



**SZÉCHENYI
EGYETEM**
UNIVERSITY OF GYŐR



TDK DOLGOZAT

Kapcsolatstabilitás MIMO rendszerekben

Végh András

Villamosmérnök BSc

Infokommunikáció

5. félév

Konzulens:

Merkli Kornél

2024

Tartalomjegyzék

1	BEVEZETÉS	3
2	ELMÉLETI HÁTTÉR.....	4
2.1	LTE CELLÁK FELÉPÍTÉSE ÉS ELRENDEZÉSE	4
2.2	SÁVSZÉLESSÉG – ERŐFORRÁS-BLOKK KIOSZTÁS	5
2.3	MIMO (MULTIPLE INPUT, MULTIPLE OUTPUT)	6
3	GYAKORLATI VIZSGÁLATOK	8
3.1	FELHASZNÁLT MÉRŐ- ÉS SEGÉDESZKÖZÖK	8
3.2	TESZT KÖRNYEZET	8
3.3	MÉRÉSI ÖSSZEÁLLÍTÁS.....	9
3.4	MÉRÉSI MÓDSZER.....	11
3.5	A CMW500 KONFIGURÁCIÓJA	14
3.5.1	<i>Basic Signaling</i>	15
3.5.2	<i>MIMO konfiguráció</i>	16
3.6	TÉR MULTIPLEXÁLÁS (SPATIAL MULTIPLEXING) TESZT.....	17
3.6.1	<i>External Attenuation</i>	18
3.6.2	<i>Inter/Intra RAT Handover</i>	18
4	A VIZSGÁLAT EREDMÉNYE	20
4.1	BAND 1 (2100 MHz) 2x2 MIMO (CELLA SÁVSZÉLESSÉG: 10 MHz)	20
4.2	BAND 1 (2100 MHz) SISO (CELLA SÁVSZÉLESSÉG: 10 MHz)	21
4.3	BAND 20 2x2 MIMO (CELLA SÁVSZÉLESSÉG: 5 MHz).....	23
5	KONKLÚZIÓ ÉS JÖVŐBELI TERVEK	25
6	IRODALOMJEGYZÉK.....	26

1 BEVEZETÉS

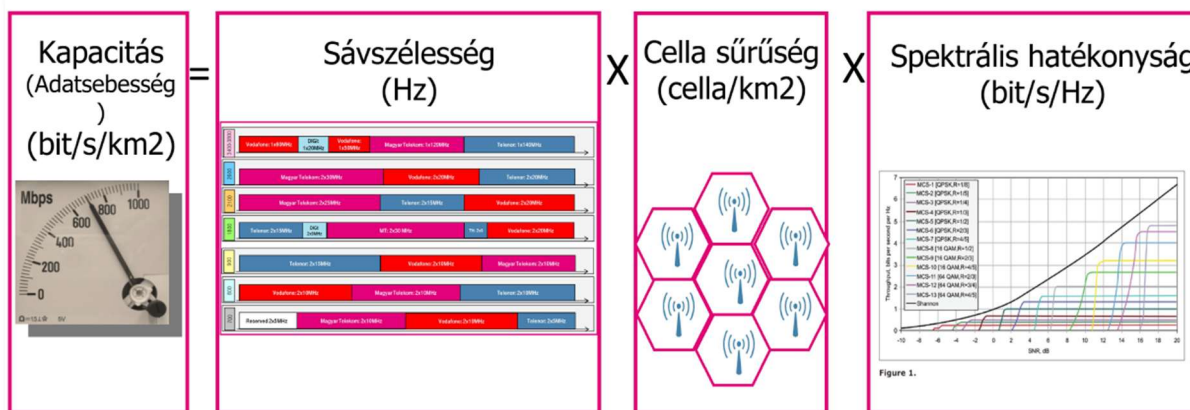
A mobilszolgáltatások csatornáinak cella szélein tapasztalható gyengébb minősége a celluláris rendszerek rádiós paramétereinek romlásából fakad. A hagyományos celluláris architektúra esetében a bázisállomás egy vagy több antennája a cella központjában helyezkedik el. Mivel a rádiójel vételi teljesítménye exponenciálisan csökken a terjedési távolsággal, a cellahatáron lévő felhasználói eszközökhöz (UE) a bázisállomás jele jelentősen csillapítva érkezik meg, a spektrális hatékonyság a cellahatáron akár 1 (bit/s)/Hz alá is eshet. Ez a probléma a cellahatár területén, különösen a 2 GHz-nél magasabb frekvenciatartomány használata esetén számottevő; a magasabb frekvenciatartományokban (a hullámhossz csökkenésével) egyre nagyobb jelútszillapítással kell számolni.[1-2]

Az utóbbi években, a MIMO (Multiple Input, Multiple Output) technológiák térnyerésével új lehetőségek nyíltak meg ennek a problémának a megoldására. Egy MIMO rendszer antennaelemeit négy különböző működési módban használhatjuk: ezek a nyálábformálás (beamforming), diverziti, interferencia-elnyomás (interference suppression) és tér multiplexálás (spatial multiplexing)[3]. Míg az első három a rádiós paraméterek javításával növeli a spektrális hatékonyságot, addig a tér multiplexálás ugyanezt különböző kódolás használatával éri el, adott rádióminőség mellett.[4] A cella szélén azonban a tér multiplexálás használata mellett, a jel-zaj viszony (SNR) jelentős csökkenéséből adódóan nehezebb a párhuzamos adatfolyamok szétválasztása és dekódolása. Ilyen esetekben a MIMO rendszerek gyakran tér multiplexálásról tér diverzitire állnak át a minőség fenntartása érdekében. Azonban, a NemoHandy mérőtelefonnal folytatott mérések alkalmával szerzett további tapasztalat, hogy az utóbbi lépést is elhagyva SISO (Single Input, Single Output) módban folyik tovább a kommunikáció. Amennyiben a lefedettség tovább csökken, a rendszer egy alacsonyabb frekvencián működő csatornára vált át, ami nagyobb lefedettséget, ámbar kisebb kapacitást nyújt, ezesetben viszont már csak SISO módban folytatódik a kommunikáció.

A méréseim célja annak vizsgálata volt, hogy a cella szélén, megegyező erőforrás-blokkszám mellett, egy alacsony frekvenciasávon 5 MHz-es sáv szélességen üzemelő 2x2 MIMO megoldással jobb adatátviteli sebesség érhető-e el (tér multiplexálást használva), mint egy közép frekvenciasávon üzemelő, 10 MHz-es sáv szélességű mobilsávon, ami a magasabb frekvenciatartomány miatt nagyobb mértékű szabadtéri csillapítást szenved el. Bár a tér multiplexálás használatának elsődleges célja a spektrális hatékonyság és az adatsebesség növelése, arra voltam kíváncsi, felhasználható-e arra, hogy egy mobilkommunikációs összeköttetés robosztusabbá válhasson, vagyis, hogy az azonos sebességű csatorna a bázisállomástól nagyobb távolságban is fenntartható legyen.

2 ELMÉLETI HÁTTÉR

Az LTE (Long Term Evolution) technológia a mobilhálózatok negyedik generációjaként jelent meg, célja pedig, hogy hosszú távon is biztosítsa a versenyképességet a gyorsan fejlődő távközlési környezetben[4]. Az LTE alapvető jellemzői közé tartozik a nagy adatátviteli sebesség (Downlink: 100 Mbit/s, Uplink: 50 Mbit/s) és az alacsony késleltetés (< 10 ms). A rendszer egyik fő előnye továbbá a rugalmas sáv szélesség, amely 1.4 MHz-től egészen 20 MHz-ig terjedhet, így különböző hálózati környezetekben is jól alkalmazkodik a különböző igényekhez. A hálózat struktúrája egyszerűbb, mint a korábbi generációké, mivel kizárólag az IP-alapú adatforgalmat támogatja. A többantennás MIMO (Multiple Input Multiple Output) technológia révén pedig lehetővé válik a tér multiplexelés, ami javítja a hálózati kapacitást és a sebességet. (Az itt közölt elméleti összefoglaló Kiss Tamás – Mobil Távközlés: LTE előadásán alapul)



1. ábra: A kapacitás meghatározására szolgáló formula [4]

A 4G/5G hálózatok kapacitása a sáv szélesség, a cellasűrűség és a spektrális hatékonyság növelésével javítható, ahogy ezt a fenti formula is szemlélteti. Így a kapacitás növelése érdekében ezeken a paramétereken kell javítani. [4]

2.1 LTE cellák felépítése és elrendezése

Az LTE hálózatokban a lefedendő területet kis egységekre, úgynevezett cellákra bontják, melyek középpontjában a bázisállomás (4G hálózatokban eNodeB) áll. A cella sugarát, vagyis a besugárzott terület nagyságát a bázisállomás teljesítményét kívül az alkalmazott frekvenciasáv, a terület beépítettsége és domborzati viszonyai is befolyásolják. A besugárzott terület az a terület, melyen belül a $C/(N+I)$ (Carrier to noise + interference), vagy $S/(N+I)$ (Signal to noise + interference) egy adott küszöbértéknél meghatározott valószínűséggel

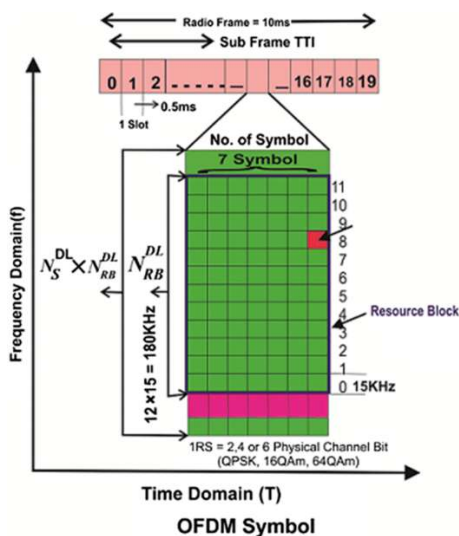
nagyobb. Napjainkban jellemzővé vált, hogy inkább azt a helyet definiálják cellahatárként, ahol az adatsebesség statisztikailag meghalad egy adott küszöbértéket. (Pl.: Downlink: 2 Mbit/s, Uplink: 0.5 Mbit/s)

A bázisállomások által lefedett terület általában nem szabályos kör alakú, illetve egy terület lefedésére kör alakú cellákat használni hálózattervezési és modellezési szempontból sem a legmegfelelőbb. Így, a hasonló szabálytalan területekkel való számolást megkönnyítve, illetve a jobb szemléltethetőség érdekében, hatszög (méhsejt) alakú cellákkal fedik le az ellátandó területet. [4]

A mobil hálózatok kiépítése során az elsődleges cél a folytonos lefedettség és mobilitás biztosítása a lakott területeken és a közlekedési útvonalak mentén. A második legfontosabb szempont a megfelelő kapacitás biztosítása. A hálózatminőség kérdése csak ezek biztosítása után lényeges, a felhasználói visszajelzéseket alapul véve egy gyengébb minőségű, de sikeresen felépülő és működő hívás sokkal jobb annál, mintha egyáltalán nem volna kapcsolat.[4]

2.2 Sáv szélesség – erőforrás-blokk kiosztás

Az LTE hálózatokban az adatátvitel alapegysége az erőforrásblokk (RB: Resource Block), amelyet az LTE keretstruktúrában a rádiós források kiosztására használnak. Egy RB 180 kHz szélességű sáv szélességet fed le 0,5 ms időtartam alatt, és 12 egymás melletti alvivőből áll, amelyek mindegyike 15 kHz (ez az ún. subcarrier spacing) sáv szélességű (ezeket erőforrás elemeknek (RE: Resource Element) nevezzük).[22] Ez a frekvencia- és időtartományban definiált struktúra lehetővé teszi az LTE technológia számára, hogy rugalmasan kezelje a sáv szélességet, és a körülményeknek megfelelően a lehető legnagyobb adatátviteli sebességeket nyújthassa a felhasználóknak.



2. ábra: Az LTE technológia keretstruktúrája és az erőforrásblokkok elhelyezkedése [23]

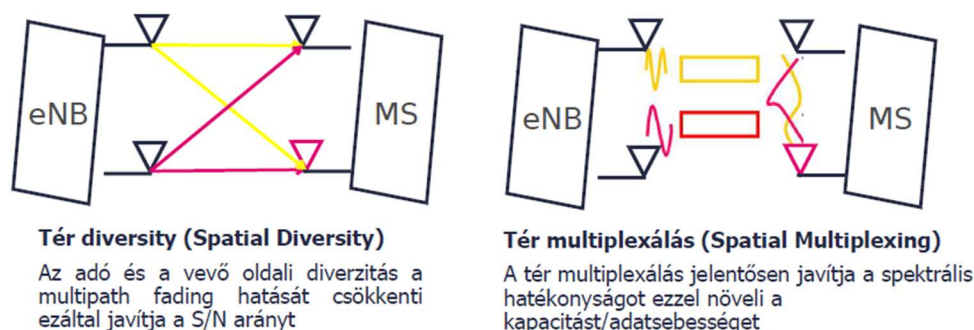
Az erőforrásblokkok kiosztása dinamikusan történik, és az LTE bázisállomás (eNodeB) határozza meg, hogy adott időpontban mely felhasználó, melyik Resource Block-ot használhatja. Ez a dinamikus kiosztás növeli a spektrumhatékonyságot, mivel a rendszer a felhasználók aktuális igényeihez és a csatornaállapotokhoz igazítja az erőforrásokat [23].

Transmission Mode/System Bandwidth	No of Useable Resource Block	SISO	Transmit	MIMO 2x2	All Transmission Mode	
		Downlink Peak (Mbps)	Downlink Peak (Mbps)	Downlink Peak (Mbps)	Uplink Peak (Mbps) 16 QAM	Uplink Peak (Mbps) 64 QAM
1.4 MHz	6	4.4	4.4	8.8	3	4.4
3 MHz	15	11.1	11.1	22.1	7.5	11.1
5 MHz	25	18.3	18.3	36.7	12.6	18.3
10 MHz	50	36.7	36.7	75	25.5	36.7
15 MHz	75	55.1	55.1	110	37.9	55.1
20 MHz	100	75	75	150	51	75

3. ábra: Az alkalmazott sávszélesség, erőforrásblokk-szám, és a modulációs séma ismeretében meghatározhatóak a maximálisan elérhető adatsebességek, különböző adásmódok ("Transmission mode") esetén [24]

2.3 MIMO (Multiple Input, Multiple Output)

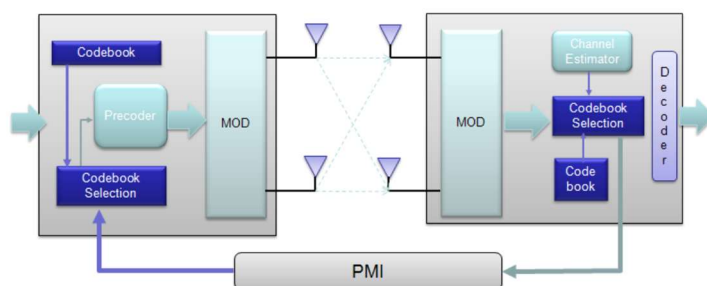
Mint fentebb említettem, a 4G/5G hálózatok kapacitása a sávszélesség, a cellasűrűség és a spektrális hatékonyság növelésével javítható, ez azonban számos nehézségbe ütközik. A rendelkezésre álló spektrumkészlet véges, ennek bővítését az adott operátor lehetőségei korlátozzák, a frekvencia újrafelhasználás pedig (tekintve, hogy a 4G hálózatokban minden bázisállomás ugyanazt a frekvenciasávot használja) elérte a hatékonysági csúcsát. A cellasűrűség növelése szintén határokba ütközik az interferencia és a költségek miatt. Mindez korlátozza a további kapacitásnövelést hagyományos eszközökkel, így ennek megoldásaként a MIMO technológia javítja a spektrális hatékonyságot és hozzájárul a hálózati kapacitás növeléséhez. [4]



4. ábra: A két alapvető MIMO technológia [4]

A MIMO rendszerek az adatokat több adóantennán keresztül, különböző nyalábokban továbbítják a vevőig. A MIMO technológiák közül kiemelném az LTE hálózatokban leggyakrabban alkalmazott tér diverzitit és tér multiplexálást. Előbbinél az adó és vevő oldali diverzitás, vagyis több adó – és vevőantenna alkalmazása elsősorban a többutas terjedés hatását hivatott csökkenteni: ebben az összeállításban, ha az egyik jelúton a fading hatása miatt le is csökken a jelszint, ez az esemény valószínűsíthetően, a többi jelúton nem áll fent. Utóbbi esetén pedig az egyes adatfolyamokat eltérően kódolják, majd modulálás után az egyes adóágakon (az ún. layer-eken) ugyanazon a frekvencián, kerülnek kisugárzásra. Tekintve, hogy az eredeti adatfolyamot két (vagy több) részre bontjuk, egyidejűleg az eredetinel alacsonyabb bitsebességű adatfolyamok kerülnek továbbításra, ami azt eredményezi, hogy az átvitelhez kisebb jel-zaj viszony (SNR) is elegendő. [4]

A tér multiplexáláshoz szükséges előkódolás során alapvetően kétféleképpen kerülhet kiválasztásra az előkódoláshoz alkalmazott mátrix. Zárt hurkú (CL – Closed Loop) tér multiplexálás esetén az UE felbecsüli a rádiócsatornát és meghatározza a legoptimálisabb csatornamodellt és egy PMI érték küldésével javasol egy mátrix struktúrát a bázisállomásnak. Ezzel szemben nyílt hurkú esetben (OL – Open Loop) az eNodeB választ mátrixot az UE-től kapott visszajelzés nélkül.



5. ábra: A tér multiplexálás megvalósítása 2x2 MIMO esetén, zárt hurkú (CL) esetben

A 3GPP szabványokban előre kidolgoztak előkódoló mátrixokat, melyek mind az adó, mind a vevő számára ismertek, így a vevőnek csak a megfelelő mátrix indexét (PMI: Precoding Matrix Indicator) kell elküldenie a bázisállomásnak. A PMI egyszerűen azt mutatja meg az eNodeB-nek, hogy melyik mátrixot használja, vagyis hogyan kódolja elő az elküldött szimbólumokat, hogy az UE könnyen dekódolhassa azokat. Az előkódolás (precoding) annyit jelent, hogy az eredeti QAM szimbólumokat megszorozzuk a szabványban meghatározott precoding mátrixszal. [24,26]

Az UE ezen felül egy ún. Rangsor jelzőt (Rank Indicator (RI)) is továbbít a bázisállomás felé, amely azt jelzi, hogy hány független térbeli adatfolyamot képes a bázisállomás az UE-hez továbbítani – vagyis mennyire valószínűsíthető meg az egyes MIMO layer-ek függetlensége. [24,26]

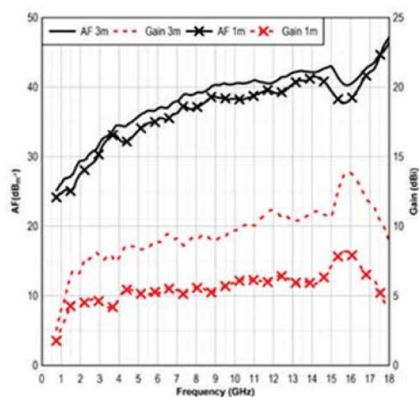
3 GYAKORLATI VIZSGÁLATOK

3.1 Felhasznált mérő- és segédeszközök

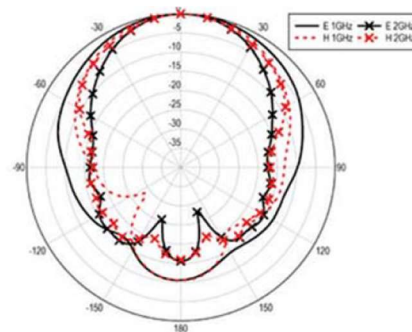
1. táblázat: Felhasznált eszközök

Megnevezés	Típus	Gyártó
NN30-4 RF kábel	NN30	Rosenberger Micro Coax
NN20-2 RF kábel	NN20	Rosenberger Micro Coax
Mérőtelefon	Galaxy S21 + 5G	Samsung
Horn antenna (2 db)	Model 3115	ETS-Lindgren
Bázisállomás Szimulátor	CMW500	Rohde & Schwarz
Bent: NN30-7 és 2	NN30	Rosenberger Micro Coax

3115 Double-Ridged
Guide Antenna
AF and Gain



3115 Double-Ridged
Guide Antenna
Measured Patterns
E and H Plane
1 GHz and 2 GHz



6. ábra: A Horn antennák nyereség-függvénye és iránykarakterisztikája [18]

3.2 Teszt környezet

A tesztkörnyezet kiválasztásánál a Rádiófrekvenciás Laboratórium (L3-20) árnyékolt mérőhelyisége bizonyult ideális választásnak. Az erre a célra kialakított csatlakozók lehetővé tették a jel zavartalan ki- és bevezetését a kamrából a bázisállomás szimulátor és az antennák felé, ezáltal megkönnyítve a mérések kivitelezését. Ez a környezet azért is kedvező volt, mert biztosította, hogy a mérőtelefon által rögzített eredményeket ne befolyásolják külső hálózatok, illetve így a saját méréseimmel sem okoztam interferenciát más szolgáltatók rendszereiben a kibocsátott adóteljesítménnyel. Továbbá, a sugárzott mérésekhez szükséges magas adóteljesítmény élettani szempontból is indokoltá tette az elkülönített mérőhelyiség használatát.

3.3 Mérési összeállítás

A mérési összeállítás meghatározásánál törekedtem arra, hogy minimalizáljam a mérés során tapasztalható zavaró tényezőket. A Horn antennák irányított jellegéből adódóan, illetve a köztük és az UE közötti kis távolság miatt az interferencia fading hatása elhanyagolhatónak tekinthető, a jelút csillapítását a szabadtéri csillapítás és a kábelek beiktatott csillapítása adja.

A MIMO technológiánál alapvető feltétel az antennák közti térbeli elkülönítés megvalósítása (8-10 lambda távolság ajánlott) [4]. A 145 cm-es elkülönítéssel ez Band 1 esetén teljesül is, Band 20-on azonban a nagyobb hullámhossz miatt (37,5 cm) 3,75 m-es elkülönítésre lenne szükség, ami már az adott mérőhelyiségben kivitelezhetetlen lett volna. Azonban méréseim során megállapítottam, hogy az alkalmazott Horn antennák erősen irányítottak, így az előírt 10 lambda távolság alatt is képesek biztosítani a tér multiplexálás megfelelő működéséhez szükséges szintű jelút-elválasztást. Az adott mérési összeállítást figyelembe véve tehát (árnyékolt mérőhelyiségben, tulajdonképpen zajmentes környezetben, erősen irányított antennákkal elvégezve a mérést) a 800 MHz-es frekvenciatartomány esetén sem változtattam a Bázisállomás antennáinak távolságán.

A mérések során figyelembe vettem azt is, hogy a méréshez használt Horn antennák a 750 MHz – 18 GHz-es tartományban működnek, a 800 MHz pedig nagyon közel van az antennák adatlap szerinti minimális frekvenciájához. Így a teszteléshez használt 800 MHz-es frekvenciasávon az antennák közel feleakkora nyereséggel bírnak (-3 dB), mint 2100 MHz-en. Tekintve, hogy a mérés során számolnom kellett a szabadtéri csillapítással, utánanéztem, hogy az antennák és az UE távolsága (1,67 m) elég-e ahhoz, hogy a vevőbe érkező jel már síkhullámnak tekinthető legyen. Kihasználva a tényt, hogy minden antenna nyereségének és hatásos felületének viszonya állandó $\left(\frac{G}{A} = \frac{4\pi}{\lambda^2}\right)$, kiszámoltam az antennák hatásos felületeit, majd az ún. Rayleigh-távolságot, amely a közeltér és a távotér határát adja meg[5].

($G_{800_MHz} = 1,8$ dB; $G_{2100_MHz} = 4,8$ dB)

A hatásos felület a 2100 MHz-en ($\lambda = 14,29$ cm): $A = 0,0195$ m²

A hatásos felület a 800 MHz-en ($\lambda = 37,50$ cm): $A = 0,1343$ m²

~~Rayleigh-távolság (SISO):~~

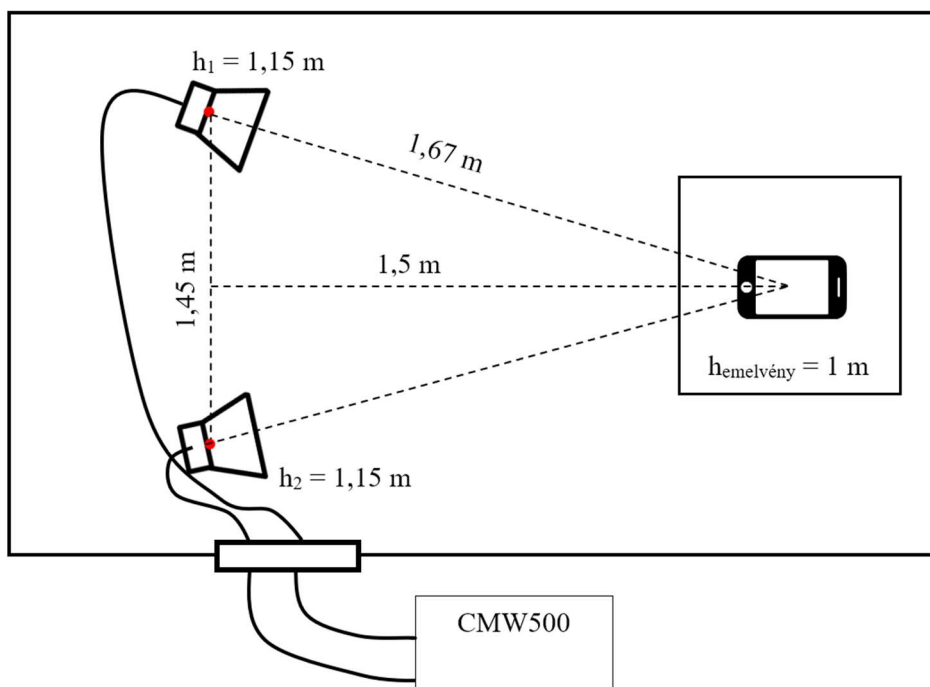
$$d_{SISO} = \frac{2A^2}{\lambda} = 5 \text{ mm}$$

~~Rayleigh-távolság (MIMO):~~

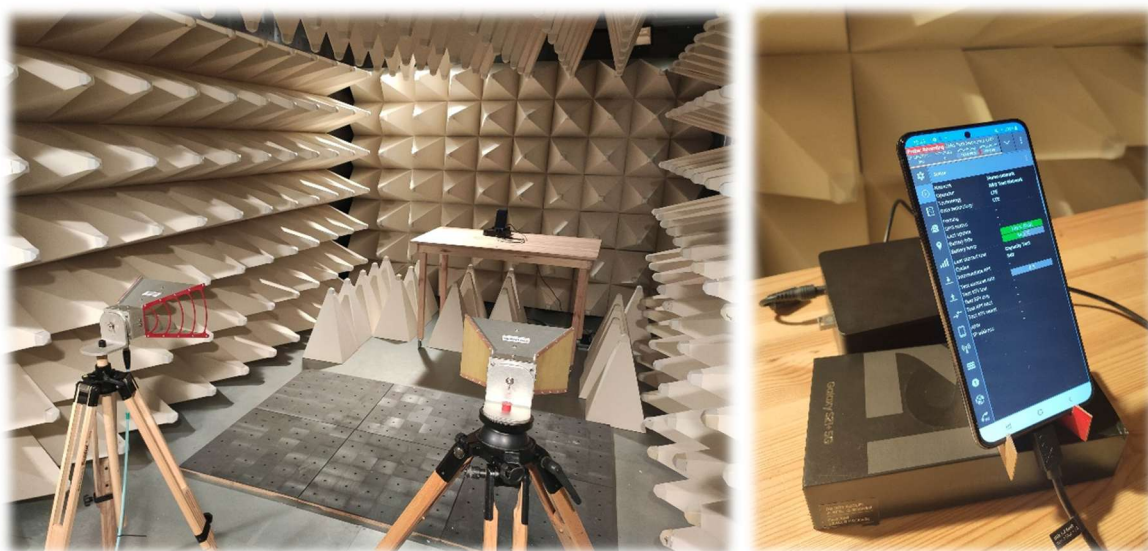
$$d_{MIMO} = \frac{2 \cdot (A_{TX} + A_{RX})^2}{\lambda} = 38,47 \text{ cm}$$

7. ábra: Rayleigh-távolság meghatározása

A kapott eredmények alapján, az adott mérési összeállítás mellett a síkhullámú modell alkalmazása megengedhető, ami jelentősen leegyszerűsítette a szabadtéri csillapítással való számolásokat.



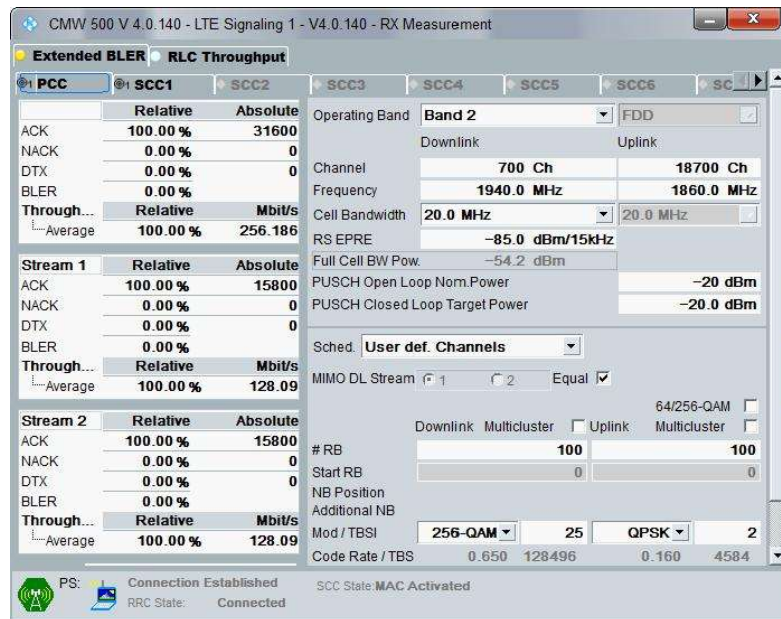
8. ábra: Teszt összeállítás



9. ábra: Mérési összeállítás az árnyékolt mérőhelyiségben.

3.4 Mérési módszer

A mérések előtt mindkét vizsgálandó mobilkommunikációs sávon (Band 1 és Band 20) tesztméréseket végeztem, biztosítandó, hogy a mérési összeállítás megfelelő a kapcsolat stabil felépüléséhez az UE és a Bázisállomás között. Ezt követően Band 1-es sávon (2100 MHz) 2x2 MIMO Signaling-ot indítottam, 10 MHz-es sávszélességű cellát és 16-QAM modulációs sémát beállítva. A kapcsolat stabilitását az RX Measurement ablakban, a BLER mérőszám értékeit figyelve vizsgáltam.



10. ábra: RX Measurement

A BLER¹-t, vagyis a blokkhibaarányt a csatorna állapota mellett a jel-zaj viszony és a modulációs séma is befolyásolja: a magasabb fokszámú modulációs séma ugyanis több adatbitet jelent erőforráselemenként, ami tiszta csatornát és magas jel-zaj viszonyt igényel.

A rossz rádiós körülmények adatkárosodáshoz vezethetnek, amely újraküldéseket eredményezhet az adó és a vevő között. Ezek az újraküldések az adatátvitel fizikai rétegének sebességcsökkenését és a kommunikációs késleltetés növekedését okozzák[6-7].

A mobil eszközök rendszeresen jelentik az átviteli csatorna pillanatnyi állapotát (CQI: Channel Quality Indicator) a bázisállomásnak, ami ez alapján eldönti, hogy milyen modulációt alkalmazzon. Alacsony CQI érték esetén a bázisállomás csökkenti a kódolás hatékonyságát,

¹ A BLER, vagy blokkhibaarány egy, a 3GPP által meghatározott mérőszám, amely a vett hibás blokkok arányát jelenti az összes elküldött blokkok számához viszonyítva. [10]. Fontos, hogy meghatározása a dekódolás és a hibajavítás után történik, így, ha az adatblokk tartalmaz is hibás biteket (BER: Bit Error Rate nem nulla), a BLER még lehet 0 %, ha a hibajavító kódolás képes a bithibák kijavítására.

vagy akár az alkalmazott moduláció szintet is, ezáltal az átvitt hasznos bitek számát is, ami az adatátviteli sebesség csökkenését vonja maga után. [4]



11. ábra: Adaptív moduláció és kódolás [4]

A 10. ábrán az egyes CQI értékekhez tartozó modulációk, a kódolási arány és a kódolási hatékonyság látható. Látható, hogy csökkenő CQI esetén a jel-zaj viszony romlásával csökken a kódolási arány, vagyis az 1024 bitre jutó hasznos bitek száma, míg a hibajavításra használt bitek száma nő. A táblázatban a kódolási hatékonyság szintén erre utal, ez viszont a szimbólumonként továbbított hasznos bitek számát jelenti. [4]

A 3GPP szabvány szerint[8], az UE különböző referenciajelek figyelésével (pl.: SSB (Synchronization Signal Block), CSI-RS (Channel State Information Reference Signal) és a BLER szintje alapján értékeli, milyen mértékben képes dekódolni az átvitelt a PDCCH-csatornán[6]. Ha a BLER értéke 10% felett van, a Downlink irányú rádiókapcsolatot már nem megbízható, ezen a szinten, vagy e felett az UE “out-of-sync” (szinkronizálatlan) állapotot jelez, ami a kapcsolat megszakadásának kockázatával jár. Ezzel szemben 2%-os BLER-nél alacsonyabb érték esetén az UE „in-sync” (szinkronban) állapotot jelez, a kapcsolat stabil.[6][8,9] Ennek megfelelően a mérések során a cellahatárt jelző BLER értéknek 15 %-ot tételeztem fel, ami már jelentős csökkenést jelent a maximális elérhető adatsebességhez képest. Bár a CMW nem képes akkora adóteljesítmény leadására, mint egy valódi bázisállomás, így egy jóval kisebb sugarú cella hozható csak létre vele, az adóteljesítmény fokozatos csökkentésével szimulálhattam az UE távolodását a bázisállomástól. Ezt az RS EPRE paraméter fokozatos csökkentésével tettem meg, melynek változtatásával ronthatunk vagy javíthatunk az eszköz által vett teljesítmény szintjén.

Az EPRE az egyetlen erőforrásblokkra jutó teljesítményszintet jelenti, a műszer kijelzőjén dBm/15 kHz-ben, mivel LTE-ben egy Resource Block (RB) 180 kHz sávszélességű, így 12 alvivőt tartalmaz, 15 kHz-es alvivő távolsággal (Subcarrier Spacing).

Így a Bázisállomás szimulátor által kisugárzott adóteljesítmény a következő képlettel számolható [16,17], ezt a műszer automatikusan kiszámolja és kijelzi a „Full Cell BW Power” sorban. (lásd 15. ábra)

$$P_{RefSens} = RS\ EPRE + 10 \cdot \lg(N_{RE})$$

$$(Number\ of\ RE = 12 \cdot Number\ of\ RB)$$

12. ábra: Kisugárzott adóteljesítmény kiszámítása

Mivel az összegzett csatornateljesítmény (Total Channel Power) a szimbólumon belüli erőforrásblokkok összege, ezért értéke szimbólumonként eltérő lehet, attól függően, hogy milyen csatornakombinációkat tartalmaz. A fent közölt formula olyan szimbólumokra vonatkozik, melyek csak PDSCH szimbólumokat tartalmaznak, így más szimbólumok esetén +/- 1 dB-es eltérések fordulhatnak elő. [11]

LTE Signaling-ot indítva létrehoztam a kapcsolatot a Bázisállomás szimulátor és az UE között 2x2 MIMO technológián, Band 1 (2100 MHz) frekvenciasávon, 10 MHz-es cella sávszélességen, 16-QAM modulációs sémával, és addig csökkentettem az adóteljesítményt, amíg a BLER értéke el nem érte a 15 %-ot.

Ekkor Intra-RAT Handover-t alkalmazva (2x2 MIMO Band 1 → SISO Band 1) SISO módban folytattam tovább a Signaling-ot, majd a cella teljesítményét tovább csökkentettem. Amint elértem a cella határát jelző BLER értéket, újabb Handover-t hajtottam végre, ezúttal 2x2 MIMO-ra, Band 20 (800 MHz) frekvenciasávra.

A szabadtéri csillapítás képletét felhasználva $\left(a_0 = 20 \cdot \lg\left(\frac{\lambda}{4\pi D}\right)\right)$ kiszámoltam, hogy a két különböző Band-en mekkora az antenna és az UE távolságából adódó csillapítás, illetve azt is, hogy a cellaszéli teljesítmény és a kiinduló teljesítményérték különbsége mekkora távolságnak felel meg a CMW-vel kialakított cella esetén.

Majd a két különböző mobilkommunikációs sáv esetén vettem a csillapítások különbségét és ennek megfelelően módosítva az adóteljesítményt, megmértem a SISO Band 1-esa cella határának megfelelő távolságban a BLER értékét 2x2 MIMO és Band 20 esetén.

3.5 A CMW500 konfigurációja

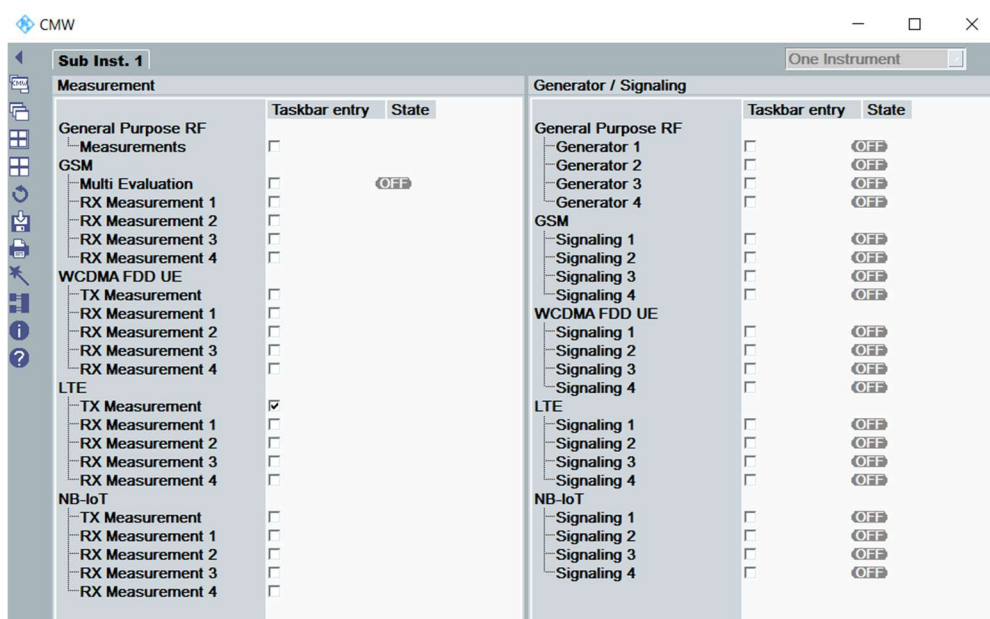
A Rohde & Schwarz CMW500 Wideband Radio Communication Tester egy többfunkciós műszer, ami lehetőséget nyújt a különböző mobiltechnológiákon – például 2G GSM-en, LTE - 4G-n vagy NB-IoT-n – végzett tesztelésre.



13. ábra: Rhode & Schwarz CMW500 bázisállomás szimulátor

A mérési menübe a vezérlő panelen található Setup gombok segítségével juthatunk, ezek közül két fő opciót alkalmaztam a mérések során:

- **SIGNAL GEN:** Adott technológiához tartozó Signaling beállítást tudjuk ezzel kezelni. (PL.: GSM Signaling, LTE Signaling, NB-IoT Signaling stb.)
- **MEASURE:** Itt szintén az elérhető technológiákhoz tudjuk megjeleníteni a TX (Uplink irány: UE → Bázisállomás) és RX (Downlink irány: Bázisállomás → UE) mérési funkciókat.

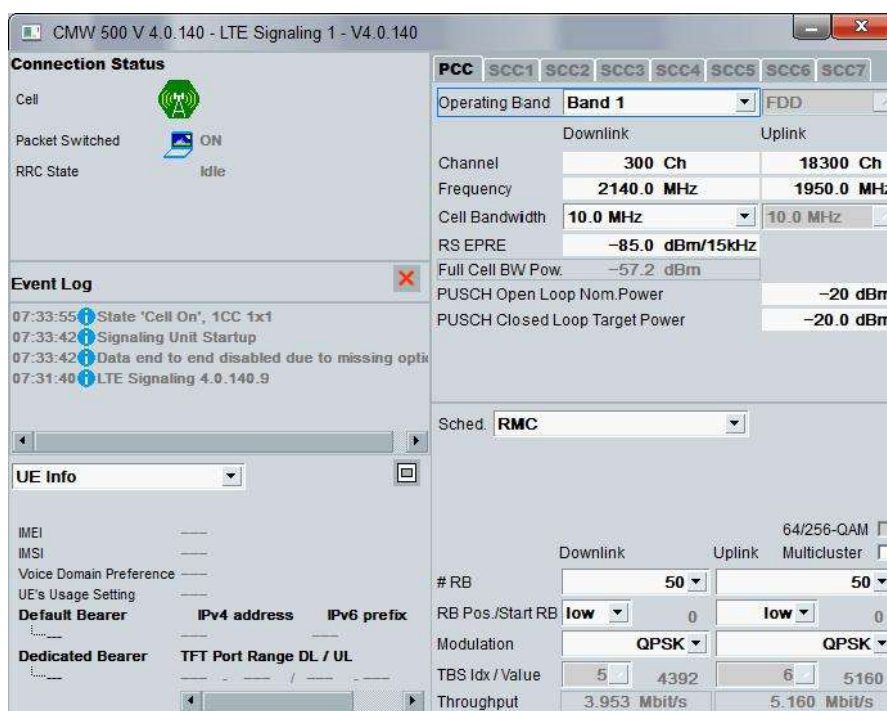


14. ábra: Signaling menü

A képen látható módon egyszerűen bepipáljuk azt a technológiát, amelyikkel a mérést szeretnénk elvégezni. (Enter vagy egér segítségével). Látható, hogy 4 Signaling is indítható, ez annak köszönhető, hogy a műszerben 4 db Baseband Unit (BBU) van, így 4 különböző cellát tudunk a kívánt paramétereknek megfelelően konfigurálni. Ez különösen hasznos Handover (HO) tesztelés esetén, mert a mérést megelőzően a cella paramétereit előre beállítva a teszt során könnyedén megvalósítható a cellák közötti váltás.

3.5.1 Basic Signaling

A SIGNAL GEN felületen az LTE Signaling opciót választva az alábbi felület jelenik meg:



15. ábra: LTE Signaling, bekapcsolt cella és még fel nem csatlakozott UE esetén

Az ablak jobb oldalán beállíthatjuk a cella legalapvetőbb paramétereit, mint például a használt Band (frekvenciasáv), duplex mód (FDD esetén Uplink (UE → eNodeB) illetve Downlink (eNodeB → UE) irányokban használt vivőfrekvenciák), a cella sávszélessége, a használt erőforrásblokkok száma, modulációs séma stb. A műszer a Resource Block-ok száma (így közvetetten a cella sávszélessége), a modulációs séma, illetve a TBS (Transport Block Size) alapján maximálisan elérhető adatátviteli sebességet (Throughput) is számol nekünk.

A bal oldalon a kapcsolat felépülésének lépéseit követhetjük végig az „Events” fülön, illetve annak pillanatnyi állapotát a „Connection Status” fülön.

Az eszköz kezelőfelületén az ON/OFF gomb lenyomásával kapcsolhatjuk be a cellát, és kezdeményezhetjük a Signaling-ot.

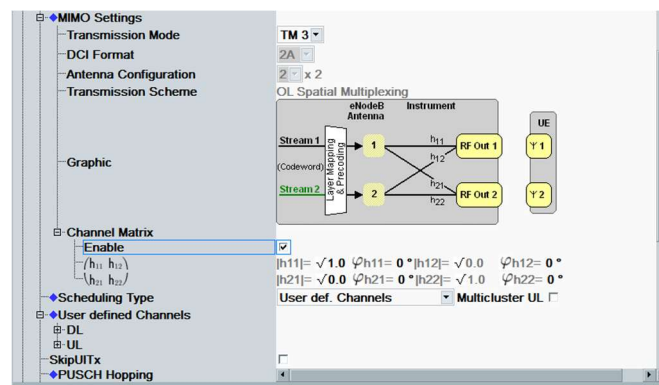
3.5.2 MIMO konfiguráció

A MIMO beállításokhoz az LTE Signaling-on belül, a Config. menüben a megfelelő Scenario kiválasztásával jutunk el, melyek közül néhány jelentését az alábbi táblázat mutatja:

2. táblázat: MIMO Scenario beállítási lehetőségek

Scenario	Jelentése
1CC – 1x1	PCC 1x1 DL (SISO)
1CC – nx2	PCC 2x2 DL (2x2 MIMO)
1CC – nx4	PCC 4x4 DL (4x4 MIMO)

A Signaling „Config” felületen belül, a „Connection” opció alatt látható „MIMO settings” fület lenyitva a választott „Scenario”-tól függően módosíthatjuk a layer-ek számát (vagyis hogy 4x4 vagy 2x2 MIMO-t szeretnénk-e mérni). A „Streamek” száma a választott opciótól független, azonban 4x4 MIMO esetén a layer-ek száma 2-ről 4-re növelendő.



16. ábra: MIMO konfigurációs menü

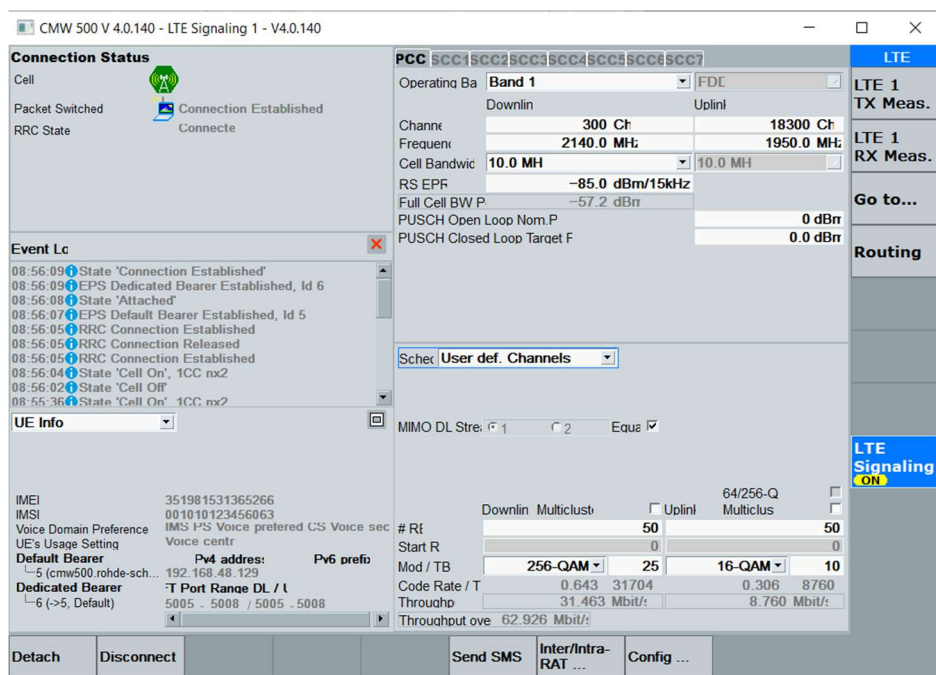
A „Transmission Mode” és a „DCI Format” megfelelő változtatásával a tesztelni kívánt MIMO technológia is kiválasztható, melyet a műszer a „Transmission Scheme” sorban szürke felirattal jelez is. A tesztekhez az „OL Spatial Multiplexing”, vagyis nyílt hurkú tér multiplexálást állítottam be. Ebben az esetben az eNodeB választja ki az előkódoláshoz szükséges mátrixot, az UE-től kapott visszajelzés nélkül.

Ezek mellett további „Transmission Mode”-ok közül is választhatunk, mint például Receive Diversity (SIMO), ahol 1 adó és több vevő antenna használatával javíthatjuk a jel-zaj viszonyt, vagy Beamforming, ahol az eNodeB az adó oldalon az egyes antennákról kisugárzott hullámok amplitúdójának és fázisának hangolásával igyekszik megfelelő lefedettséget biztosítani a cella szélein is.

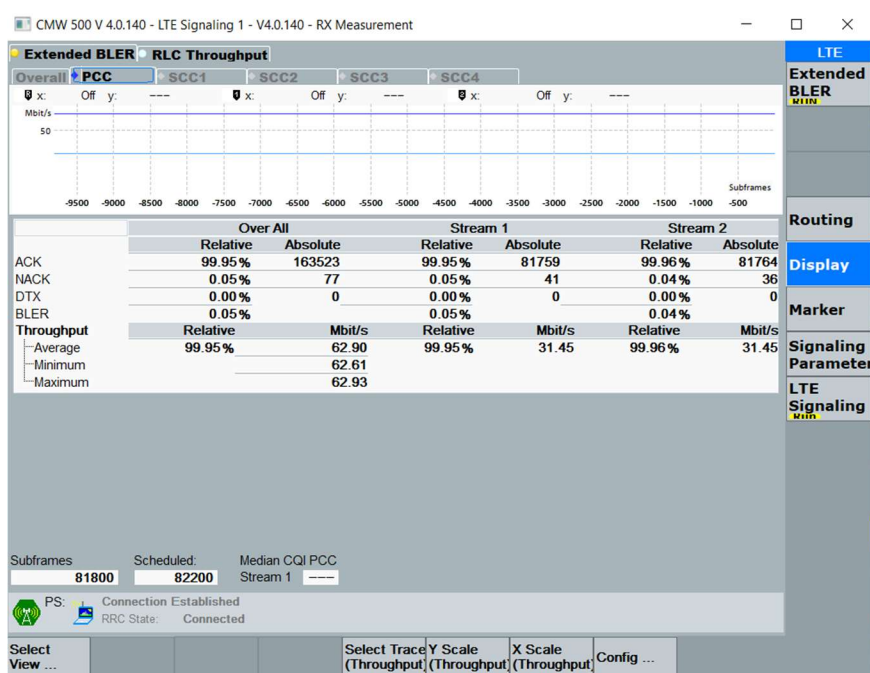
3.6 Tér multiplexálás (Spatial multiplexing) teszt

Scenario: 1CC – nx2, Operating Band: Band 1 (2100 MHz)

A próba mérést a mérési összeállítás részben bemutatott összeállításban végeztem el.



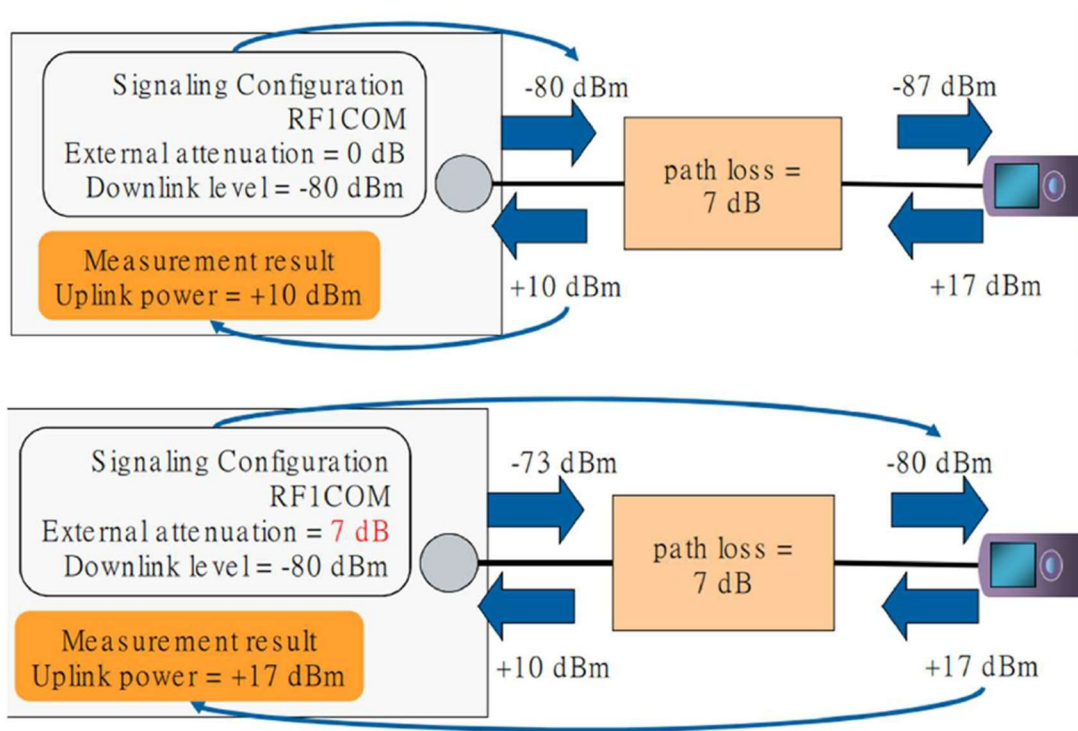
17. ábra: LTE Signaling a kapcsolat felépülését követően. Az Events fülön látható a "Connection Established felirat"



18. ábra: Az RX Measurement menü, és a műszer által mért adatátviteli sebesség és BLER érték

3.6.1 External Attenuation

Ez a lehetőség akkor lehet hasznos, hogy ha az összeállításban egy frekvenciafüggetlen csillapítás van elhelyezve. Ekkor a mezőbe egy csillapítási értéket kell megadni, így az értékkel azonos plusz jelerősítés lép életbe a rendszerben: (negatív érték megadása esetén csillapítás megy végbe a jel kiadása előtt).



19. ábra: Az External Attenuation lehetőség működése [16,17]

A mérések során DL irányban (Bázisállomás → UE) 65 dB-es erősítést alkalmaztam, UL irányban (UE → Bázisállomás) pedig 50 dB-t. A bemenetre érkező jel további erősítése megakadályozta a kapcsolat létrejöttét (a műszer az UL „out of sync.” üzenetet adta vissza).

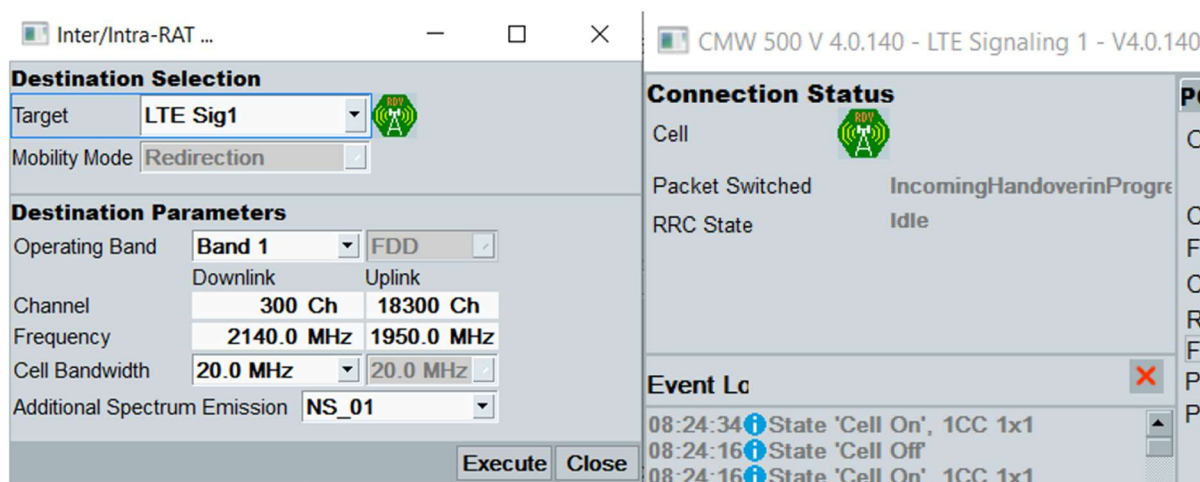
3.6.2 Inter/Intra RAT Handover

A mobil készülék a hívás kezdeményezésekor a legkedvezőbb összeköttetést biztosító bázisállomással lép kapcsolatba. A mobil mozgása során természetesen előbb vagy utóbb annyira eltávolodik a bázisállomásától, hogy már egy másik bázisállomással kedvezőbb összeköttetést tud létesíteni. Ekkor a mobil átkapcsol az új bázisállomásra. Ezt az átkapcsolási folyamatot, hívja a szakirodalom átadásnak, angolul handover-nek vagy handoff-nak (utóbbi inkább az Egyesült Államokban terjedt el). [21]

A RAT (Radio Access Technology) a rádiós technológiára utaló kifejezés, ami a mobil távközlésben a 2G, 3G, 4G stb. technológiákra utal. Az Inter-RAT Handover (HO) két ilyen

technológia közti váltást jelent. Például akkor lehet erre szükség, ha a 4G lefedettség elfogy és a hívást 2G GSM hálózaton tudjuk csak folytatni. Az Intra-RAT HO esetén a technológia ugyanaz marad, csak a frekvenciasáv változik meg, pl.: Band 1 → Band 8. Ez akkor fordulhat elő, ha egy bázisállomástól távolodva a magasabb frekvenciás sáv által nyújtott lefedettség már nem elegendő.

A Signaling elindítása és a kapcsolat sikeres felépülését követően a képernyő alján az „Inter/Intra-RAT” hotkeyt lenyomva a Handover menübe jutunk, ahol a „Destination Parameters” menüben megadhatjuk a cél Band-et. Az „Execute” lehetőséget választva megtörténik a cellaátadás.



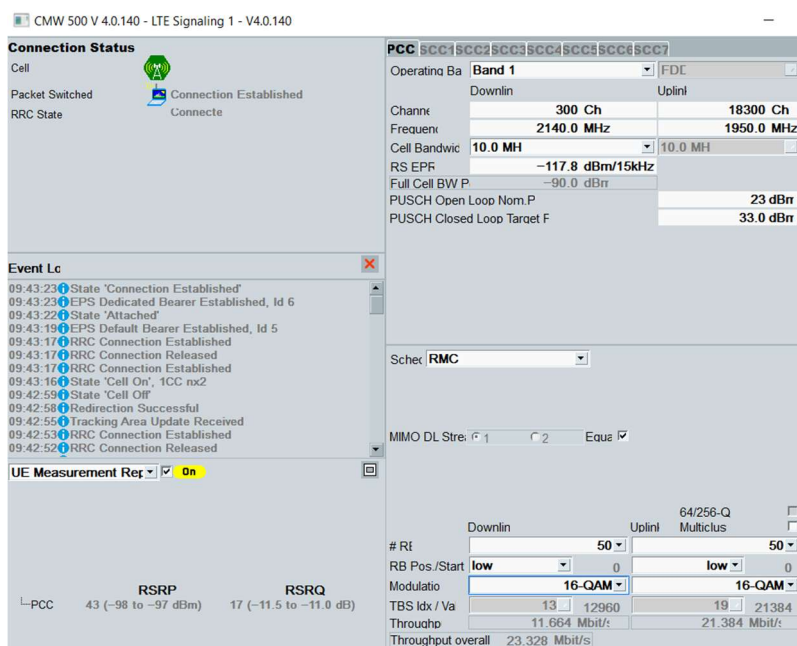
20. ábra: CMW500 Inter/Intra RAT handover menü

A „Handover” elindítását követően a CMW500 készüléki állapotba helyezi a másik cellát, a „Connection Status” fülön az „Incoming Handover Process” felirattal jelzi, hogy a folyamat elindult. Sikeres HO esetén a műszer lekapcsolja az előző Signaling-ot, a kapcsolat pedig megszakadás nélkül fennmarad.

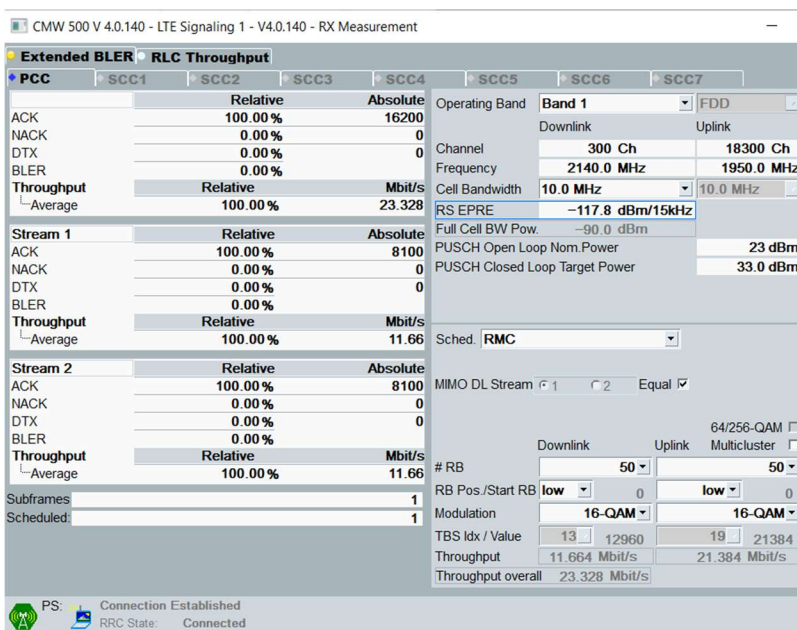
4 A VIZSGÁLAT EREDMÉNYE

4.1 Band 1 (2100 MHz) 2x2 MIMO (Cella sávszélesség: 10 MHz)

A beállítható maximális cellateljesítménnyel felépítettem a kapcsolatot az UE és a Bázisállomás között. A képen látható -90 dBm-es cella teljesítményhez még hozzáadódik az External Attenuation beállításban megadott decibel érték is, így a maximális teljesítmény -25 dBm.

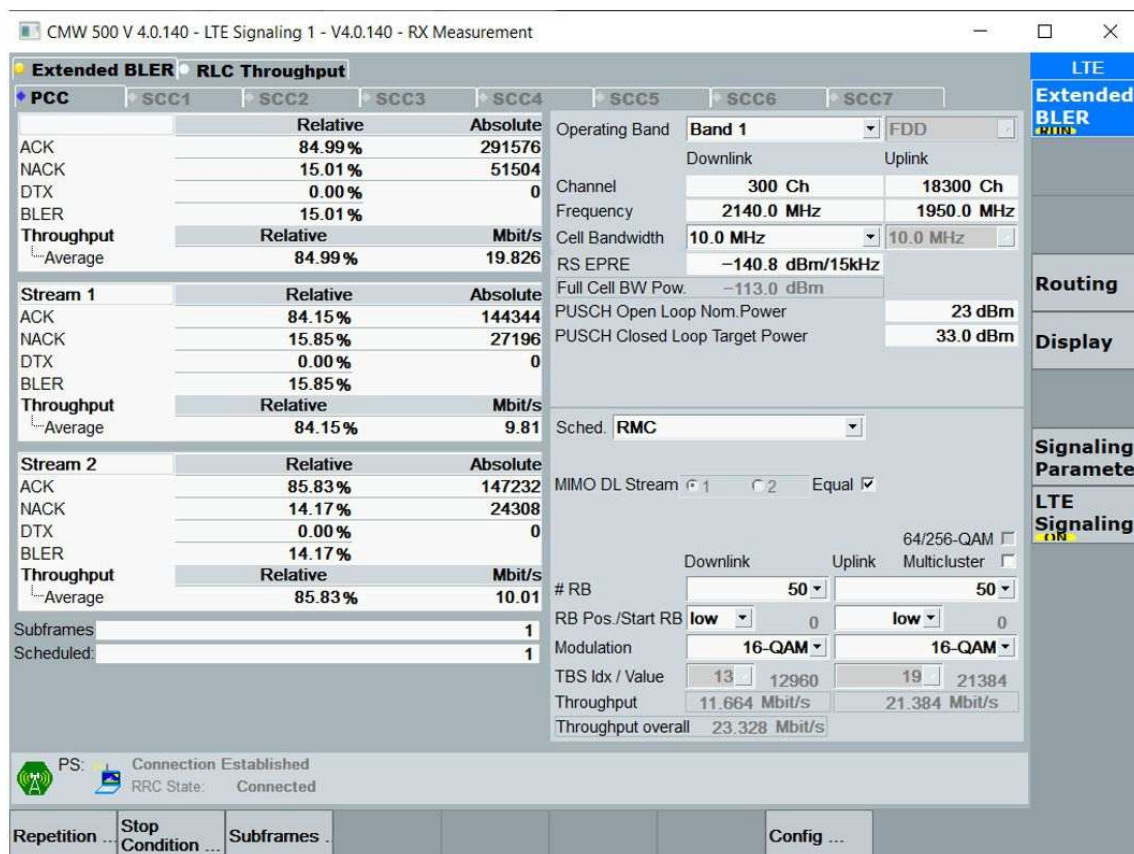


21. ábra: LTE Signaling menü, a kapcsolat sikeresen felépült



22. ábra: Az RX Measurement menü és a Throughput értéke

Amint látható a szimulált távolságban az eNodeB-től megfelelő a lefedettség a Band 1 sávon, ilyen teljesítményszint mellett a NACK üzenetek száma 0%, vagyis nem fordult elő csomagvesztés. Hogy szimuláljam a bázisállomástól való távolodást, a cella teljesítményét fokozatosan csökkentettem addig a pontig, amíg a NACK üzenetek száma, illetve a BLER értéke át nem lépte a 15 %-os határt. E felett olyan mértékű a hibás csomagok száma, hogy a MIMO tér multiplexálás már nem alkalmazható hatékonyan, ez látható a következő ábrán.

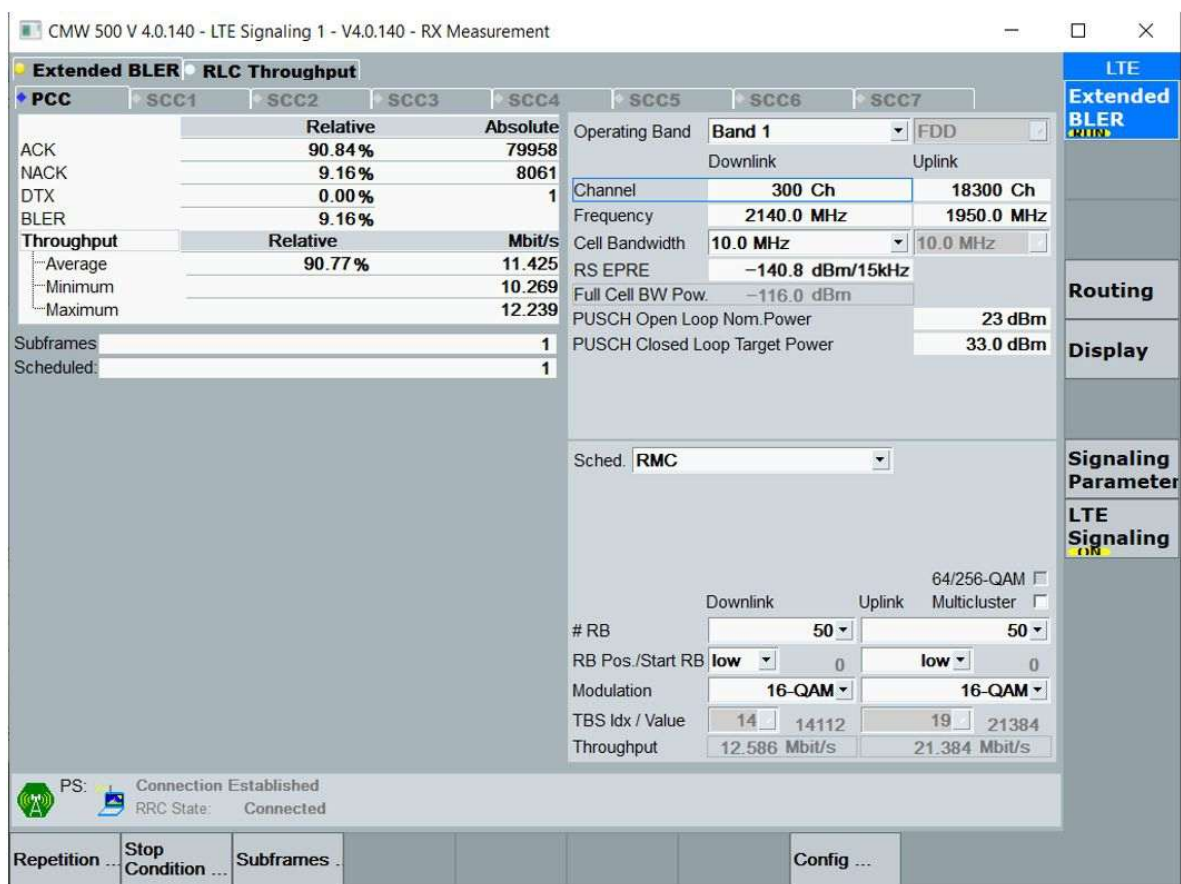


23. ábra: A Band 1 2x2 MIMO cella határán mérhető BLER értékek

4.2 Band 1 (2100 MHz) SISO (Cella sávszélesség: 10 MHz)

A Band 1-es MIMO cella határára érve, az intra-RAT Handover opció alkalmazásával SISO módba váltottam és továbbra is Band 1-es frekvenciasávon folytatódott tovább a kommunikáció. Mivel a SISO üzemmódban működő cella sugara meghaladja a 2x2 MIMO-t használó celláét, további 3 dB-lel kellett csökkentenem a cellateljesítményt, hogy elérjem a Band 1 SISO cella szélét (lásd. következő ábra). Ebben az esetben a cella széléhez a 10 %-os BLER értékhez tartozó teljesítmény tartozik, a teljesítményszint további csökkentése nem volt lehetséges, mert utóbbi a BLER értékének hirtelen megugrását a kapcsolat gyors megszakadását idézte elő.

Bár a teszt során mért 23,3 Mbit/s-os adatátviteli sebességnek a BLER miatti 10%-os csökkenése Mbit-ekben mérve nem számottevő, nagyobb adatsebességeknél jelentős csökkenést jelentene, például 500 Mbit/s esetén 450 Mbit/s-os Throughput-ot jelentene.



24. ábra: A Band 1 SISO cella határán mérhető BLER értékek

Feljegyeztem a cellateljesítmény kiinduló értékét, ahonnan a mérést kezdtem el még 2x2 MIMO-n, illetve a Band 1 SISO cella széléhez tartozó teljesítményszintet is, majd vettem ezek különbségét:

Kiinduló érték: $-90 \text{ dBm} + 65 \text{ dB} = -25 \text{ dBm}$ (Az Ext. Att. beállítás miatt)

Teljesítmény a cella szélén: $-116 \text{ dBm} + 65 \text{ dB} = -51 \text{ dBm}$

Különbség: -26 dB

Itt jött el az a pont a mérés során, amikor az UE-nek a rossz lefedettség miatt (Band 1 sávon) át kell váltania egy alacsony frekvencián üzemelő mobilsávra, esetünkben Band 20 (800 MHz)-ra. Azonban a sávok közti hullámhosszkülönbség miatt a jel eltérő mértékű szabadtéri csillapítást szenved el. Ezt figyelembe kell vennünk a mérési összeállításból adódó szabadtéri csillapítás meghatározásakor (az UE és az antennák távolsága 1.67 m), illetve a cellateljesítmény csökkentése során szimulált távolodás meghatározásakor is.

A szabadtéri csillapítás képletét felhasználva, Band 1 esetén $\lambda = 14.29$ cm-es, míg Band 20 esetén $\lambda = 37.5$ cm-es hullámhosszokkal számolva, meghatároztam, hogy mekkora, az UE és az antennák távolságából, illetve a szimulált távolodásból adódó csillapítás a két frekvenciasávon.

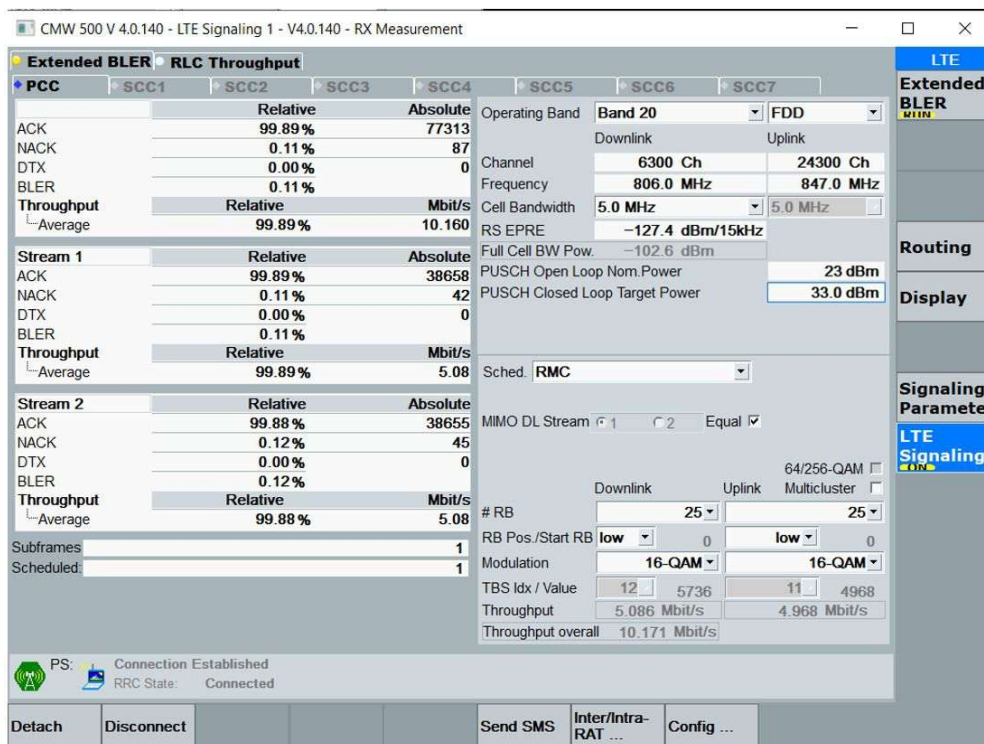
3. táblázat: A szabadtéri csillapítás a két különböző mobilsávon

		Kezdeti szabadtéri csillapítás	A távolodás okozta szabadtéri csillapítás	Összesen
Band 1 (2100 MHz)	Csillapítás	-43 dB	-26 dB	-69 dB
	Távolság	1.67 m	0.2269 m	1.8969 m
Band 20 (800 MHz)	Csillapítás	-34.96 dB	-17,62 dB	-52.58 dB
	Távolság	1.67 m	0.2269 m	1.8969 m

A táblázatból megállapítható, hogy az 800 MHz-es frekvenciasávon 16.42 dB-lel kisebb csillapítás tapasztalható azonos távolságban, 2100 MHz-es sávhoz képest. A Horn antennák antennanyereség függvényéről leolvasható, hogy az antennanyereség 3 dB-lel kisebb 800 MHz-es frekvenciák esetén ($G_{2100_MHz} = 4.8$ dB; $G_{800_MHz} = 1.8$ dB), mint 2100 MHz-en, ezért a bázisállomás szimulátoron -116 dBm + $(16.42 - 3)$ dB = **-102.58 dB**-t kell beállítani, hogy „azonos távolságban” végezhessük el a mérést 800 MHz-en.

4.3 Band 20 2x2 MIMO (Cella sáv szélesség: 5 MHz)

A Band 20-on üzemelő cellában a fent kiszámolt teljesítményt beállítva figyelembe vettem a mobilsávok frekvenciatartományainak különbségéből adódó csillapításkülönbséget, így biztosítottam, hogy az eszköz az előző mérés során kapott 2100 MHz-es cella határán legyen. Újabb Intra-RAT Handover alkalmazásával a Band 20 (800 MHz)-en működő cellára váltottam, majd itt is a BLER értékét, 2x2 MIMO üzemmódban, azonos távolságban:



25. ábra: A Band 20 2x2 MIMO-t használó cella esetén mérhető BLER értékek a Band 1 SISO cella határán

Amint a fenti képen látszik, a SISO üzemmódban működő Band 1-es cella határán Band 20-as mobilsávban 0,11 %-os blokkhibaarányt mértem, ami közel tizede a Band 1 sávon tapasztaltaknak. A mérés szempontjából kulcsfontosságú, hogy a kommunikációhoz felhasznált erőforrásblokkok száma mindkét esetben (Band 1 SISO és Band 20 2x2 MIMO) megegyezik. Az első esetben ezt 10 MHz-es cella sávszélesség beállításával értem el, ami 50 db erőforrásblokkot jelent, míg a második esetben csak 5 MHz-es sávszélességet állítottam be, azonban két MIMO layer-t alkalmazva szintén 50 db erőforrásblokkot használtam fel a Downlink (eNodeB → UE) irányú kommunikációhoz.

A mérés eredménye megmutatta, hogy az alacsony frekvenciájú mobilsávok nagyobb hullámhosszából adódó kisebb szabadtéri csillapítás, és a MIMO technológia kombinációja lehetővé teszi a közép frekvenciasávokon mérhető adatátviteli sebesség biztosítását olyan távolságokban is, ahol a közép frekvenciasávok már nem nyújtanak elégséges lefedettséget. Emellett fontos megjegyezni, hogy míg Band 1-en SISO mód esetén 10 MHz-es sávszélességre volt szükség 23,3 Mbit/s-os maximálisan elérhető adatátviteli sebesség biztosításához, addig a 800 MHz-es sávban, kihasználva a tér multiplexálás előnyeit, ugyanakkora maximális Throughput volt biztosítható feleakkora cella sávszélesség mellett is. Ez elsősorban azért fontos, mert az alacsony frekvenciasávokon (pl.: Band 20 (800 MHz), Band 8 (900 MHz)) csak kb 2*30 MHz (Uplink és Downlink irányokban) kerül felosztásra a szolgáltatók között.

5 KONKLÚZIÓ ÉS JÖVŐBELI TERVEK

A mérés végeztével az előzetesen várt eredményeket kaptam. A 800 MHz-es frekvenciasávban folytatott kommunikáció során a szabadtéri csillapítás ugyanakkora távolság esetén kisebb, mint a 2100 MHz-es mobilkommunikációs sávban, ami nagyobb cellasugarat, és ezáltal jobb lefedettséget is eredményez. A Band 1 SISO és a Band 20 2x2 MIMO tesztek során az erőforrásblokkok száma mindkét esetben azonos volt, így (azonos modulációs séma mellett) a maximálisan elérhető adatátviteli sebesség is megegyezett. Utóbbi esetben azonban, kihasználva az alacsonyabb frekvenciájú mobilsáv nagyobb cellasugarát, 800 MHz-en olyan távolságban, ahol a 2100 MHz-es sáv már nem nyújt elegendő kapacitást a lefedettség csökkenése miatt, MIMO segítségével nagyobb adatátviteli sebességet értem el, mert a kisebb szabadtéri csillapítás miatt a MIMO technológia hatékony működéséhez szükséges jel-zaj viszony nagyobb távolságban is biztosítható.

Ez az eredmény különösen fontos abból a szempontból is, hogy míg például ha SISO használata mellett egy adott adatsebesség biztosításához 20 MHz-es cella sávszélességre van szükség, addig MIMO használata mellett, feleakkora (4x4 MIMO alkalmazása mellett negyedakkora) cella sávszélesség is elegendő, ugyanakkora adatátviteli sebesség biztosításához. Bár a MIMO tér multiplexálás használata esetén a lefedettség kisebb cellasugáron belül biztosítható, mint SISO esetén (az egyes MIMO layer-ek dekódolásához elégséges jel-zaj viszony szükséges), az alacsonyabb frekvenciák használata lehetővé teheti a MIMO technológia számára szükséges jel-zaj viszonyt.

Eleinte rádiófrekvenciás modulok használatával, vezetetten végeztem méréseket a CMW500 Bázisállomás szimulátorral, később pedig mobiltelefonokat is teszteltem egy külön erre a célra kialakított árnyékolódoboz segítségével, ami lehetővé teszi az RF porttal nem rendelkező eszközökkel való kapcsolatfelvételt, árnyékolt körülmények között. A későbbiekben, lehetőség szerint szeretném a lehető legnagyobb távolság biztosításával (minimum 3 m) elvégezni a mérést. Sajnos a Bázisállomás szimulátorhoz egyelőre még nem elérhető olyan firmware verzió, amely az 5G technológián végzett méréseket is támogatná, ezért a MIMO tesztelés egyelőre csak az LTE 4G technológián belül lehetséges.

Különböző antennák használatával kísérleteznék továbbá a MIMO rendszerek stabil működéséhez szükséges minimális antennatávolsággal kapcsolatos tesztekkel. Ezeket a teszteket szeretném több MIMO technológián is elvégezni, például különböző csatornamátrixot alkalmazó tér multiplexálás, vagy tér diverziti alkalmazásával. Ehhez mindenképpen érdemes lenne egy zajgenerátort is használni az árnyékolt mérőhelyiségben, mellyel még valóságosabb tesztkörnyezetben végezhetném el a méréseket.

6 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Xiaohu, Y., Dongming W., Pengcheng Z., Bin S. (2011). *Cell Edge Performance of Cellular Mobile Systems*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, VOL. 29, NO. 6, 1139-1150
- [2] Li, X., He, C., Zhang, J. (2018). *Spectral Efficiency and Energy Efficiency of Bidirectional Distributed Antenna Systems With User Centric Virtual Cells*, VOL 6, 49886-49895
- [3] Molisch, Andreas F. (2011). *Wireless communications* (2. kiadás). John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-0-470-74187-0
- [4] Kiss Tamás. LTE (Long Term Evolution [Előadás]. Széchenyi István Egyetem, Győr.
- [5] S. Sun, R. Li, X. Liu, L. Xue, C. Han, M. Tao (2024). *How to differentiate between Near Field and Far Field: Revisiting the Rayleigh Distance*. IEEE Communications Magazine, arXiv:2309.13238v2 [eess.SP] 1-7
- [6] Khushboo, K. (2021. 12 06). *BLER: A critical parameter in cellular receiver performance*. Letöltés dátuma: 2024.10.03. forrás: BLER: A critical parameter in cellular receiver performance – 5G Technology World:
<https://www.5gtechnologyworld.com/bler-a-critical-parameter-in-cellular-receiver-performance/>
- [7] RF Wireless World. (2023. 10. 27.). BER vs BLER vs DBLER. Letöltés dátuma: 2024. 10. 27., forrás: RF Wireless World:
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/BER-vs-BLER-vs-DBLER.html>
- [8] ETSI TS 136 133 V16.7.0 (2022-02). "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management," ETSI, 2022. [Online]. Elérhető:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136133/16.07.00_60/ts_136133v160700p.pdf
- [9] ETSI TS 136 214 V14.2.0 (2017). "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (3GPP TS 36.214 version 14.2.0 Release 14)" ETSI, 2017. [Online]. Elérhető:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136214/14.02.00_60/ts_136214v140200p.pdf
- [10] Everything RF. (2023. 10. 27.). Receiver Sensitivity [definíció]. In Everything RF. Letöltés időpontja: 2024.10.27., forrás: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-receiver-sensitivity>

- [11] Sharetechnote. (2023. 10. 27.). LTE RSRP, EPRE, Total Power. Letöltés dátuma: 2024. 10. 27., forrás: Sharetechnote:
https://sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_RSRP_EP_RE_TotalPower.html
- [12] Walter, F. (2005). A digitális műsorszórás alapjai. ORTT-AKTI. ISBN: 963 216 857 7
- [13] Trenton Systems. (2023. 10. 27.). 5G Frequency Bands. Letöltés dátuma: 2024. 10. 27., forrás: Trenton Systems:
<https://www.trentonsystems.com/en-us/resource-hub/blog/5g-frequency-bands>
- [14] Rohde & Schwarz. (2013). *R&S®CMW500 Wideband Radio Communication Tester Specifications* (Version 11.00).
- [15] Rohde & Schwarz. (2012). *R&S®CMW500 Wideband Radio Communication Tester: User Manual* (Version 3.0.14).
- [16] Chen J.,(2014). LTE RF Measurements with the R&S®CMW500 according to 3GPP TS 36.521-1: Application Note
- [17] ETS-Lindgren. (2012).*3115 Double-Ridged Guide Antenna: Datasheet*. [Online].
Elérhető:
<https://www.ets-lindgren.com/datasheet/antennas/double-ridged-guide/4002/400203>
- [18] 4G LTE. (n.d.). *4G LTE cells, sectors and antenna beamforming*. Letöltés dátuma: 2024.11.03. forrás: <https://www.4g-lte.net/4g-lte-cells-sectors-and-antenna-beamforming/>
- [19] Keysight Technologies. (n.d.). *LTE overview*. Letöltés dátuma: 2024.11.03. forrás: https://helpfiles.keysight.com/csg/89600B/Webhelp/Subsystems/lte/content/lte_overview.htm
- [20] Kiss Tamás. Rádiós alapok [Előadás]. Széchenyi István Egyetem, Győr.
- [21] Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2011). *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Academic Press.
- [22] Holma, H., & Toskala, A. (2009). *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Wiley.
- [23] TechPlayon. (n.d.). *LTE FDD system capacity and throughput calculation*. Letöltés dátuma: 2024.11.03. forrás: <https://www.techplayon.com/lte-fdd-system-capacity-and-throughput-calculation/>
- [24] Deb, S., & Bhattacharjee, A. (2020). Effect of intercell interference in uplink of LTE cellular network. *Wireless Personal Communications*, 115(3), 2343-2358.
<https://doi.org/10.1007/s11277-020-07156-x>

- [25] ShareTechnote. (n.d.). *FAQ: Cell communication, CSI, PMI, RI, and MIMO*. Retrieved November 3, 2024, from https://www.sharetechnote.com/html/db/html/FAQ_CellComm_CSI_PMI_RI_MIMO.html