum időben és frekvenciában multiplexálódik a 4. és 5. generációs mobilhálózatok között az aktuális felhasználói igények szerint. Ez a funkció is megvalósítható a jelenleg működő LTE core (maghálózati) támogatással, csupán a felhasználói készülékeknek kell kompatibilisnek lenniük a DSS-sel. Egyelőre még nem sok készülék támogatja ezt a funkciót, de amikor kereskedelmi forgalomba kerül ez a technológia, addigra biztosan megvalósul a kompatibilitás a mobiltelefon gyártók részéről.

A dinamikus spektrum-megosztás alkalmazásával egyidejűleg ki lehet szolgálni az LTE és 5G felhasználókat, jobb lesz a spektrumkihasználtság, valamint növekszik a cellakapacitás a sávok statikus felosztásához képest. Ez előnyt jelenthet olyan területeken, ahol sűrűn változnak az LTE, illetve NR felhasználói igények. DSS alkalmazásával tehát a szolgáltatók jóval olcsóbban és gyorsabban tudják bevezetni az 5G NR szolgáltatást, hiszen a már így is használatban lévő spektrum, és hálózati elemek nagyrészen felhasználásával tudnak egyszerre LTE és 5G lefedettséget is biztosítani a felhasználóknak.

Erről a technológiáról csak kevés publikált mérési eredmény található, a gyártói white paper dokumentációk [4] csak a működés lényegesebb részeit és a technológia felhasználási eseteit tartalmazzák. A DSS újdonsága és várhatóan nagy gazdasági szerepe miatt döntöttem úgy, hogy end-to-end mérésekkel megvizsgálom a működését, a már ismert jellemzőit alátámasztva és az ismeretleneket feltárva.

Ennek a dokumentumnak kettős célja van. Egyrészt hiánypótló technológiai leírásként segíthet a DSS működésének a megértésében, másrészt az elvégzett mérések eredményein keresztül megvilágítja a DSS előnyeit és hátrányait, ezáltal segíti ezen új technológia hasznosságának a megítélését.

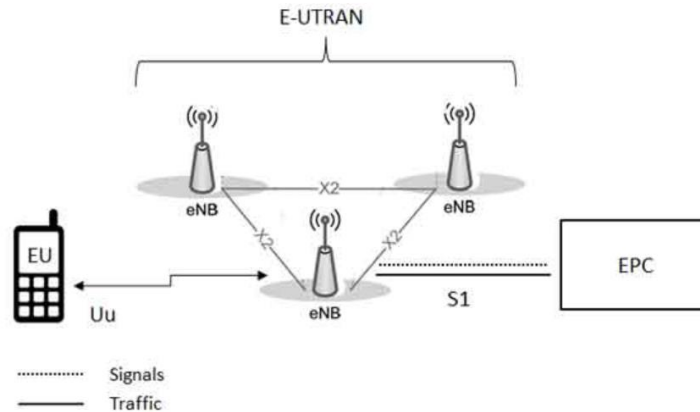
2 Mobilhálózatok

2.1 LTE - Long Term Evolution

A 3. generációs WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) alapú mobilhálózatok után egy teljesen új rádiós technológiát fejlesztettek ki, mely mellett a szolgáltatók hosszú időre elkötelezték magukat. Ezt a 4. generációs mobilhálózatot LTE-nek nevezték el, melynek leírása a 3GPP Release 8 szabványától kezdődően található. Az első 4G hálózatok 2009-ben, Magyarországon a kereskedelmi LTE szolgáltatás 2012-ben indult, mely során a 3. generációs HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) hálózatot fejlesztették tovább nagy sáv szélességű szolgáltatások számára. A csomagkapcsolt forgalomhoz optimalizált új rádiós technológia lehetővé tette a korábbinál szélesebb sávok használatát és a hatékonyabb erőforrás kihasználást.

Az LTE rendszerek a korábbiaknál nagyobb sáv szélességen (akár 20 MHz) üzemelnek, jelentősen növekedett az adatátviteli sebesség és az egy cellán kiszolgált előfizetők száma, valamint csökkent a késleltetés. Adatátvitelre időosztásos duplex (TDD, Time Division Duplexing) vagy frekvenciaosztásos duplex (FDD, Frequency Division Duplexing) technológiát használnak. FDD esetén az Uplink és Downlink (UL és DL) forgalom külön frekvenciasávokat használ, míg TDD technológián ugyan az a frekvenciasáv van felváltva használatban a le- és feltöltésre. Korszerű OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) rádiós közeghozzáférési technológiával [2] sok felhasználó esetén spektrálisan hatékonyan tud működni és a keskeny sávú zavarokat is jól tűri. Ez az erőforrás-allokáció idő (TDMA, Time Division Multiple Access) és frekvencia (FDMA, Frequency Division Multiple Access) alapú, mely alvivő-csoportokat oszt ki – melyek különböző OFDM szimbólumok – dinamikusan a felhasználói eszközök számára. Így különböző szolgáltatásokhoz különböző QoS-t (Quality of Service) lehet biztosítani a készülékekhez rendelt alvivők száma alapján. A szomszédos cellák, valamint saját cellán belül is kiátlagolja az interferenciákat, és az adott körülményekhez adaptálja a modulációt és csatornakódolást. Támogatja a több antennás (MIMO) átvitelt, mely tovább növeli az átviteli hatékonyságot.

A 4. generációs mobilhálózati architektúra a 2.1. ábrán látható két fő részből áll, a maghálózattól (EPC) és rádiós hozzáférési hálózattól (E-UTRAN, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network).



2.1. ábra: 4GLTE architektúra [15]

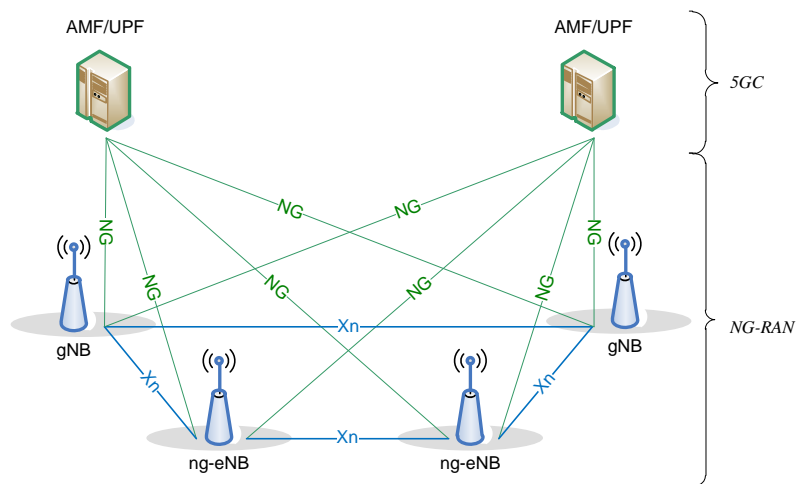
A működést megvalósító funkciók logikai csomópontokhoz vannak rendelve, közöttük interface-k vannak definiálva. A rádiós hozzáférési hálózat (RAN) fizikai és második réteg-beli, rádiós erőforrás kontroll és biztonsági funkciókat lát el. A core hálózat (CN, Core Network) előfizetői, mobilitás menedzsment funkciókat lát el, szolgáltatásokat kezel, biztosítja a QoS-t és kapcsolatot teremt a publikus internet vagy esetleg más hálózatok felé. A RAN és a CN az S1 interface-n keresztül kapcsolódik, ezen halad keresztül a felhasználói adatforgalom, valamint a kontroll információk is. A rádióállomások (eNB, eNodeB) közötti kommunikáció az X2 interface-n valósul meg, ez segíti a rádiós erőforrás menedzsmentet és a cellaváltásokat (handover).

2.2 5G NR – New Radio

Ahogy már a bevezetőben is említettem, a várható nagy felhasználósűrűség és adatátviteli igény, valamint a kis késleltetésű M2M kommunikáció megoldására fejlesztették ki az 5. generációs mobilhálózatokat. Ezen kihívások kombinációja is fontos, azaz az új technológia képes lesz kezelni a nagy mennyiségű hálózatba kapcsolt IoT eszközt, és akár szélessávú szolgáltatást biztosítani nekik (pl. önvezető autók kameraképei átadásához). A 3GPP főbb követelményei az 5. generációs hálózatoknál [3]: 100 Mbps – 1 Gbps DL (Downlink), és 50 Mbps – 500Mbps UL (Uplink) irányú felhasználói adatátviteli sebesség, 100MHz – 1GHz sáv szélesség, mobilitás 500 km/h-ig

(ez például vonatoknál lehet fontos), 250000 felhasználó/km², 1 ms késleltetés. Ezek a követelmények más-más felhasználási területet céloznak és egyszerre, egy időben nem teljesíthető mindegyik.

Az LTE-hez hasonlóan az 5G SA (Standalone) hálózati architektúra is két fő részre bontható, ahogyan a 2.2. ábrán látható: rádiós hozzáférési hálózatra (NG-RAN, Next Generation RAN) és core hálózatra (5GC, 5G Core). A rádióhálózatban az NR felhasználói és vezérlő sík protokolljait a gNB-k, az E-UTRAN felhasználói és vezérlő sík protokolljait a ng-eNB-k biztosítják a felhasználói eszközök számára. A node-ok között az Xn interface, a RAN és core között az NG interface teremti a kapcsolatot. A rádiós hozzáférési hálózat 1., 2. és 3. réteg-beli feladatokat lát el, melyek például a rádiós erőforrás menedzselése, titkosítás és integritásvédelem, felhasználói és vezérlő sík adatainak továbbítása a core felé, broadcast és paging üzenetek ütemezése és kiküldése, valamint a kapcsolatok felépítése és bontása. A core hálózat különválasztja a felhasználói és vezérlő sík funkcióit, hitelesítési, mobilitás és forgalom menedzselési feladatokat lát el, érvényesíti a QoS szabályokat. Az AMF (Access and Mobility Management Function) a vezérlési és mobilitási, az UPF (User Plane Function) pedig a felhasználói sík funkcióit valósítja meg.



2.2. ábra: 5G NR általános architektúra [10]

Az 5. generációs mobilhálózatoknál a már LTE-ben is használt közeghozzáférést és modulációkat alkalmazzák. Az előző fejezetben már említettem, hogy LTE esetén OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) digitális modulációt használnak, ahol több egymáshoz közel elhelyezkedő ortogonális alvivő szállítja a felhasználók által generált adatforgalmat. Ennek az eljárásnak több előnye is van: nagy a spektrális

hatékonysága, szélessávon nagy adatátviteli sebesség érhető el általa, és a felhasználói eszközök számára sem igényel nagy erőforrást ezeknek a jeleknek a feldolgozása. Később ezt a hullámformát kiegészítették egy ciklikus prefixszel (CP-OFDM, Cyclic Prefix OFDM), melynek használatával a vivők közti interferencia csökkenthető. Újdonság viszont az úgynevezett „mini-slot”, mellyel a késleltetés csökkentésére adnak lehetőséget. Ebben az esetben akár 2 OFDM szimbólum is alkothat egy slot-ot, míg LTE-ben 7 OFDM szimbólumból áll össze egy slot. További különbség, hogy 5G-ben változtatható az alvivők távolsága. Az alap itt is 15 kHz, ami a 2 hatványaival skálázható egészen 480 kHz-ig. Persze a skálázhatóságnak vannak korlátai, nem minden frekvenciasávban alkalmazható az összes alvivő távolság. A mobilszolgáltatásra használt 6 GHz alatti (450 MHz – 6GHz) sávban, ahol a maximális sávszélesség 100 MHz, az alvivő távolság beállításának lehetőségei az alábbi táblázatban láthatóak:

SCS (kHz)	5MHz	10MHz	15MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50MHz	60 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N/A	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	217	245	273
60	N/A	11	18	24	31	38	51	65	79	107	121	135

2.3. ábra: Az alvivő távolságok lehetséges konfigurációja a sávszélesség függvényében [11]

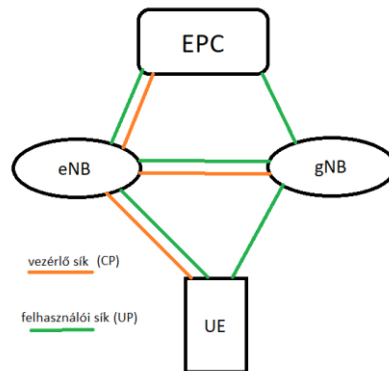
Ahol SCS (Subcarrier Spacing) az alvivő távolságot és N_{RB} (RB, Resource Block) a rendelkezésre álló erőforrásblokkok számát jelöli.

2.2.1 5G NSA – Non-Standalone

Non-standalone architektúrára épülő 5G hálózatokat a már meglévő LTE infrastruktúra támogatja, a maghálózatot az LTE EPC nyújtja, melyben elég egy szoftverfrissítést végrehajtani az 5G támogatásához. Ez a típusú hálózat még nem éri el a teljes, 5. generációs maghálózatot tartalmazó SA architektúrájú hálózatok forgalmi paramétereit, de mindenesetre segít a szolgáltatóknak gyorsabban, és olcsóbban bevezetni ezt az új szolgáltatást. Ezzel a technológiával az LTE-hez képest nagyobb adatátviteli sebességet, kisebb késleltetést és megbízható kapcsolatot tudnak nyújtani az előfizetőknek.

Az 5G NSA architektúra megvalósításának több lehetősége is van [14], melyek a csomópontok közötti interfacek-ben, azaz a mobilhálózaton haladó forgalom „útjában” különböznek. Tesztjeimhez a már jelenleg is megvalósított, 2.4. ábrán látható

3x architektúrára épült teszhálózatot használók, ahol egy meglévő LTE architektúrához kapcsolódik a gNB.



2.4. ábra: 5G NSA 3x architektúra

Az 5G NSA képes felhasználói eszköz mind az eNB-hez, mind a gNB-hez tud csatlakozni és felhasználói forgalmat generálni, viszont vezérlő információkat csak az eNB-től kap. Ezen felül a gNB vezérlő információi is az eNB-n és az X2 interface-n keresztül haladnak. A gNB S1-U interface-en keresztül csatlakozik az EPC-hez, melyen csak felhasználói adatforgalom halad. Összességében a teljes vezérlést az LTE hálózat elemei látják el, emellett természetesen felhasználói adatforgalom továbbítása is történik az LTE node-okon, ezzel szemben az 5G node csak felhasználói adatokat továbbít.

3 DSS – Dynamic Spectrum Sharing

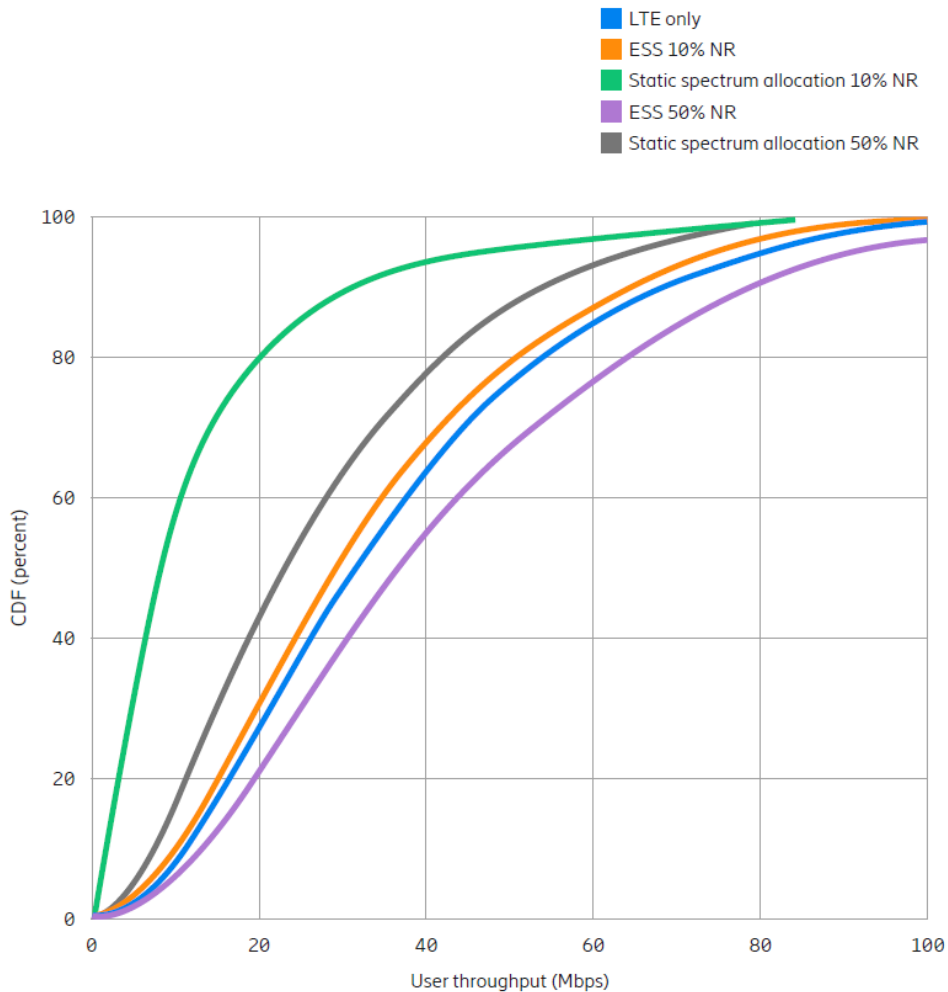
Az 5. generációs mobilhálózatok bevezetése a szolgáltatók részéről valószínűleg több lépésben lesz megvalósítva. Amelyik szolgáltató rendelkezik új, szabad frekvenciasávval (Mid-band, ~3.5 GHz), az valamelyik NSA architektúra megvalósításával, LTE-NR kettős kapcsolattal (EN-DC, E-UTRAN New Radio-Dual Connectivity) elindíthatja 5G szolgáltatását. Később a lefedettség növelése érdekében alacsonyabb frekvenciákon (Low-band) is el kell indítani az 5G szolgáltatást, így vivő aggregáció (CA, Carrier Aggregation) segítségével javulhat az 5G szolgáltatás lefedettsége és cellakapacitása. Alacsonyabb frekvenciákon még költséghatékonyabb az 5G bevezetése, hiszen kevesebb rádióállomásra van szükség, valamint teljes 5G lefedettség is elérhető, ami szükséges lesz az NR önálló (SA) működéséhez. A későbbiekben más frekvenciasávokban is elindított 5G szolgáltatással tovább lehet fokozni a hálózat kapacitását.

Az alacsonyabb frekvenciasávok viszont a legtöbb szolgáltatónál már foglaltak más szolgáltatások, például 4G számára. Ezeket a sávokat nem lehet újraosztani az NR részére a már meglévő LTE készülékek nagy száma és az általuk generált nagymennyiségű adatforgalom miatt. Erre jelent megoldást a dinamikus spektrum-megosztás (DSS), mely lehetővé teszi, hogy a frekvenciasávokat a 4G és 5G között dinamikusan megosztva használjanak a szolgáltatók.

3.1 Elvárások, kihívások

A DSS-nek jobb spektrumkihasználtságot és nagyobb adatátviteli sebességet kell biztosítania, mintha csak statikusan megosztanánk a spektrumot. A felhasználói eszközök számára ebben az esetben időosztásban mind 4G, mind 5G rádiótechnológiával hozzáférhető a teljes frekvenciasáv. A 3.1 ábra szimulált LTE és NR, end-to-end forgalom adatátviteli sebességének eloszlásfüggvényét (CDF, Cumulative Distribution Function) mutatja. Kékkkel egy 20MHz-es LTE cellán lévő LTE készülékek eloszlásfüggvénye látható. A többi szín különböző statikus és dinamikus megosztás esteket mutat be az LTE és NR készülékek számától függően. A statikus esetben a spektrum egy 10 MHz-es LTE és egy 10 MHz-es NR részre van

osztva. A százalékok az LTE és NR felhasználói eszközök megoszlását jelzik. (ESS=Ericsson Spectrum Sharing, a gyártó saját elnevezése a DSS-re)



3.1. ábra: Dinamikus és statikus spektrum-megosztás end-to-end teljesítményének összehasonlítása [4]

Látható, hogy a csak LTE lefedettséghez képest DSS konfigurációval kis mértékben csökkent a teljesítmény, de ez várható volt a plusz NR vezérlőjelek szükségessége miatt. Ezt a csökkenést kompenzálja az NR képes készülékek nagyobb aránya, hiszen azok sokkal hatékonyabban ki tudják használni a rendelkezésre álló spektrumot, mint az LTE készülékek. A szimulált full buffer esetekre vonatkozóan mindig jobb a dinamikus spektrum-megosztás, mint a statikus. A gyakorlati elvárás a szimulációtól jelentősen eltérő lehet.

Két különböző technológia egy frekvenciasávban való szolgáltatása jelentős nehézségeket és problémákat tud okozni. Interferencia alakulhat ki, amely következtében nem csak a felhasználók adatforgalma veszhet el, hanem a vezérlő

információk is, így teljesen megbénítva a hálózat és terminál közötti kommunikációt. A legfontosabb tehát, hogy az LTE és NR technológiák ne zavarják egymást.

3.2 Technikai megvalósítás

A dinamikus spektrum-megosztás megvalósítására a 3GPP [5] nem ír le konkrét megoldásokat, a technológiának csak néhány részlemét specifikálja. Lehetőséget biztosít szabványos funkciókkal az NR felhasználói eszközök számára, hogy azok ne zavarják az LTE referencia jeleket (CRS, Cell-specific Reference Signal). Az LTE CRS-re használt erőforrás elemeit az NR kihagyja az adat kódolása során. Ez a funkció csak 15 kHz-es alvivőtávolság (SCS) használatával érhető el, így már el is veszett az 5G egyik újdonsága, a skálázható alvivőtávolság. Az LTE eszközök nincsenek konfigurálva az NR csatorna figyelésére, nem rajtuk múlik az ütközések elkerülése. A másik 3GPP által definiált paraméter a 7.5 kHz-es, fél alvivőnyi frekvenciaeltolás UL csatornán, így nincs szükség védősávra az NR és LTE eszközök UL csatornái között. Ezekon kívül a megvalósítás teljes mértékben a mobilhálózati eszköz-gyártókra vár.

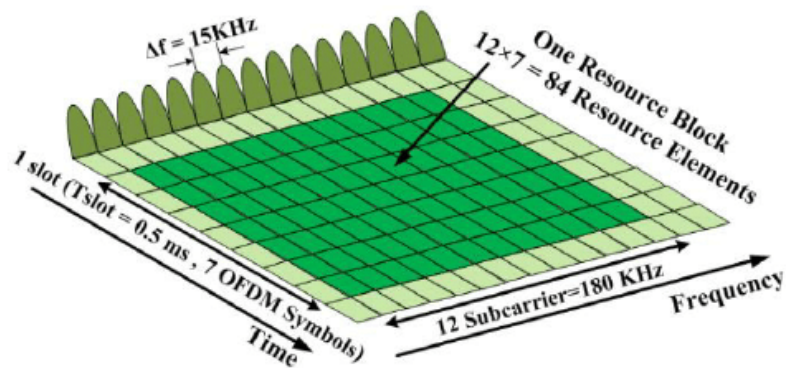
Az NR és LTE felhasználói eszközök egy 5, 10, 15, vagy 20 MHz-es frekvenciasávon tudnak osztozni. Méréseimet FDD technológiával működő rádióhálózaton fogom végezni, ezért a továbbiakban erre vonatkozóan fogom bemutatni a dinamikus spektrum-megosztás működésének alapjait.

Dinamikus spektrum-megosztás során a fizikai erőforrásblokkok (PRB, Physical Resource Block) kiosztása a két technológia között bárhogyan változtatható, az aktív NR és LTE eszközök igényeinek megfelelően. Ennek az erőforrás-megosztásnak az ütemezése 1ms, tehát minden slot-ban újra vannak osztva a fizikai erőforrásblokkok.

3.3 A fizikai réteg erőforrásmegosztása

3.3.1 LTE

A 4. generációs mobilhálózatok esetén egy fizikai erőforrás blokk (PRB) 12 darab, egymástól 15 kHz-re elhelyezkedő alvivőből áll (subcarrier), ami $12 * 15 \text{ kHz} = 180 \text{ kHz}$ összesen. Egy időrés (slot) 0.5 ms hosszúságú, mely normál prefix használata esetén 7 szimbólumot tartalmaz. Egy, a 3.2. ábrán látható erőforrásblokk (RB) 1 PRB*0.5 ms, ez a legkisebb erőforrás egység, amely egy felhasználó számára allokalható.

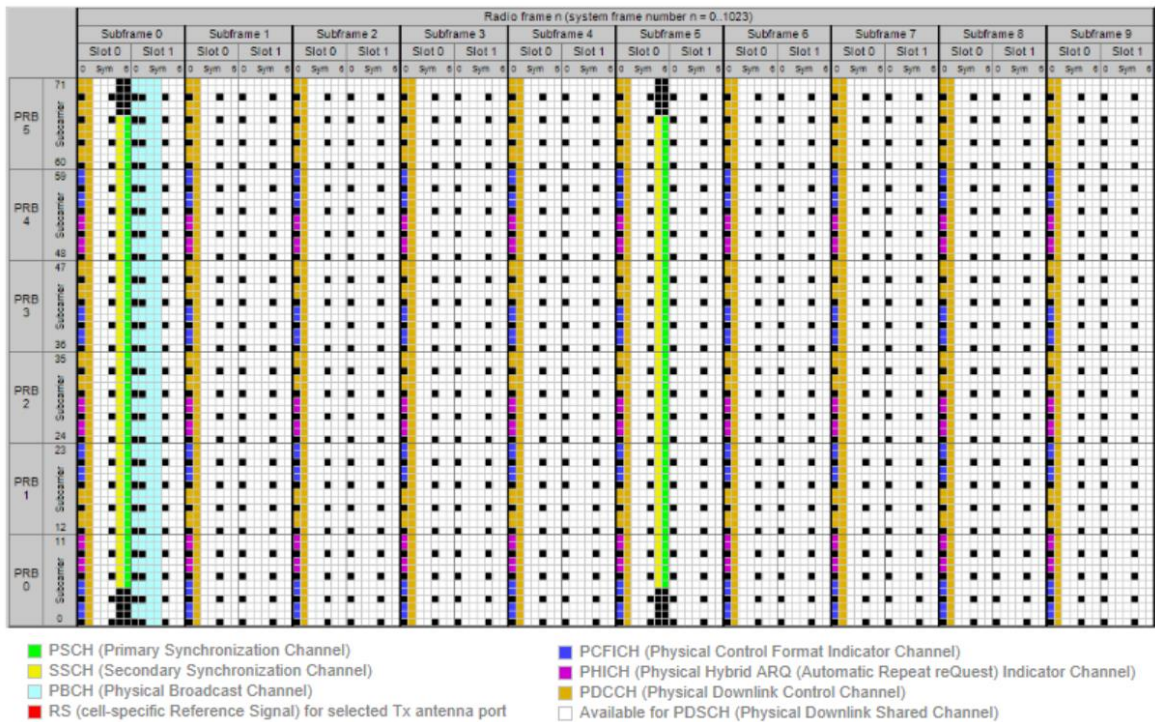


3.2. ábra: LTE erőforrásblokk (RB) [16]

Egy alkeret (subframe) két időrésből, egy keret (frame) 10 alkeretből épül fel. Ebből kiszámolható, hogy egy alkeret $12 \cdot 7 \cdot 2 = 144$ szimbólumot tartalmaz. A szinkronizációhoz és modulációhoz szükséges referencia jeleket is az erőforrás blokkokba kell építeni.

DL irányban egy erőforrás blokkban egy antenna esetén 4 referencia szimbólum van, több antennás esetekben a referenciaszimbólumok száma növekszik, de nem lineárisan. Például 4 antennás esetben, két antennának 4-4, míg 2 antennának csak 2-2 referenciaszimbólumra van szüksége. Letöltés irányú kontroll információt a PDCCH (Physical Downlink Control Channel) biztosítja, mely minden alkeret első két szimbólumát foglalja el. UL irányban minden időrészben a negyedik OFDM szimbólum tartalmazza a referencia jeleket. A vezérlőinformációkat a frekvenciasáv két szélső erőforrás blokkja hordozza időrészenként váltva, ha nincs adat.

Szinkronizációs jeleket minden első és hatodik alkeret első időrészének utolsó két szimbólumában küld. Frekvenciában ez a 6 középső erőforrás blokkot használja fel. Ezek a szinkronizációs blokkok a 3.3. ábrán sárga és zöld színnel vannak jelölve. Ezeket az erőforrás blokkokat kell majd „védeni” az NR-től, hogy működőképes legyen az LTE kommunikáció. Az LTE FDD rádiós keret a 3.3. ábra alapján épül fel.

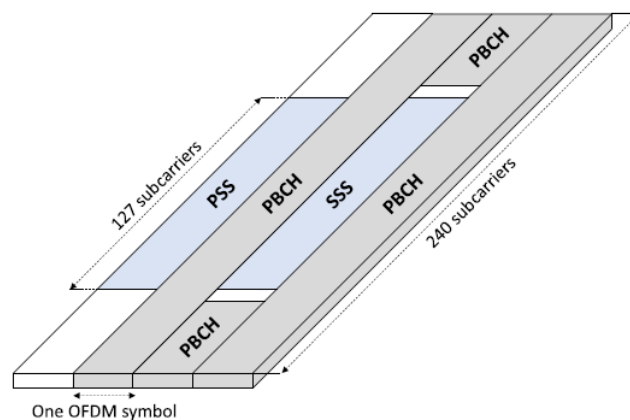


3.3. ábra: LTE FDD keretstruktúra [12]

3.3.2 5G NR

Ebben az alfejezetben az NR-nek csak a DSS működésének megértéséhez általam fontosnak tartott elemeit ismertetem. Az NR rádiós interfészt úgy alakították ki, hogy ne csak az LTE-vel való együttműködésre legyen képes, hanem a jövőbeli kompatibilitást is biztosítani akarták az elkövetkező új technológiák és szolgáltatások számára. Ennek egyik eredménye az 5. generációs mobilhálózatok nagy újítása a *numerológia*, mely magában foglalja az alvivők közötti távolság skálázhatóságát (SCS), mely befolyásolja a szimbólumok időtartamát, a ciklikus prefix (CP) időtartamát és az időrés (slot) méretét. Csak a slot-ok és szimbólumok hossza változhat, a rádiós keret (frame) hossza 10 ms, mely 10 db 1 ms hosszúságú alkeretet (subframe) tartalmaz. Ennek megfelelően az alkeret az alkalmazott numerológiától függően egy vagy több slot-ból áll össze, melyek mindegyikében 14 OFDM szimbólum található. Az erőforrásblokkok (RB) majdnem olyanok, mint a 4. generációs mobilhálózatoknál, de az „építőelemek” száma függ az alkalmazott numerológiától. Itt is 12 alvivő található egy erőforrásblokkban, maga a koncepció és a keret felépítése nem változott, így biztosítva az LTE-vel való együttműködést. 5G esetén az erőforrás blokkot csak a frekvenciatartományban definiáljuk, azaz a 12 alvivő egymástól $15\text{kHz} \cdot 2^n$ távolságra, míg LTE-ben $1\text{RB} = 1\text{PRB} \cdot 0.5\text{ms}$.

Az 5G rádiós hálózatokban a szinkronjelek viszont máshogyan épülnek fel, mint LTE-ben. Ezek a szinkronjel blokkok (SSB, Synchronization Signal Block) az 3.4. ábrán látható struktúrában, három fizikai csatornából tevődnek össze: elsődleges szinkronjel (PSS, Primary Synchronization Signal), másodlagos szinkronjel (SSS, Secondary Synchronization Signal), és fizikai broadcast csatorna (PBCH, Physical Broadcast Channel). Az SSB blokkok periodicitása konfigurálható (5-160 ms), így lehetőség adódik, hogy beillesszük ezeket az LTE szinkronjelek közé, az alapértelmezett periódusa 20 ms. A referenciajeleket (CSI-RS, TRS) a szinkronizációs jelekkel egy alkeretben ki lehet küldeni.



3.4. ábra: SSB idő/frekvencia struktúra [6]

3.3.3 DSS

Az előző két fejezetben részletezett szinkronizációs és referencia jeleket úgy kell ütemezni, hogy azok ne ütközzenek [7]. DSS konfigurációt lehet SA és NSA struktúrára épült 5G hálózattal is létrehozni, mivel az általam használt teszthálózat 5G része NSA architektúrájú, ezért az alábbiakban erre vonatkozóan fogom ismertetni a rádiós keret felépítését. Már korábban is említettem, hogy dinamikus spektrum-megosztást LTE kompatibilis 15kHz-es NR numerológia alkalmazásával lehet megvalósítani. A jövőállóság biztosítására létrehozott NR funkció, a konfigurálható fenntartott erőforrások (reserved resources), melyekkel olyan erőforrásokat lehet definiálni az idő-frekvencia síkon, amik nem lesznek használva NR átvitel során.

Ezt felhasználva válik lehetővé az LTE és NR sávok átfedése (a megcélzott spektrum-megosztás), mely során az NR PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) el tudja kerülni az „ütközést” (rate matching alkalmazásával) az LTE cellaspecifikus referenciajelekkel (CRS). Az LTE és NR fizikai csatorna vezérlőinformációit átvivő

csatornákat (PDCCH) is megfelelően kell ütemezni. Az LTE PDCCH lesz minden alkeret első két szimbólumában, míg az NR PDCCH lesz minden alkeret 3. szimbólumában. Az LTE kommunikációnak szüksége van további periodikus jelekre, amit szintén ki kell zárni az NR számára. Ezek a jelek az alábbiak:

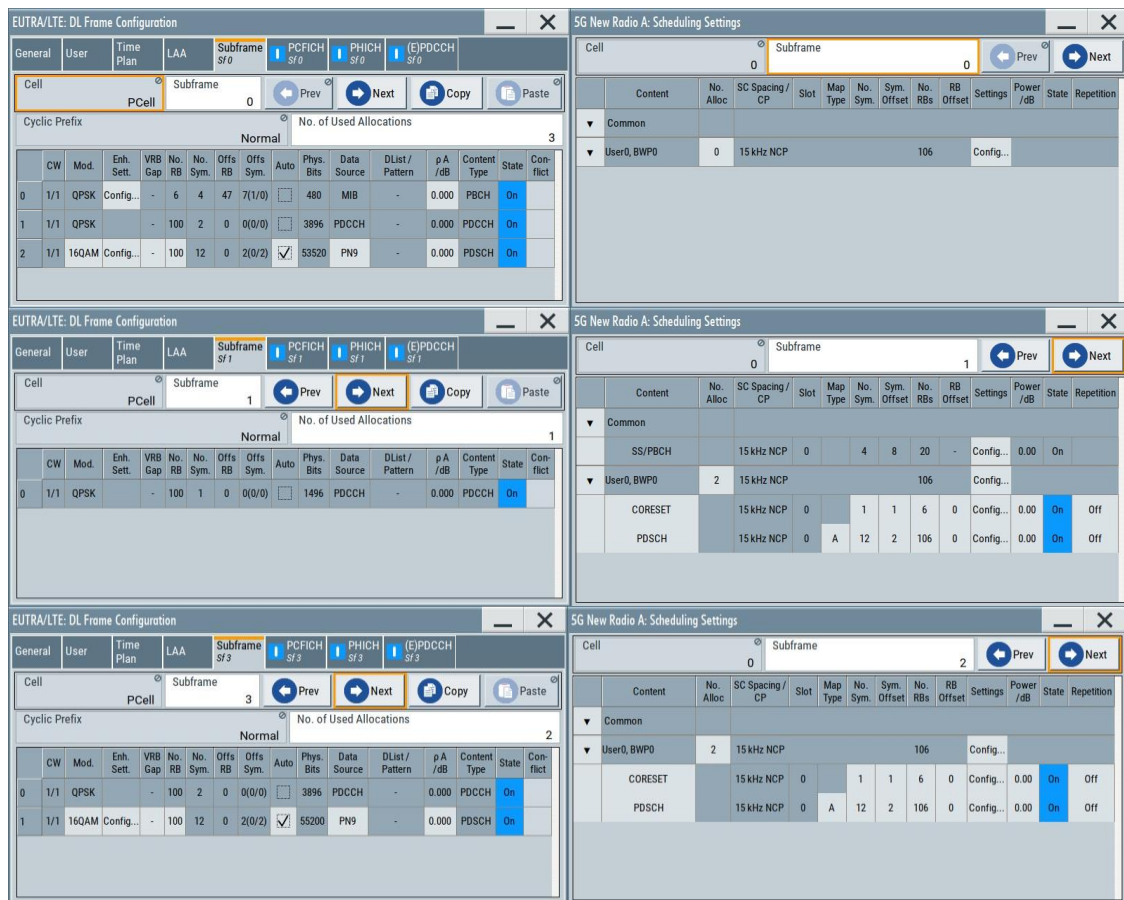
- szinkronjelek (PSS, SSS), melyek két OFDM szimbólumot és hat erőforrásblokkot foglalnak el minden ötödik alkeretben
- fizikai broadcast csatorna (PBCH) négy OFDM szimbólumot és hat erőforrásblokkot foglal el minden keretben
- rendszeresen sugárzott cellaspecifikus referenciajelek (CRS)

Korábbi LTE szabványokban [17] definiáltak egy multimédia broadcast szolgáltatás (MBMS, Multimedia Broadcast Multicast Services) támogatására szükséges funkciót, melyben bizonyos alkeretekben például TV műsorokat lehetne sugározni, ezek az MBSFN (Multimedia Broadcast Single Frequency Network) alkeretek, melyre végül nem mutatkozott igény, a magas frekvenciabérleti díjak miatt, továbbá a felhasználói igényekre sem volt szabható, hiszen kicsi az esély arra, hogy egy cellában többen is ugyan azt a TV műsort néznék. Természetesen vannak más felhasználási opciók is: stadionokban meccsek alkalmával a gólok visszajátszása, vagy szoftverfrissítések küldése a felhasználói eszközökre. A magas költség mellett a szolgáltatás elterjedést a technológiai „fejletlenség” is befolyásolta, hiszen ehhez GPS vagy PTP (Precision Time Protocol) időszinkronra van szükség. A régi MBMS szolgáltatásra tervezett alkereteket (MBSFN) az LTE terminálok számára is kompatibilis konfigurációval, üresen hagyva használjuk fel NR alkeretek továbbítására. A konfiguráció során fel kell használni, hogy az LTE MBSFN [8] alkeret befolyásolja az OFDM szimbólumokat, csak az első két szimbólumban helyezkedhetnek el a kontroll információk. Ezeknek a speciális alkereteknek a szimbólumait használhatjuk fel (az első kettő kivételével) az NR szinkron és referenciajelekre. Más megoldás nemigen van, hiszen a szinkronjelek frekvenciában és időben is összefüggő blokkot alkotnak (ld. 3.4. ábra).

Az NR vezérléshez szükségesek az SSB-k 20 ms periodicitással, a TRS-ek (Tracking Reference Signal) 80 ms periodicitással és a CSI-RS-ek (Channel State Information Reference Signal) 20 ms periodicitással. Szerencsére a TRS és CSI-RS jelek elküldhetők az SSB jelekkel közös slot-ban. Mivel egy NR SSB 4 szimbólum „széles” ezért az SSB átvitelére egy MBSFN alkeretet kell definiálni. Egy keret fixen 10

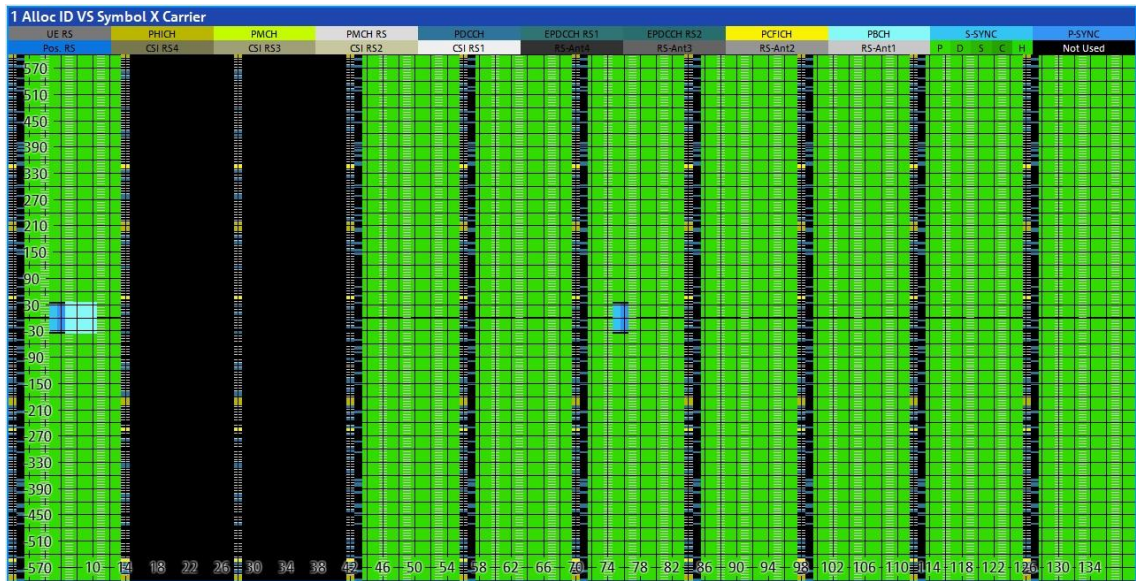
ms, így adódik, hogy minden második rádiókeretbe kell legalább egy LTE MBSFN alkeretet konfigurálni. Ez a minimum, különböző megvalósításokhoz és célokhoz több MBSFN alkeret konfigurálása is lehetséges. A PDSCH pedig az LTE és NR felhasználók között oszlik fel dinamikusan.

A fentiekben levezetett keretstruktúrának az LTE és NR részét példaként külön összeállítottam két egymás utáni MBSFN alkerettel, 20 MHz-es sávszélességre konfigurálva, ezeken kívül teljes LTE terheléssel, majd egy 4G/5G hálózatanalizátoron (Rohde & Schwarz FSVA3007, Release 15 kompatibilis) ellenőriztem az eredményt. A 3.5. ábrán látható a különböző LTE és NR alkeretek beállításai a jelgenerátoron (Rohde & Schwarz SMBV100B, Release 15 kompatibilis). A bal oszlopban három LTE alkeret beállítása szerepel. Az első alkeret, melyben a szinkronizációs blokkok vannak, a második alkeret, mely MBSFN alkeretnek van definiálva, így az üres marad, csak a PDCCH lesz benne LTE részről (ilyen lesz a harmadik alkeret is), valamint a negyedik alkeret, mely a PDCCH és PDSCH számára lesz kiosztva. A keret további hat alkerete is a negyedik alkeret szerint lesz konfigurálva. A jobb oldali oszlopban a különböző NR alkeretek konfigurációja szerepel. Az első alkeret üresen lesz hagyva az LTE szinkronizációs jelek számára, a második és harmadik alkeret (MBSFN) az NR részére vannak fenntartva, ezekbe lehet konfigurálni az NR SSB-ket.

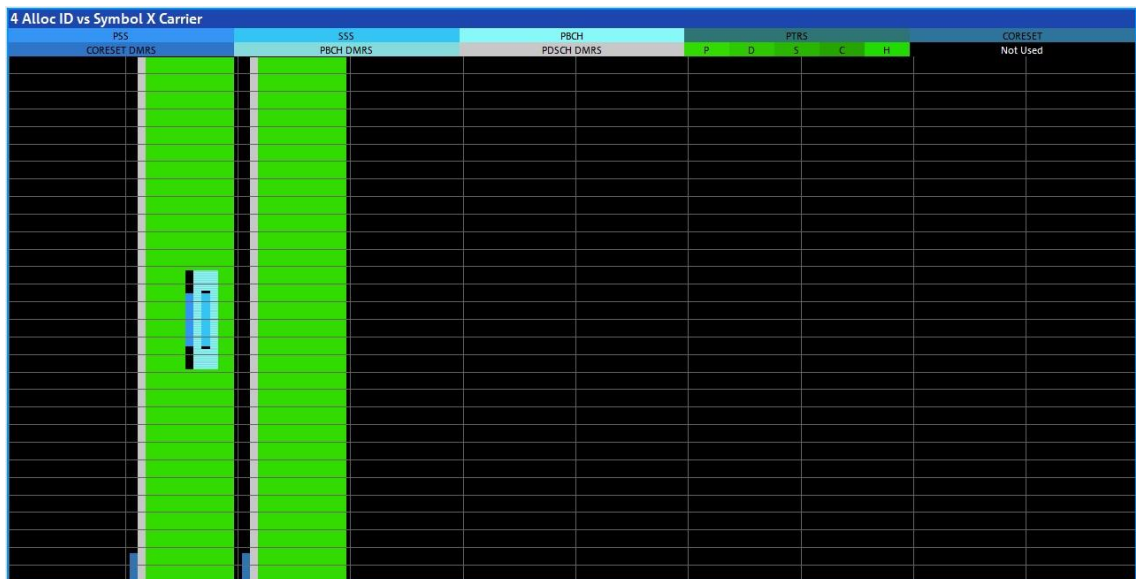


3.5. ábra: LTE és NR alkeretek egy lehetséges konfigurációja DSS üzemmódban

A 3.6. és 3.7. ábrán pedig a keretek részletes struktúrája látható, ahogyan a generált jelet a hálózatanalizátorral detektáltam. Ebben a példában LTE-n a 2. és 3. alkeret van MBSFN alkeretként definiálva. Az ábrák az LTE és NR erőforrás-megosztást szemléltetik. A vízszintes tengelyen a szimbólumok száma, a függőleges tengelyen pedig az alvivők száma látható.



3.6. ábra: LTE keretstruktúra



3.7. ábra: 5G NR keretstruktúra

Az ábrák alapján megfigyelhető az LTE és NR együttműködés (koegzisztencia), ami lehetővé teszi a dinamikus spektrum-megosztás megvalósítását. Ebben a példában (a 3.6. ábra alapján) látszólag alig jut erőforrás az NR adatforgalomnak (PDSCH), mivel a modellezett időintervallumban a jelgenerátor kizárólag LTE forgalmat generál teljes kihasználtsággal, de ez az LTE és NR arány a forgalmi viszonyok függvényében dinamikusan, 1 ms-os ütemezési periódusok alapján változhat.

Az UL irányú megoldás ennél egyszerűbb, szabadabban lehet konfigurálni, kevesebb vezérlő és referencia jelet alkalmaz. Az NR és LTE uplink ütemezést úgy kell

megoldani, hogy elkerüljék az ütközést a PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) csatornák között, valamint az NR ütemezőt korlátozni kell, hogy kihagyja az LTE UL első rétegbeli (layer1) vezérlőjeleit (PUCCH, Physical Uplink Control Channel).

3.4 Terminál oldali elvárások

A DSS konfiguráció használatához a hálózathoz csatlakozó eszközöknek előre definiált képességekkel kell rendelkezniük, melyek a UE capability (eszköz képesség) üzenetben kerülnek továbbításra. Ezeket a képességeket ellenőrzi az eNB, mielőtt DSS képesnek deklarálja a terminált az adott sávban.

Az NR terminálokban az 5G NR FDD támogatáson felül az alábbi, 3GPP által definiált képességek szükségesek [9]:

- 7.5kHz UL raster shift: uplinken 7.5kHz-es frekvenciaeltolás
- *rateMatchingLTE-CRS*: az LTE CRS-ek kihagyása az NR adatátvitel kódolása során
- *rateMatchingResrcSetSemi-Static*: egyeztetés az LTE szinkron és PBCH csatorna feltérképezéséhez
- *additionalDMRS-DL-ALT*: (opcionális) további DMRS (Demodulation Reference Signal) esetet lehet megadni

Ezekből a UE képességekből csak az utolsó opcionális, az első hármat kötelezően támogatnia kell a terminálnak.

Az LTE eszközök használatából fakadóan is vannak elvárások, de ezek nem újak, hiszen éppen az a cél, hogy egy DSS konfiguráció alatt a már forgalomban lévő régebbi készülékeket is ki tudjuk szolgálni az újak mellett. Két fontosabb képességet érdemes itt megemlíteni: az MBSFN alkeretet, aminek már az előző alfejezetben kifejtettem fontosságát és szerepét, a másik pedig a PUCCH eltolása, hogy biztosítsa a helyet az NR UL vezérlő információknak.

4 A DSS vizsgálatának céljai és elvárásai

A dolgozat két céljai közül az egyiket, hogy a már meglévő LTE és 5G NR szabványok alapján az LTE-NR együttműködésének (koegzisztencia) felhasználásával bemutassa ennek az új technológiának egy megvalósítási módját, az előző fejezetekben igyekezett teljesíteni. A dolgozat másik célja, hogy mérési módszertant adjon a DSS vizsgálatára, és egy frissen kiépített teszhálózaton végrehajtott méréssorozat segítségével bemutassa az új technológia képességeit és korlátait.

Ehhez egy olyan mérőkörnyezet kiépítése szükséges, mellyel egyszerre két technológiát és több felhasználói eszközt is tudunk monitorozni. A vizsgálat során külön kitérek az erőforráskiosztás működésére, és annak hatására különböző mobiltípusok esetén. A két rádiótechnológia egy sávban történő használata során a spektrumban több referencia és szinkronizációs jel lesz jelen, melyek egymással nem ütközhetnek, viszont a spektrumban is több helyet foglalnak, így kevesebb hely marad a felhasználói adatok számára, amiből egyenesen következik, hogy az adatátviteli sebességek csökkenni fognak. Az előző fejezet levezetése alapján, valamint a 3.6. és 3.7. ábrán látható, hogy a kék színnel jelölt NR SSB blokkok a frekvencia tengelyen elég nagy helyet foglalnak, sokkal több RB-t szükséges nekik dedikálni, mint LTE esetében. A legkisebb használható sáv szélesség erre a technológiára 5 MHz. A jelgenerátort átkonfigurálva 5 MHz-es sáv szélességre, ezen kívül minden beállítást meghagyva, amit a 3-as fejezetben használtam a 20 MHz-es konfigurációnál, a 4.1. ábrán látható, hogy egy kis sáv szélességű konfiguráción nagyon nagy a dinamikus spektrum-megosztás megvalósításának „költsége”. Emiatt a gyártók 5 MHz sáv szélesség esetén nem is valósították meg a DSS-t, a legkisebb használt sáv szélesség 10 MHz.



4.1. ábra: LTE és NR rádiós keretek 5MHz sáv szélességgel

Mivel a referencia és szinkronizációs jelek erőforrásigénye állandó, ezért minél kisebb sáv szélesség áll a rendelkezésre, annál kisebb lesz a spektrum hatásfoka. A 4.1-es ábrán kékkkel vannak jelölve ezek a szinkronizációs blokkok, melyek „nagysága” független a sáv szélességtől.

4.1 A forgalmi mérések során elvárható átviteli sebesség

Hálózati forgalmi mérések során end-to-end méréseket végeztem, hiszen legkönnyebben ezekből tudunk következtetni a dinamikus spektrum-megosztás hatására történő cellaképességek főbb javulására vagy romlására. Lehetőség van például késleltetés és átviteli sebesség mérésére.

Az elvárt átviteli sebesség (elméleti maximum) előre meghatározható egy ismert tesztkörnyezet esetén, mely LTE-re a következőképpen néz ki. Minden alkeret (1 ms) 14 szimbólumot, és minden keret (10 ms) 10 alkeretet tartalmaz, ez $14 \cdot 10 \cdot 10 = 14000$ szimbólum/s. A moduláció típusa, jó rádiós környezetben 64 (6 bit/szimbólum/alvivő) vagy 256 (8 bit/szimbólum/alvivő) QAM - ez készüléktől, de akár hálózatkonfigurációtól is függhet. Egy erőforrásblokkban 12 alvivő van 15 kHz-es távolságban egymástól. Így összesen egy alkeretben $12 \cdot 2 \cdot 7 = 168$ szimbólum található, mely $168 \cdot 6 = 1008$ bit/ms $= 1008$ kbit/s adatátviteli sebességet biztosít. Egy 20 MHz szélességű LTE sávba cellában a védősávokkal együtt 100 PRB fér be egyszerre, így ennek az elvi maximális átviteli sebessége $1008 \text{ kbit/s} \cdot 100 = 100.8 \text{ Mbit/s}$ egyantennás esetben. Több antennás esetben keletkezik némi veszteség az antenna referencia szimbólumok miatt. Ismét a mérési összeállításomra vonatkoztatva 2x2 antenna esetén minden PRB-ben 8, azaz minden alkeretben 16 referenciajel szükséges, így az adatátvitelre használható szimbólumok száma $168 - 16 = 152$ lesz alkeretenként. Ennek következtében a hatásfok $152/168$ lesz. Ezzel beszorozva az átviteli sebességet, mely 2x2 antenna esetében az egy antennás duplája lenne, $100.8 \text{ Mbit/s} \cdot 2 \cdot (152/168) = 182.4 \text{ Mbit/s}$ elméleti maximális (fizikai réteg-beli) adatátviteli sebesség jön ki 20 MHz-es 2x2 antennás LTE átvitel esetére 64 QAM modulációt használva.

Ez alapján különböző konfigurációkra, valamint NR technológiára is meg lehet határozni az elméleti maximális átviteli sebességet. Fontos, hogy 5G NR esetén a kisebb védőtávolság (guardband) miatt adott sáv szélességen több RB fér el, mint LTE-n. Például 20 MHz-es sáv szélességen 106 NR RB van, míg LTE-ben csak 100.

4.2 A hálózatanalizátoros elemzések hasznosságáról

Hálózatanalizátoros elemzések során a DSS egy gyakorlati megvalósítását lehet elemezni. Részletes képet kaphatunk a hálózat konfigurálásáról, például a definiált MBSFN alkeretek számáról, vagy a szinkronizációs blokkok elhelyezkedéséről, mert ezek sem mindig a frekvenciatartomány középső 6 RB-jában helyezkednek el. A mobilterminál hálózattal való kommunikációját valós időben tudjuk követni és elemezni. Az átvitel minőségének vizsgálata során különböző hibavektorok (EVM, Error Vector Magnitude) számítására és táblázatban, esetleg grafikonon történő megjelenítésére van lehetőség. A konstellációs diagramm segítségével látni lehet a

moduláció típusát és mértékét, valamint jel-zaj viszonyt (SNR, Signal-Noise Ratio). Több felhasználó esetén meg lehet figyelni a PDSCH felosztását a terminálok között.

A most említett alkalmazásokon kívül egy hálózatanalizátornak még számos más képessége is van, mely hozzájárulhat hálózati és terminál funkciók teszteléséhez, modellezéséhez, de ezek már túlmutatnak ennek a dolgozatnak a témáján, ezért nem térek ki rájuk.

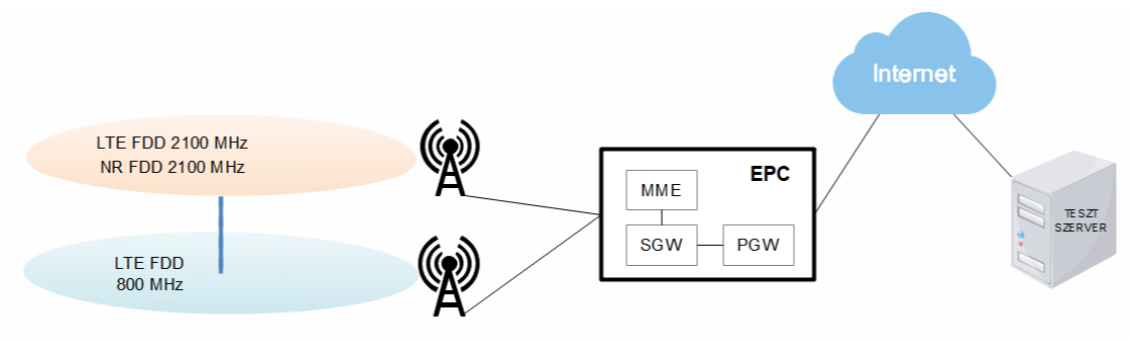
5 Mérések bemutatása, eredmények értékelése

Korábban már levezettem majd egy jelgenerátor segítségével bemutattam, hogyan lehet megosztani a spektrumot olyan mobileszközök között, amelyek mind időben, mind frekvenciában két különböző rádiós technológiával működnek (LTE és 5G). Ebben a fejezetben egy dinamikus spektrum-megosztásra konfigurált teszthálózaton végzett méréseimet mutatom be, melyet különböző képességű LTE és NR terminálokkal végeztem. Emellett hálózatanalizátor segítségével is elemeztem a DSS erőforrás kiosztásának megvalósítását – ennek a vizsgálatnak az eredményei is megjelennek itt.

A mérések elvégzéséhez először a mérendő hálózatot kell összeállítani, majd a mérőműszert csatlakoztatni. A műszeren be kell állítani a hálózat paramétereit, melyen a mérések lesznek végezve. Ezek után a méréshez szükséges terminálokat kell kapcsolni a hálózatba, melyek segítségével adatforgalommal lehet terhelni a cellát. Az adatforgalom valamely értékeit (ebben az esetben az adatátviteli sebességet) a mérés során folyamatosan kell gyűjteni, a kiugró értékeket el kell távolítani. Az „adattisztítás után” következik a mérési eredmények értékelése, és ezzel együtt a megfelelő formátumú megjelenítése (például grafikonon).

5.1 Teszthálózat

A 2. fejezetben már kifejtettem az 5. generációs hálózatok megvalósításának lehetséges módjait, röviden az SA és NSA architektúrát. Az 5.1. ábrán látható annak a teszthálózatnak a felépítése, amin a méréseimet végeztem. Ez egy 5G NSA támogatására képes LTE hálózat, mely a 2.4. ábrán látható 3x architektúra alapján épül fel. Mivel az 5G képes terminál a DSS-re konfigurált cellapáron NR adatkapcsolatot létesít, ami viszont NSA hálózatok esetén nem továbbít vezérlő információkat (CP, Control Plane), ezért szükség van egy külön úgynevezett anchor LTE cellára, melyen a CP üzenetváltások mehetnek. Így kettős csatlakozással (DC – Dual Connectivity) tud egyszerre az NR és a külön LTE cellára is kapcsolódni.



5.1. ábra: A DSS vizsgálatára létrehozott teszhálózat felépítése

Az 5.1-es ábrán látható a két külön cella, amely lehetővé teszi a dinamikus spektrum-megosztást. Ezek egyike egy 2100 MHz-es DSS cellapár, ami LTE és NR hozzáférést biztosít, valamint egy 800 MHz-es LTE cella, mely anchor cellaként funkcionál. Az anchor LTE cellának a DSS sávtól eltérő sávban kell lennie. Mindkettő frekvencia duplex (FDD) technikával működik. A node-ok csatlakoznak az LTE core hálózathoz, ami átjárást biztosít az internet felé, ezen keresztül érhető el a tesztszerver, aminek megnyitott portjaihoz a terminálok csatlakozni tudnak.

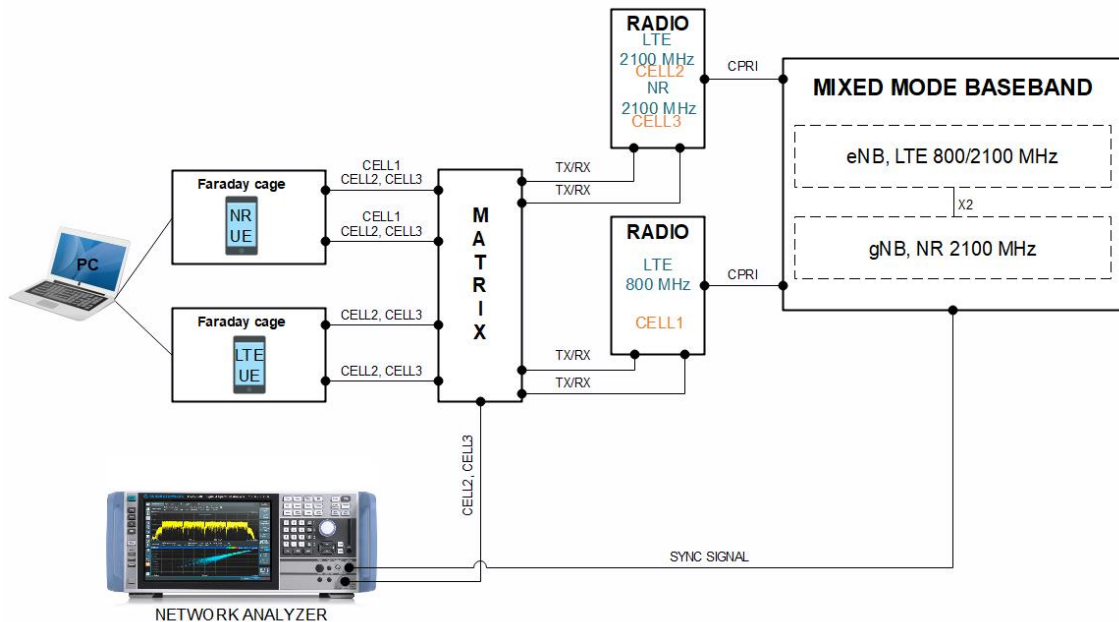
5.2 Mérési összeállítás

Mobilhálózatok vizsgálatára sokféle módszert és eszközt dolgoztak már ki, melyek a hálózat különböző funkcióira fókuszálnak. A dinamikus spektrum-megosztás egy különösen új, egyelőre még nem szabványosított technológia, amit minden gyártó saját maga implementál - emiatt lehetséges, hogy nagy különbségek lesznek a megvalósítások között. Az eltérések vizsgálatához referencia-mérési módszertanra van szükség, ebben a dokumentumban egy ilyen módszertanra tesztek javaslatot, és bemutatom az első megvalósításhoz kapcsolódó, nyilvánosan megosztható eredményeket is.

Ennek részeként munkám során egy olyan mérőkörnyezet összeállítására törekedtem, amellyel a hálózati konfiguráció és a terminálokfunkciók is könnyedén lehet tesztelni. Ehhez az 5.2. ábrán látható mérési összeállítást valósítottam meg. A mobilhálózati elemeken kívül felhasznált eszközök:

- Számítógép TEMS Investigation [18] és IPerf3 [19] szoftverrel
- Faraday kalitkák / árnyékolt dobozok
- LTE és NR képes terminálok (mobiltelefonok)

- Csillapító mátrix
- Hálózatanalizátor (Rohde & Schwarz FSVA3007) [20]



5.2. ábra: A mérési összeállítás

5.3 Hálózatanalizátoros vizsgálat

Hálózatanalizátoros mérés esetén a műszert össze kell szinkronizálni a hálózattal. Ezt az impulzus szerű szinkronjelet a baseband-ből lehet kinyerni, és a műszer external trigger bemenetére kell kötni. Ezen kívül a vizsgálni kívánt cellát – jelen esetben a 2100 MHz-es LTE+NR (CELL2, CELL3) – egy RF kábellel kell a műszer bemenetére kötni. Ez után fel kell konfigurálni a műszert, meg kell adni a vizsgálandó frekvenciát, sávzélességet, hogy milyen szinkronizációs jeleket/blokkokat keressen. Előfordulhat, hogy a műszerrel nem lehet egyszerre LTE és NR jelet detektálni, mert bár a keretstruktúrájuk hasonló, de a két technológia működése teljesen más. Ilyenkor csak külön van lehetőség megjeleníteni a spektrumban helyet foglaló jeleket. Az itt bemutatott mérések így készültek, illeszkedve a mérőműszer [20] nyújtotta lehetőségekhez.

Az 5.3. ábrán látható egy „üres” LTE rádiós keret, mikor nem volt adatforgalom a cellán, csak a szinkronizációs, vezérlő és referenciajelek vannak jelen. Ezeket a szimbólumokat az NR adatforgalomnak mind ki kell hagyni, ebből következhet egy

jelentősebb eltérés az adatátviteli sebesség elméleti maximumától. Az ábra vízszintes tengelyén a szimbólumok száma, függőleges tengelyén az alvívök száma látható.



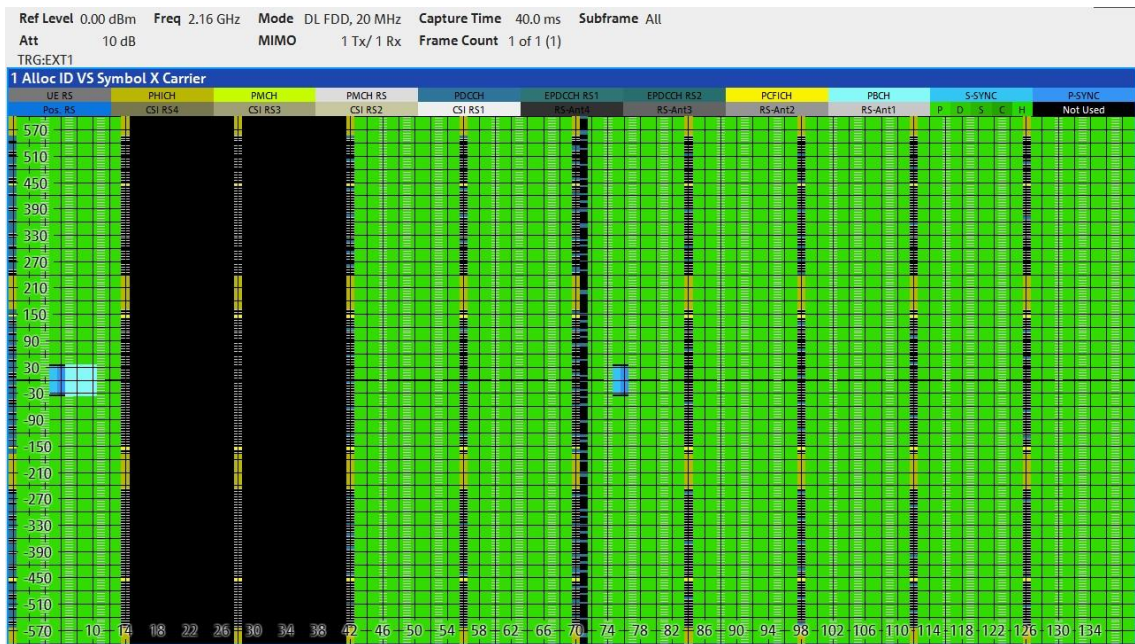
5.3. ábra: LTE CP üzenetek a rádióskeretben

Az 5.3. ábrán a 14. és 42. szimbólumok között van két alkeret (második és harmadik), melynek csak az első két szimbólumában vannak információk, ezek az MBSFN alkeretek, amik az NR részére vannak fenntartva, ezekben kerülnek kiküldésre az 5.4. ábrán látható SSB-k.



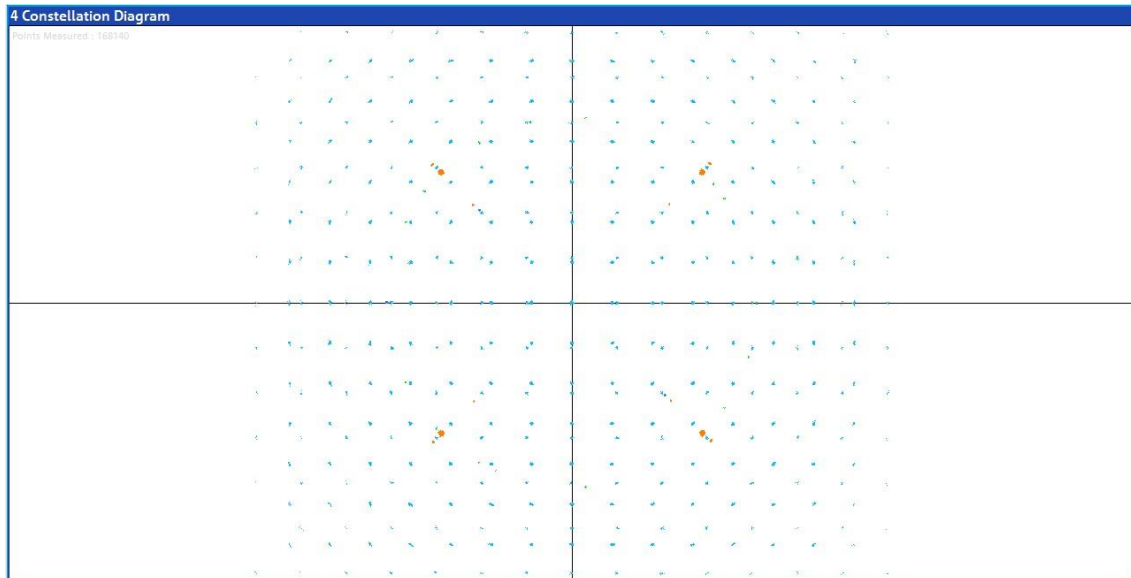
5.4. ábra: NR SSB (szinkronizációs blokk)

Letöltést indítva az egyik LTE terminállal, az 5.5. ábrán sokkal jobban láthatóvá válnak az MBSFN alkeretek. Az 5.5. ábrán lényegében ugyan az a rádiós keret látható, mint az 5.3. ábrán csak éppen LTE adatforgalom van a cellán. Ebben az adott hálózati konfigurációban minden keretben 2 MBSFN alkeret van definiálva.



5.5. ábra: LTE rádiós keret full buffer LTE letöltés közben

A folyamatos letöltés közben a jelszinttől és interferenciától függően változhat a moduláció mértéke. Mivel ezt a mérést laborkörnyezetben végeztem, és nem vezettem be a Faraday kalitkába semmilyen zavaró jelet, ezért a jó rádiós körülmények miatt magas szintű, 256 QAM-es modulációt alkalmazott a hálózat. Az 5.6. ábrán látható konstellációs diagramot megjelenítő szemábrán szépen kirajzolódnak és elkülönülnek egymástól a szimbólumok.



5.6. ábra: 256 QAM szemábra

Az ábrán kék színnel a PDSCH szimbólumai vannak jelölve, míg narancssárgával a vezérlési információk szimbólumai. A vezérlő információkhoz QPSK modulációt alkalmaznak. Egyrészt nem kell annyi információt elküldeni, hogy magasabb szintű moduláció kelljen hozzá, másrészt így sokkal zajtűrőbb a jel, hiszen a szimbólumok távolabb helyezkednek el egymástól és a dekódolás során is lényegesen kisebb a hiba esélye.

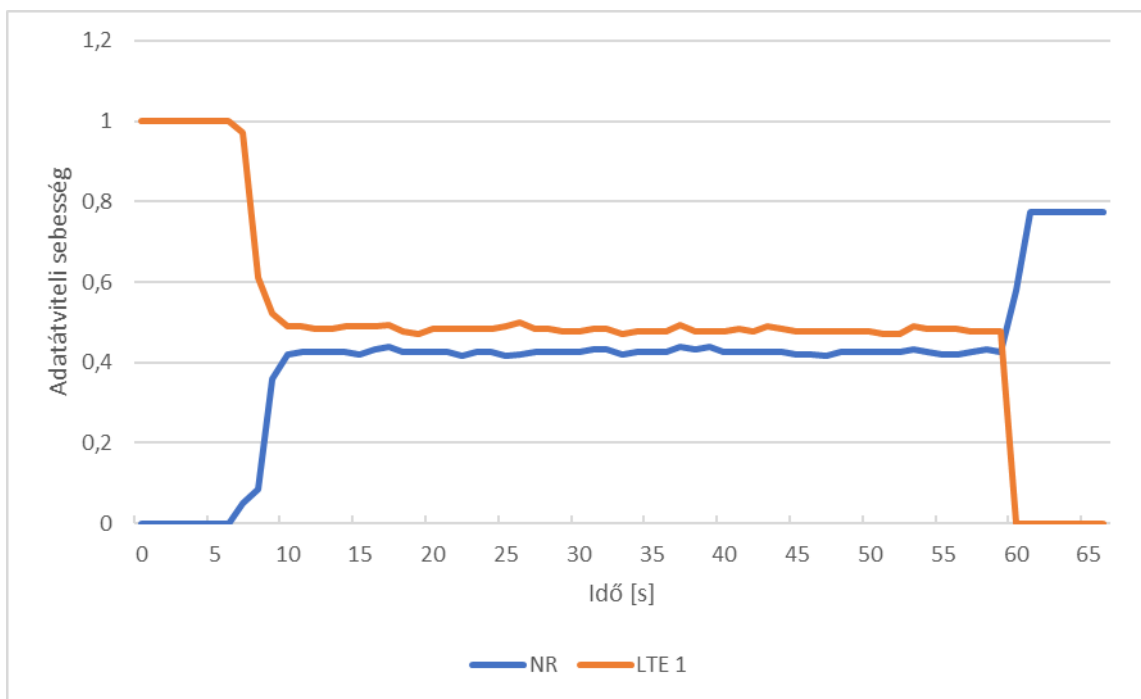
5.4 Forgalmi mérések

Adatforgalom generálására és adatátviteli sebesség mérésére az IPerf3 programot használtam, melyet a mérőszerveren is futtattam és portokat nyitottam az egyes terminálok számára. Első lépésként minden terminállal végeztem egy-egy külön mérést, hogy a későbbi mérésekhez legyenek referencia értékeim, valamint, hogy megtudjam mennyivel csökken az adatátviteli sebesség LTE, valamint NR technológián a DSS konfiguráció miatt. Az eredmények abszolút értékei helyett normalizált értékeket mutatok be a kérdéses technológia újszerűsége és az eredmények „érzékenysége” miatt. Dolgozatom célja nem az abszolút értékek publikálása, hanem a technológia bemutatása és dinamikus működésének vizsgálata.

A mérési eredmények bemutatása során referencia értéknek a 256 QAM modulációra képes LTE terminálnak, DSS-re előkészített cellán, az általam mért adatátviteli sebességét tekintem, és minden mérési eredményt ezzel normalizálok. Így láthatóak maradnak a terminálok képességeiből adódó különbségek.

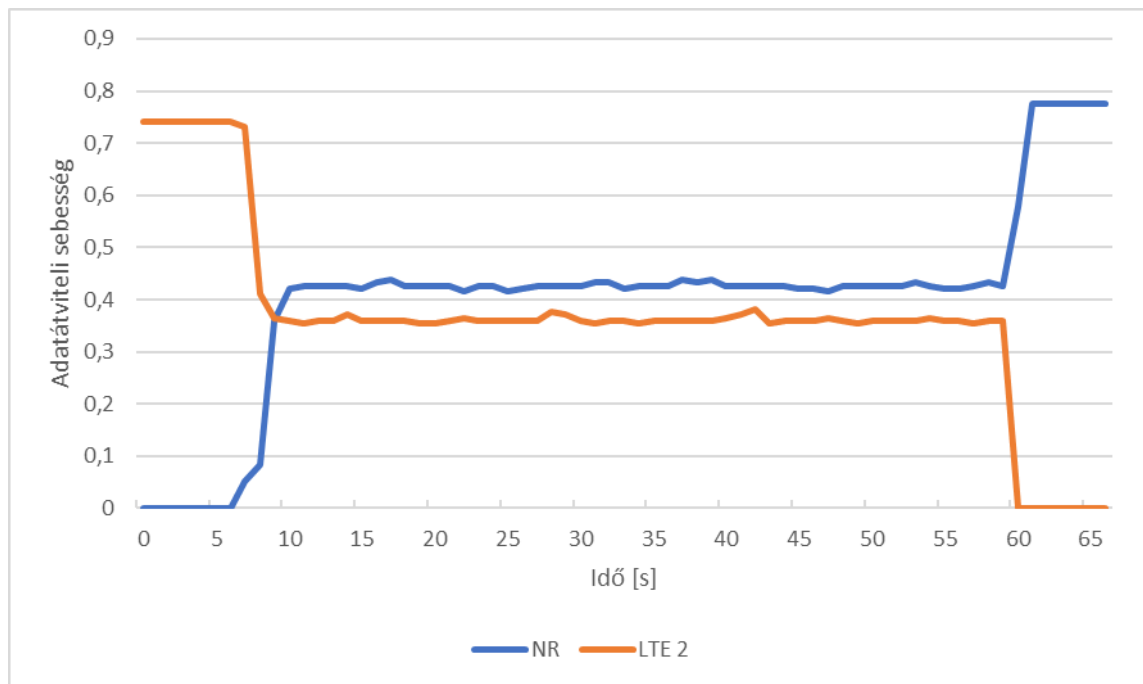
5.4.1 Erőforrás kiosztás

Erőforrás megosztás vizsgálatához NR és különböző képességű LTE terminálokat használtam fel, melyekkel párhuzamosan full buffer DL irányú TCP adatforgalmat kezdeményeztem, és mértem az adatátviteli sebességet. Az első mérést egy NR és egy LTE terminállal végeztem, mindkettő 256 QAM-es modulációra képes. Az adatátviteli sebességet másodperces bontásban mértem. Az 5.7. ábrán látható a két terminál normált adatátviteli sebessége az idő függvényében, kékkel az NR, míg narancssárgával az LTE terminál értékeit ábrázolva. Az LTE adatátviteli sebességben nagyjából hat másodperc után hirtelen letörés következik, ekkor kezdett el letölteni az NR terminál, és a hálózat megfelezte a terminálok között a rendelkezésre álló erőforrásokat, majd 60 másodpercnél az LTE terminál befejezte a letöltést, és így az összes erőforrás az NR terminálnak lett kiosztva, ennek hatására lényegesen megnövekedett az adatátviteli sebessége.



5.7. ábra: NR és LTE terminál a datátviteli sebessége 256 QAM-es modulációval

A második mérésben az LTE terminált lecseréltem egy alacsonyabb, 64 QAM modulációra képes LTE terminálra és az előző mérést ezekkel megismételtem. Az eredményeket az 5.8. ábra mutatja be, melyen az 5.7. ábrához hasonlóan, kékkel az NR, narancssárgával az LTE terminál adatátviteli sebességének grafikonja látható az idő függvényében.



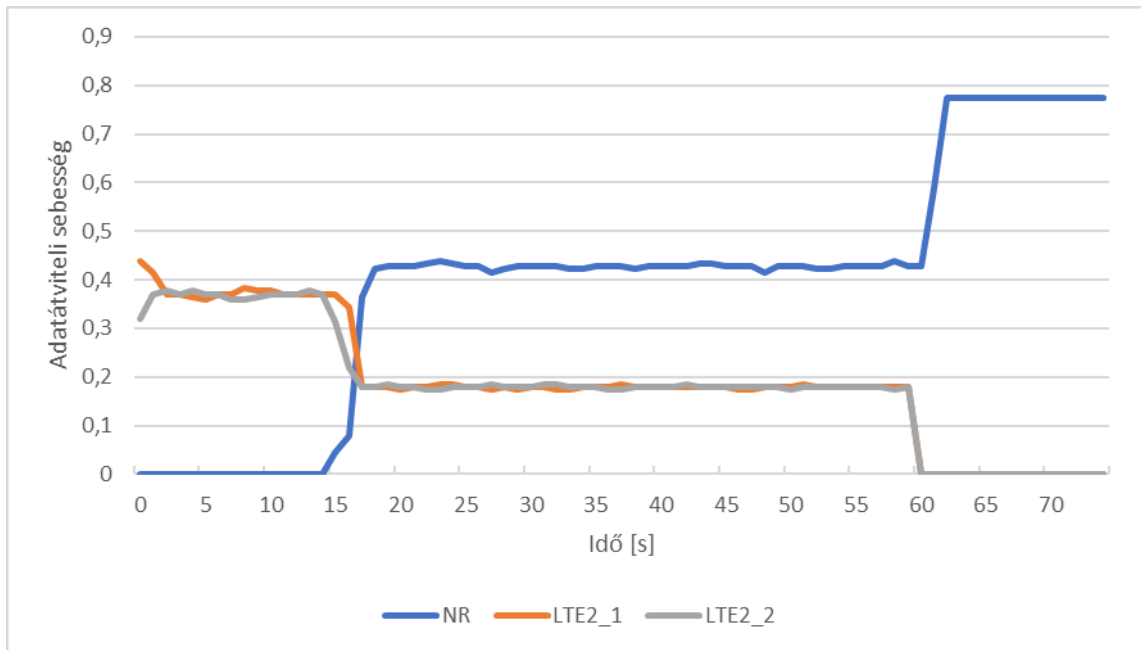
5.8. ábra: NR (256 QAM) és LTE (64 QAM) terminál a datátviteli sebessége.

Az előző két mérés során az NR terminál adatátviteli sebessége megegyezett, míg az LTE terminálok esetében eltérés volt tapasztalható, ami várható volt a modulációs képességek különbözőségéből adódóan. Mind az NR és a kétféle LTE terminál – amikor együtt aktívan forgalmat generáltak – a referenciaméréseknél teljesített adatátviteli sebességének a felét érte el.

Ebből egyértelműen meghatározható, hogy a vizsgált paraméterezésű DSS technológiával működő mobilhálózat az erőforrás allokáció során nem veszi figyelembe a végfelhasználói adatátviteli sebességet, csupán egyenlő mértékben kiosztja a szabad erőforrásblokkokat a terminálok között, a többi már a terminál képességein múlik. Az ilyen erőforráskiosztási stratégia az NR eszközök adatátviteli sebességét nagy mértékben rontja, hiszen a most bemutatott esetekben is láthatóan egy NR terminál ugyanannyi RB-t kap a hálózattól, mint egy LTE terminál, viszont az NR számára allokált erőforrás blokkokban ugyan úgy jelen vannak az LTE vezérlő információk, mint az LTE számára allokált erőforrás blokkokban. Ezeket az LTE referenciajeleket az NR-nek szabadon kell hagynia, ahogyan ezt már a 3. fejezetben kifejtettem.

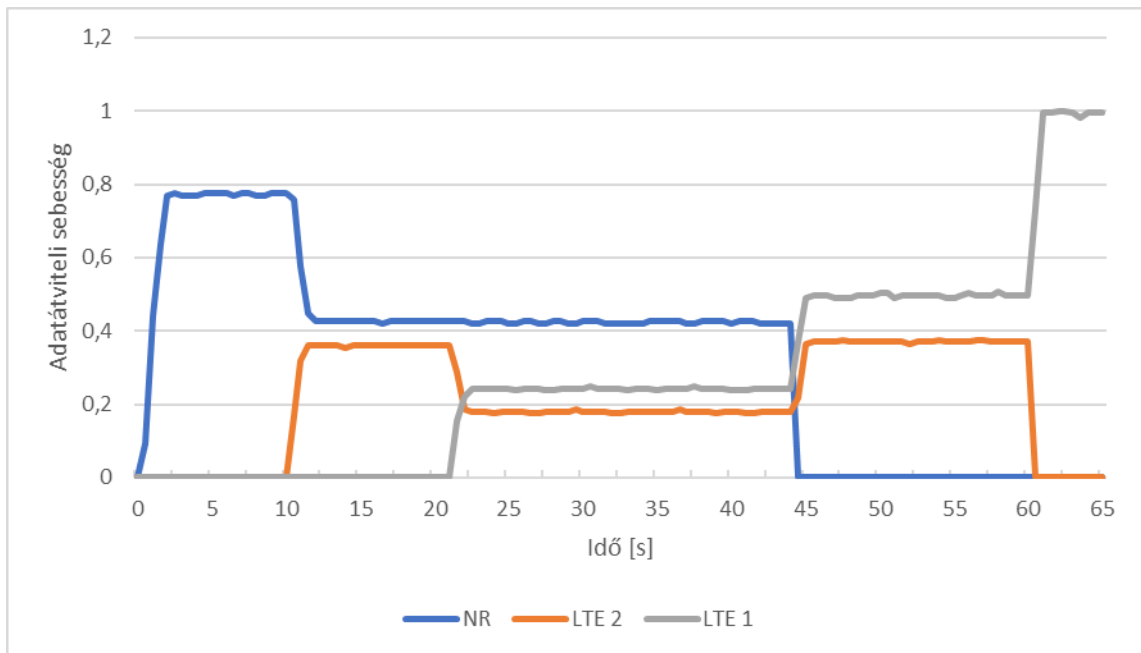
A következő összeállításban az előzőekben használt NR terminál mellé két egyforma képességű LTE terminált helyeztem a cellába, és az előző mérésekkel megegyező módon, az egyes terminálokkal párhuzamosan, full buffer TCP letöltést indítottam kezdeményeztem, és az egyes terminálok adatátviteli sebességét

másodperces időközökben mértem. Az mért értékeket ábrázoltam az idő függvényében másodperces lépésközzel.



5.9. ábra: NR és két egyforma LTE terminál a datátviteli sebessége

Az 5.9. ábrán késsel ismét az NR terminál, szürkével és narancssárgával pedig a két egyforma LTE terminál adatátviteli sebességének ábrázolása látható. Megfigyelhető, hogy ebben az esetben az NR terminál kapta az erőforrás blokkok felét, míg a két LTE terminál kapta a másik felét, így azoknak egyenként fele annyi RB jutott, mint az NR terminálnak. Ez az LTE terminálok külön vezérlésével még látványosabbá válik. Ha egy full buffer, DL irányú NR és LTE adatforgalom mellett még egy LTE terminállal indítunk ugyancsak full buffer, DL irányú adatforgalmat, az az NR terminál számára kiosztott erőforrásblokkok számát, így az adatátviteli sebességét nem befolyásolja. Az 5.10. ábrán látható a különböző terminálok adatátviteli sebessége az idő függvényében, 0.5 másodperces felosztással.

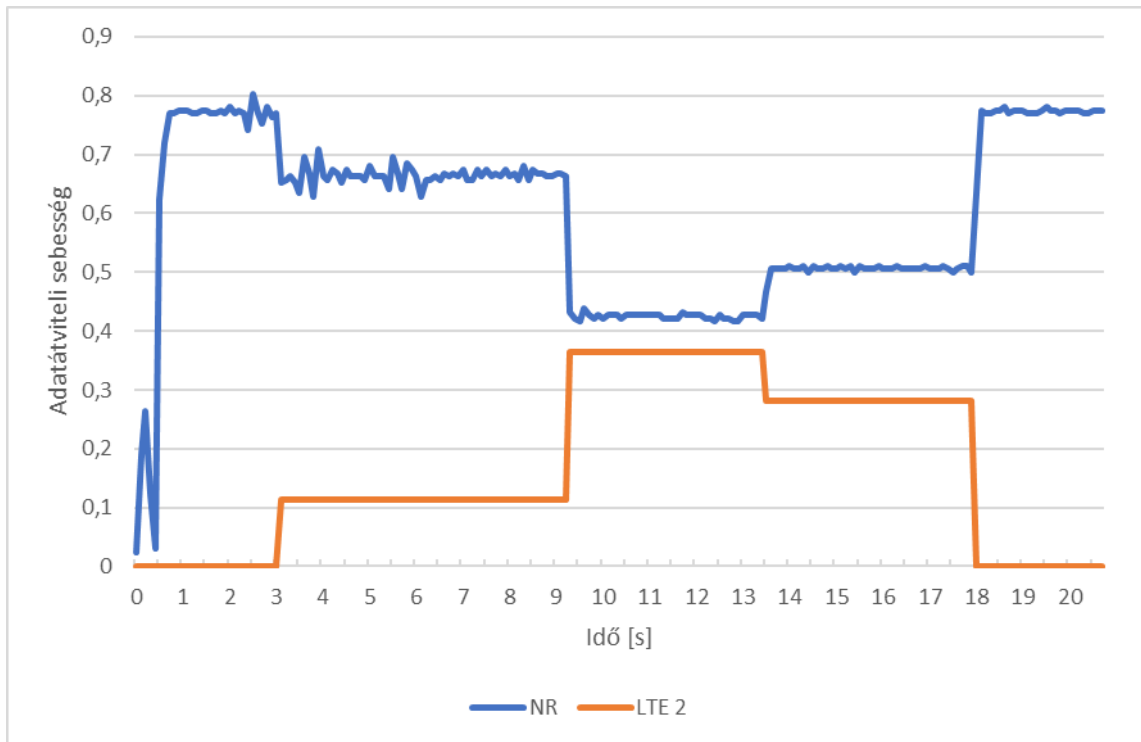


5.10. ábra: NR és LTE terminálok adatátviteli sebessége

Az 5.9. és 5.10. ábra alapján megfigyelhető, hogy az erőforráskiosztás során van egy 50%-os korlát az LTE-re kiosztható erőforrások tekintetében. Ez persze csak abban az esetben igaz, ha NR adatforgalom is terheli az adott cellát.

5.4.2 Dinamizmus, ütemezés

A dinamikus spektrum-megosztás ütemezését és dinamikusságát is a már meglévő mérési összeállítással vizsgáltam. Ebben az esetben UDP forgalommal terheltem a cellát, mert így volt megvalósítható a változó terhelés. Ehhez szintén egy NR és egy LTE terminált használtam, melyben az NR terminállal egy full buffer TCP letöltést kezdeményeztem. Ezzel párhuzamosan az LTE terminállal változó nagyságú, DL irányú UDP adatforgalommal terheltem a cellát. Ebben az esetben az NR terminál adatátviteli sebességét 0.1 másodpercenként mértem. Az NR terminál mért értékeit kékkkel, az LTE terminál mért értékeit narancssárgával, az 5.10. ábrán látható grafikonon ábrázoltam az idő függvényében.



5.10. ábra: NR terminál a datátviteli sebessége, változó nagyságú LTE háttérforgalommal

A mérési eredmények ábrázolása jól bemutatja a DSS spektrumkihasználásának hatékonyságát. Amelyik esetben az LTE nem használta fel az összes, számára kiosztható erőforrásblokkot, azok egyből kiosztásra kerültek az NR terminál részére. Viszont ahogy megnövekedett az LTE terminál felé küldött adatmennyiség, a hálózat egyből több erőforrásblokkot allokált az LTE számára, de a full buffer NR adatforgalom miatt soha nem kaphatott az erőforrás blokkok felénél többet.

6 Összegzés és továbbfejlesztési lehetőségek

Munkám fontos része volt, hogy egy olyan tesztkörnyezetet alakítsak ki mellyel egy DSS konfiguráció alapvető tulajdonságait és hatékonyságát lehet megvizsgálni. A különféle mérési módszerek közül az általam kiválasztott és bemutatott módszerrel lehetőség van például a hálózat kulcs paramétereit mérni, több terminálos tesztek végezni, zavaró jelek hatásait vizsgálni egy ilyen új technológiával működő rádiós környezetben.

Ahogy az várható is volt, és a referencia mérések során be is bizonyosodott: hogy a dinamikus spektrum-megosztás hatására az NR terminálok átviteli sebessége nagyobb mértékben csökken, mint az LTE termináloké. Ez következik a már korábban is említett és vizsgált paraméterek miatt, miszerint az 5.3. ábrán látható nagy mennyiségű LTE vezérlőjeleket az NR adatforgalomnak ki kell kerülnie. Viszont ez még most nem olyan nagy ár ezért a technológiáért, mert még csak kevés számú NR felhasználó van, és ha azoknak odaadnának egy külön frekvenciasávot vagy egy fél sávot, akkor a maradék nem tudná kiszolgálni az LTE felhasználókat. A jelenleg használatban lévő mobilkészülékek összetétele alapján úgy gondolom, hogy méréseim eredménye megfelelően alátámasztja a 3.1-es ábrán látható szimulációs eredményeket, melyet az Ericsson adott ki. Ez a technológia jelenleg nagyon fontos a szolgáltatók számára, hiszen így tudják minél gyorsabban és költséghatékonyabban bevezetni az 5. generációs mobilszolgáltatásokat. Az általam végzett mérések és vizsgálatok alapján ez egy jól működő technológia lesz, de szükség lenne egy, az operátor által állítható paraméterre, mellyel a két technológia (NR és LTE) erőforrás arányát tudná állítani.

Fontos megjegyezni, hogy a bemutatott DSS megoldás a dolgozat írásának idején kereskedelmi forgalomba még nem került Magyarországon, és Európában is még csak igen kis számú mobil operátor vezette be. Maga a technológia is számos kérdést vet fel, amiket érdemes megvizsgálni. További vizsgálatot igényel, hogy egy ilyen DSS konfiguráció milyen hatással lenne a szomszédos cellákra, cellahatáron milyen lenne a terminálok viselkedése, vagy hogyan tűrné a zavarokat, és azok hatására változna-e az erőforrás kiosztás stratégiája. Az erre irányuló méréseket a későbbiekben tervezem elvégezni, hogy teljes képet kapjak a dinamikus spektrum-megosztás működéséről és hatásairól.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek, Dr. Varga Pálnak útmutatásaiért és javaslataiért. Hálás vagyok ipari konzulensem, Barta József Gábor és kollégám, Tánczos László szakértői tanácsaiért, melyek nagy segítséget nyújtottak számomra munkám során. Továbbá szeretném megköszönni a Magyar Telekom Nyrt. RAN SSC csapatának és vezetőjének, Zsiborás Attilának, hogy rendelkezésemre bocsátotta a dolgozatban bemutatott feladat elvégzéséhez szükséges eszközöket.

Rövidítésjegyzék

3GPP	3rd generation partnership project
5GC	5G Core
AMF	Access and Mobility Management Function
CA	Carrier Aggregation
CDF	Cumulative Distribution Function
CN	Core Network
CP	Control Plane
CP-OFDM	Cyclic Prefix OFDM
CRS	Cell-specific Reference Signal
CSI-RS	Channel State Information Reference Signal
DL	Downlink
DMRS	Demodulation Reference Signal
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eNB	eNodeB
EN-DC	E-UTRAN NR Dual Connectivity
EPC	Evolved Package Core
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
EVM	Error Vector Magnitude
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
IoT	Internet of Things
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Services
MBSFN	Multimedia Broadcast Single Frequency Network
MIMO	Multiple-Input and Multiple-output
NG-RAN	Next Generation RAN
NR	New Radio
NSA	Non-Standalone
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PBCH	Physical Broadcast Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PRB	Physical Resource Block
PSS	Primary Synchronization Signal
PTP	Precision Time Protocol
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel

QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
SA	Standalone
SCS	Subcarrier Spacing
SNR	Signal-Noise Ratio
SSB	Synchronization Signal Block
SSS	Secondary Synchronization Signal
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TRS	Tracking Reference Signal
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UL	Uplink
UP	User Plane
UPF	User Plane Function
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

Irodalomjegyzék

- [1] Ericsson Mobility Report June 2020, „IoT connections outlook”,
<https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2020>
- [2] 3GPP TS 36.211 V16.3.0 Release 16, „E-UTRA Physical channels and modulation” 3rd Generation Partnership Project 2020-09
- [3] 3GPP TS 22.261 V16.13.0 Release 16, „Service requirements for the 5G system” 3rd Generation Partnership Project 2020-09
- [4] 5G Access Paper „Ericsson Spectrum Sharing”, Ericsson 2019-11
- [5] 3GPP TS 38.221 V16.0.0 Release 16, „NR; Physical channels and modulation” 3rd Generation Partnership Project 2019-12
- [6] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld „5G NR, The next generation wireless access technology”, Chapter 16, Academic Press (2018)
- [7] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld „5G NR, The next generation wireless access technology”, Chapter 17, Academic Press (2018)
- [8] MBSFN Subframe Structure, (2020-10-27)
https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_MBSFN.html
- [9] 3GPP TR 38.822 V15.0.1 Release 15, „NR; User Equipment (UE) feature list” 3rd Generation Partnership Project 2019-07
- [10] 3GPP TS 38.300 V15.11.0 Release 15, „NR; NR and NG-RAN Overall Description”, 3rd Generation Partnership Project 2020-09
- [11] 3GPP TS 38.101-1 V15.0.2 Release 15, „User Equipment (UE) radio transmission and reception”, 3rd Generation Partnership Project (2018-10)
- [12] Frame Structure – Downlink, (2020-10-27)
http://www.sharetechnote.com/html/FrameStructure_DL.html
- [13] 3GPP TR 21.915 V15.0.0 Release 15, „Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items”, 3rd Generation Partnership Project (2019-09)
- [14] 3GPP TR 38.801 V14.0.0 Release 14, „Study on new radio access technology; Radio access architecture and interfaces”, 3rd Generation Partnership Project (2017-03)
- [15] LTE Network Architecture, (2020-10-27)
https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm
- [16] Raad Farhoos Chisab, Prof. (Dr.) C. K. Shukla, „Performance Evaluation of 4G-LTE-SCFDMA Scheme under SUI and ITU Channel Models”, International Journal of Engineering & Technology (2014-02)

- [17] 3GPP TR 21.914 V14.0.0 Release 14, „Summary of Rel-14 Work Items”, 3rd Generation Partnership Project (2018-05)
- [18] TEMS Investigation, (2020-10-27)
<https://www.infovista.com/tems/investigation>
- [19] IPerf3, (2020-10-27), <https://iperf.fr/>
- [20] Rohde & Schwarz signal and spectrum analyzer, (2020-10-27)
https://www.rohde-schwarz.com/us/product/fsva3000-productstartpage_63493-601504.html