

Modern cellás hálózatok EMF vizsgálata

Merkli Kornél

Villamosmérnöki BSc

Infokommunikáció

2021

Kivonat

Modern cellás hálózatok EMF vizsgálata

A dolgozat az elektromágneses kitettség mérés technikai opcióit, változásait és eredményeit mutatja be, a NR mobilbázisállomások esetén.

Kifejtem egy olasz kutató csoport által ajánlott vizsgálati eljárást és a gyártók által ajánlott mérési módszereket, főként frekvencia szelektív és kódszelektív mérési eljárásokat, de röviden a szélessávú mérési módszert is körül járom és bemutatom az ezen mérésekhez szükséges mérőeszközöket. Az 5G technológia EMF mérésekor a fő eltérés az előző mobil technológiákhoz képest a beamforming és a magasabb frekvenciasávok bemutatom, hogy a beamforming következtében a bázisállomás által kisugárzott teljesítmény nagymértékben függ a hálózat terheltségétől. Az új technológia esetén a folyamatosan sugárzott csatornák megváltoztak, ezek hatását is szemléltem. Továbbá kitérek a TDD technológia miatti változásokra és a nagy sebességek miatti rövid idejű kisugárzás figyelembevételére. Ezeket összegezve, bemutatom a mérések kiértékeléséhez használandó extrapolációs képletet és annak eltéréseit a 4G technológia EMF mérésekor használt extrapolációs képlethez képest. Említést teszek a jelenleg 4G bázisállomások elektromágneses kitettség mérésekor alkalmazott mérési eljárásról. Ezt egy általam elvégzett mérésen keresztül részletezem. Bemutatok egy gNodeB-n végzett frekvenciaszelektív vizsgálati eljárást és összevetem eredményeit az eNodeB-n végzett mérések eredményeivel.

A munkám célja, hogy a jelenleg még csak ajánlásként megjelent mérési eljárásokat bemutassa és képet adjon az ehhez szükséges eszközökről. Valamint szemléltesse, hogy a NR rendszerek expozíció mértéke mennyiben tér el a LTE rendszerek esetén mért értékektől.

Abstract

Modern cellular network EMF examination

The dissertation presents the measurement options, changes and results of electromagnetic exposure in the case of NR mobile base stations.

I will explain the test procedure recommended by an Italian research group and the measurement methods recommended by the manufacturers, mainly frequency selective and code selective measurement methods, but I will also briefly go around the broadband measurement method and present the measurement tools needed for these measurements. When measuring the EMF of 5G technology, the main difference compared to previous mobile technologies is beamforming and higher frequency bands. In the case of the new technology, the continuously broadcast channels have changed, and I have also observed their effect. I will also address the changes due to TDD technology and the consideration of short-term radiation due to high speeds. Summarizing these, I present the extrapolation formula to be used to evaluate the measurements and its differences from the extrapolation formula used in the EMF measurement of 4G technology. I will mention the measurement procedure currently used to measure the electromagnetic exposure of 4G base stations. I detail this through a measurement I made. I present a frequency-selective test procedure on gNodeB and compare its results with the results of measurements on eNodeB.

The aim of my work is to present the measurement procedures currently only available as recommendations and to give an idea of the tools needed for this. Also illustrate the extent to which the exposure levels of NR systems differ from those measured for LTE systems.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	6
2	4G bázisállomás EMF vizsgálat módszerei	7
2.1	LTE rendszerek frekvenciaszelektív expozíció vizsgálata	7
2.2	LTE rendszerek kódszelektív expozíció vizsgálata	8
2.3	LTE rendszerek extrapolációs egyenlete	9
3	5G EMF mérése, mérésének nehézségei	11
3.1	EMF-szint becslés extrapolációs technika alkalmazásával	13
3.2	A passzív és aktív antenna közti különbség, Beamsweeping	14
4	Az ARPA Lazio kutatói által javasolt extrapolációs technika az 5G jelekhez	18
4.1	Az extrapolációs technika validálása.....	20
4.2	FDD 5G jel ($E^{\text{PBCH-DMRS}}$ mérési eljárás).....	21
4.3	PBCH-DMRS mérése.....	21
4.4	Nsc meghatározása	22
4.5	TDD 5G jel (F_{TDC} mérési eljárás).....	23
4.6	TDD 5G jel (R, F_{beam} mérési eljárás).....	24
4.7	Következtetések.....	26
5	5G EMF mérési módszerek	27
5.1	Narda szélessávú mérése	27
5.2	Anritsu és Narda szelektív mérések.....	28
5.2.1	Frekvencia szelektív mérés	29
6	Anritsu MS2720T mérőműszer mérési paraméterek frekvenciaszelektív vizsgálat esetén	32
6.1	Anritsu MS2720T mérőműszer mérési paraméterek kódszelektív vizsgálat esetén .	35
6.2	Anritsu MS2720T mérőműszerrel végzett vizsgálatok	36
6.3	Frekvenciaszelektív vizsgálat nagy adatforgalom mellett 4G esetén	37
6.4	Frekvenciaszelektív vizsgálat adatforgalom nélkül 4G esetén.....	40

6.5	Kódszelektív vizsgálat nagy adatforgalom mellett.....	42
6.6	Kódszelektív vizsgálat adatforgalom nélkül.....	44
6.7	Frekvenciaszelektív vizsgálat nagy adatforgalom mellett 5G esetén	45
7	Összegzés	49
8	Irodalomjegyzék.....	51
9	Ábrajegyzék	52
10	Mellékletek.....	53

1 Bevezetés

Dolgozatomban a modern cellás hálózatok bázisállomásainak elektromágneses expozíció vizsgálatával foglalkozom, főként az ötödik generációs mobiltechnológia lehetséges vizsgálati eljárásaival, alapul véve a negyedik generációs mobiltechnológia bázisállomásainál alkalmazott elektromágneses kitettség vizsgálatokat. Kifejtem egy olasz kutató csoport által ajánlott mérési eljárást és a gyártók által ajánlott mérési módszereket, főként frekvenciaszelektív, kódszelektív mérési eljárásokat, de röviden a szélessávú mérési módszert is körül járom és bemutatom az ezen mérésekhez szükséges mérőeszközöket. Nagy hangsúlyt fektetek az 5G technológia EMF mérések előkerülő fő eltérések szemléltetésére. Az előző mobil technológiákhoz képest ezek a rendszer differenciák a beamforming, beamsweeping és a magasabb frekvenciasávok, ezek mellett bemutatom, hogy a beamforming következtében a bázisállomás által kisugárzott teljesítmény nagymértékben függ a hálózat terheltségétől. Az új technológia esetén a folyamatosan sugárzott csatornák megváltoztak, ezek hatását is szemléltem. Továbbá kitérek a TDD technológia miatti változásokra és a nagy sebességek miatti rövid idejű kisugárzás figyelembevételére. [1] Ezeket összegezve, bemutatom a mérések kiértékeléséhez használandó extrapolációs képletet és annak eltéréseit a 4G technológia EMF mérések használt extrapolációs képlethez képest. Említést teszek a jelenleg 4G bázisállomások elektromágneses kitettség mérések alkalmazott mérési eljárásról. Ezt egy általam elvégzett mérésen keresztül részletezem. Amelyet összehasonlítok módszerben és ki értékelésben egy 5G bázisállomáson végzett frekvenciaszelektív méréssel. A dolgozat célja, hogy a jelenleg még csak ajánlasként megjelent mérési eljárásokat és extrapolációt bemutassa, komparálja a már szabványos LTE vizsgálati és extrapolációs eljárással, képet adjon az ehhez szükséges eszközökről és méréseken keresztül bemutassa LTE és NR rendszerek esetén.

2 4G bázisállomás EMF vizsgálat módszerei

A 4G bázisállomások expozíció vizsgálatára két alapvető ajánlást találunk a frekvenciaszelektív és a kódszelektív mérési módszereket. [2] Ez a két eljárás és az extrapoláció használata pontos értéket ad a bázisállomás által okozott az embereket érő maximális elektromágneses kitettségről. A két eljárást között azonban van némi különbség. Frekvenciaszelektív vizsgálat esetén belátható, hogy az extrapolált érték túllő a tényleges maximális expozíció szinten és ez esetben az extrapolációhoz több rendszerparaméterre van szükség a rendszerüzemeltetőtől, hogy a tényleges, pontos térerősségszinteket kapjuk. Kódszelektív esetben megbízhatóbb, pontosabb értéket kapunk és kevesebb információra van szükségünk a rendszerüzemeltetőtől. A frekvenciaszelektív emisszió mérésnek további hátrányai is vannak. Minden esetben az adott mérési hely körüli összes E-UTRA minden csatornájában határozza meg a teljes térerősséget. A mérés olyan eredményt ad, amely erősen függ a rendszer tényleges terhelésétől, az LTE-re jellemző terhelésfüggő teljesítménysugárzás miatt. Kódszelektív esetben külön-külön meg tudjuk határozni az egyes csatornák által okozott emisszió értékét, ezzel szükség esetén hatékonyabban avatkozhatunk bele a bázisállomás rendszerparamétereibe, hogy javítsuk azokat. Az LTE bázisállomásokról érkező jelek pillanatnyi teljesítménye az időben gyorsan változik és erősen függ az alkalmazott moduláció típusától, erre ugyancsak hatással van, hogy a felfelé/lefelé irányt FDD vagy TDD módon válasszuk el egymástól, azonban hazánkban főként FDD alapú rendszerek üzemelnek, ezért főként ezzel fogok foglalkozni. Mint látható a bázisállomás által kisugárzott jelek teljesítményét több paraméter is befolyásolja és gyorsan változik, ezért szükséges olyan referencia jelek mérése, melyek teljesítményszintje állandó, terhelés független. Különösen az elsődleges (P-SS, Primary-Synchronisation Signal) és a másodlagos (S-SS, Secondary-Synchronisation Signal) szinkronjelek, valamint a fizikai broadcast csatorna (PBCH, Physical Broadcast Channel) és a referencia jel (RS, Reference Signal) alkalmasak erre. [3]

2.1 LTE rendszerek frekvenciaszelektív expozíció vizsgálata

A frekvenciaszelektív méréseket a megfelelő RBW és VBW beállítások mellett végezzük. Főként az előbb is említett P-SS, S-SS és PBCH jeleket vizsgáljuk. Ezeket a jeleket állandó teljesítményszinttel továbbítja a bázisállomás 5-10 ms-onként és körülbelül 1 MHz sávszélességet foglalnak a LTE spektrum középső részén, ahogy azt az 1. Ábra mutatja. Amennyiben a mérés csak a spektrum középső részére korlátozódik, amelyet a P-SS és az S-SS foglal el (ezek szimbólumonként 62 RE-t, azaz 930 kHz-et foglalnak el) vagy a PBCH-t (72 RE

szimbólumonként, azaz 1,08 MHz). A megjelenített eredmény a P-SS, S-SS és PBCH maximuma lesz.



1. Ábra: 9 MHz sáv szélességű LTE spektrum, pirossal jelölt spektrumrészt a rendszeresen továbbított jelzések alkotják (P-SS, S-SS, PBCH) [1]

A gyakorlatban egy LTE-rendszer emissziójának meghatározása az LTE-spektrum központi részének extrapolálásával meglehetősen pontatlan. Mivel az LTE egyetlen frekvenciás hálózatban működik, ugyanazok a problémák jelentkeznek, mint az UMTS jelek frekvenciaszelektív mérésénél (pl. A jelek nem különülnek el az egyes antennáktól). Az emisszió meghatározása az RS (referenciajelek) alapján pontosabb, mert ezeket a jeleket minden MIMO antenna sugározza állandó kimeneti teljesítménnyel. [4]

2.2 LTE rendszerek kódszelektív expozíció vizsgálata

Kódszelektív vizsgálatok során szükség van egy kódszelektív vevőre, amely képes demodulálni a cellaspecifikusan kódolt RS jeleket, így ennek segítségével meghatározható az egyes RS-ek által létrehozott térerősségérték. Ezen cellaspecifikus kódolás mellett lehetőség van az egyes MIMO csatornák RS jelének külön mérésére és az eredmények külön megjelenítésére is. Igaz, hogy a szinkronizációs jelek (P-SS és S-SS) szintén cella kódolásaik, de ezekkel a jelekkel nem lehetséges a MIMO útvonalak szerinti szétválasztás, ami egyértelmű hátrány az RS jeleket használó elemzéshez képest. Fontos az LTE csatorna megfelelő középfrekvenciájának pontos beállítása, különben a műszer nem tudja helyesen demodulálni a jelet, ez hamis eredményhez vezethet. Az extrapoláció alapjául az RS_{max} értéket fogjuk használni. Célszerű a rádiócellában

lévő összes MIMO csatorna egyedi RS értékét is megjeleníteni, ez megkönnyíti annak megállapítását, hogy van-e például egy kiugróan alacsony vagy magas szintű MIMO-csatorna. Ha a vizsgálat során az egyik MIMO csatorna kiugróan alacsony teljesítményen sugároz, ez bizonyos esetekben az emisszió alábecsülését eredményezheti. Fordított esetben túlbecsülhetjük az emisszió értékét, azonban ezzel a módszerrel képesek vagyunk ezeket a csatornákat figyelmen kívül hagyni. [5]

Battery: 08.01.18		GPS: 12:28:46		50°6'22.6" N Ant: 11°27'28.6" E Cable:		3AX 27M-3G SrvTbt: --- Std:		D_Mobilfunk ICNIRP GP	
Table View									
Index	Cell ID	No. Ant	Max (RS Max)	Max (RS 0)	Max (RS 1)				
1	490	2	73.63 dBµV/m	73.63 dBµV/m	69.58 dBµV/m				
2	302	2	56.04 dBµV/m	51.68 dBµV/m	56.04 dBµV/m				
3	300	2	53.14 dBµV/m	51.80 dBµV/m	53.14 dBµV/m				
Total			73.63 dBµV/m	73.63 dBµV/m	69.58 dBµV/m				
Analog			89.56 dBµV/m						
Isotropic									
LTE FDD									
Fcent: 808 MHz		CBW: 1.4 MHz		Sweep Time: 865 ms		Progress: 			
MR: 125 dBµV/m		Extr. Fact.: Cell Sync.:		Off Noise Suppr.: Sync. CP Length:		Off No. of Runs: Normal AVG: 4			
Display			Signal			Extras			Result Type
									Extrapolation Factor

2. Ábra: LTE kódszelektív mérés, amely tartalmazza mindkét MIMO csatorna RS értékét [1]

2.3 LTE rendszerek extrapolációs egyenlete

A 2G / 3G / 4G hálózatokban meglévő bázisállomások tekintetében a kibocsátott EMF szint mérése egy csatorna mérésén és egy későbbi maximális forgalmi becslésen alapul, az EN 50492: 2008 / A1: 2014 és az IEC 62232:2017 / MSZ EN 62232:2018 szabványokban meghatározottak szerint, a maximálisan kisugárzott EMF érték meghatározásához. Egy bázisállomást elemezve a méréseket frekvenciaszelektív berendezéssel hajtják végre a szelektív EMF-méréseket a frekvenciatartományban, ezzel lehetővé téve az EMF-szint meghatározását frekvenciánként. Az LTE bázisállomások közelében a maximális EMF-szint meghatározása a cellaspecifikus referenciajeleken (CRS) alapul, amelyeket mindig a fizikai lefelé irányuló vezérlőcsatorna (PDSCH) alkereteiben továbbítanak egy, kettő vagy négy antenna porton keresztül. Frekvenciaszelektív vizsgálatnál a CRS értékét a spektrum közepén mérhető P-SS, S-SS és PBCH jelekből határozzuk meg. Kódszelektív vizsgálat esetén a CRS szintet úgy lehet meghatározni, hogy a mérőeszközöket a megfelelő LTE rádiócsatorna középfrekvenciához

igazítjuk, majd dekódoljuk a CRS jeleket a kódtartományban, ezzel megkapjuk a referencia jel (RS) értékét. [6] A CRS jelek dekódolása után a maximális EMF szintet egy adott LTE cellaszektorban a következőképpen határozzuk meg.

$$E_{LTE_BS}^{max} = \sqrt{n_{CRS} E_{CRS}}$$

1. Egyenlet

- ahol az n_{CRS} az a tényező, amely meghatározza az összes aktív csatorna teljes sugárzott teljesítményének (P_{MAX}) és CRS jelkomponens teljesítményének (P_{CRS}) arányát. Az n_{CRS} tényező az LTE kódszelektív vizsgálat esetén a csatorna sáv szélességétől függ, frekvenciaszelektív vizsgálat esetén további rendszerparaméterek is befolyásolják. Emiatt gyakran k_{CRS} -ként jelölik. [7]

Az extrapolációs eljárást a mérés során a mérő műszer elvégzi, így képes a becsült maximális emisszió érték kijelzésére. Ahhoz, hogy a legpontosabb térerősség értéket kapjuk a szükséges paramétereket az állomás üzemeltetőnek kell megadnia, azonban alapvetően erre nincs szükségünk, mert a becsült érték adott bizonytalanságon belül ad számunkra egy a limitekhez viszonyítható értéket. Ezért gyakran a műszerek sem a legpontosabb k_{CRS} paraméterrel dolgoznak, hanem átlag értékkel, aminek értéke nagy valószínűséggel magasabb, mint a pontos k_{CRS} érték. Ez a vizsgálat típusát tekintve elfogadható, mert így a „legrosszabb esetet” túl becsülve az esetleges valós limit átlépés előtt már észlelhető a probléma.

3 5G EMF mérése, mérésének nehézségei

Az 5G technológia mérésekor a fő eltérés az előző mobil technológiákhoz képest a beamforming és a magasabb frekvenciasávok. A frekvenciatartomány kibővítésével egyes mérőeszközökhöz kiegészítő berendezéseket (legfőképp antennákat) kell beszerezni. A beamforming pedig különböző környezeti feltételek vizsgálatát igényli. A magasabb frekvenciasávok esetén a szélessávú méréseken (egyszerűsített vizsgálat), ha kell is, csak kis mértékben kell változtatni, a jelenlegi műszerek is képesek az 5G által használt frekvenciasávokat mérni (először a 3,6 GHz-es 5G hálózatok fognak kiépülni, majd ezután a 26 GHz, később pedig a 60 GHz-es hálózatok, a továbbiak pedig még kérdésesek). Mérési módszert tekintve a beamforming-ot kell figyelembe venni (főleg a frekvenciaszelektív mérések esetén). A beamforming következtében a bázisállomás által kisugárzott teljesítmény nagy mértékben függ a hálózat terheltségétől (még jobban, mint az LTE esetén). Ekkor három mérési módszert lehet alkalmazni. Alapvetően a bázisállomás csak az SS/PBCH üzenetet küldi ki folyamatosan. Van, hogy csak egy nagy (pl.: 120° szélességű) beam-ben küldi ki folyamatosan ezt a jelet, de van, amikor az általa lefedett területet több nyalábon keresztül szinkronizálja (horizontálisan és vertikálisan is felosztva), és ekkor egyszerre csak egy nyalábon sugározza ki a szinkron jelet. Ezen felül csak akkor sugároz a bázisállomás, ha egy előfizetőnek küld downlink üzenetet. Ebben az esetben is csak azon a beam-en keresztül, amelyikben az előfizető tartózkodik, és a downlink üzenet időtartama a lekért adat nagyságától függ (ha például csak egy chat üzenetet küld el valamelyik VoIP alkalmazás használatával, akkor csak nagyon kis ideig küld downlink üzenetet a bázisállomás, ellenben, ha 4K videót néz a felhasználó, az adat is sokkal nagyobb, a bázisállomás is jóval több ideig fog sugározni az előfizető felé). Ezek következtében a bázisállomás által kisugárzott teljesítmény egy adott helyen nagyban függ a bázisállomás konfigurációjától és a pillanatnyi terheltségétől. Ezek figyelembevételével három különböző mérési beállítással lehet mérni az 5G bázisállomásokból érkező sugárzás teljesítményét:

- A mérés közben semmilyen adatforgalmat nem generálunk 5G eszközzel, csak azt mérjük meg, amit a jelenlévő eszközök generálnak.
- A mérés folyamán a mérőműszerhez viszonylag közel elhelyezünk egy 5G készüléket, amely valamekkora adatforgalmat generál, ezzel szimulálva egy előfizetőt érő sugárzás nagyságát normál felhasználás során (pl.: videó streamelés).
- A mérés folyamán a lehető legnagyobb teljesítményt akarjuk megmérni, ezért a mérőműszerhez viszonylag közel helyezünk el egy vagy több 5G készüléket, amelyek

a vizsgált bázisállomással kommunikálnak és a lehető legnagyobb adatforgalmat generálják eközben (pl.: JPerf vagy több 4k videó streamelése). Ezzel szimulálva az előfizetőt érő legnagyobb sugárzást. [8]

Az előzőleg felsorolt mérési körülmények közül a második és harmadik esetben problémát okozhat a közelben elhelyezett 5G készülék, ami meghamisíthatja a mérési eredményeket. Ezt kétféleképpen lehet kiszűrni a hálózat típusától függően. Az 5G hálózatok alkalmazhatnak FDD vagy TDD technológiát. FDD esetén egyszerű a megoldás, a mérés során csak a bázisállomás által használt frekvenciatartományt kell vizsgálni. TDD esetén viszont már bonyolultabb a megoldás. TDD esetén az idő körülbelül 75%-a downlink irányú. Ekkor idő tartományban lehet vizsgálni az elektromágneses sugárzást, hogy kiszűrjük az uplink üzeneteket a mérésből.

További lehetőség a maximális sugárzott teljesítmény meghatározására az SS/PBCH üzenetek mérése, majd ezekből a mért értékekből extrapolálni. Ehhez szükség van az SS/PBCH üzenetek érzékeléséhez. Ez a mérés inkább a szolgáltatók számára jelent egyszerű megoldást, hiszen ennek segítségével még a bázisállomás tesztelésekor ellenőrizni lehet az embereket érő maximális sugárzást. Az 5G mérésekhez egy hasonló eljárást már ajánlottak (IE 62232). Két feltétellel használható az extrapolációs módszer 5G hálózatok esetén:

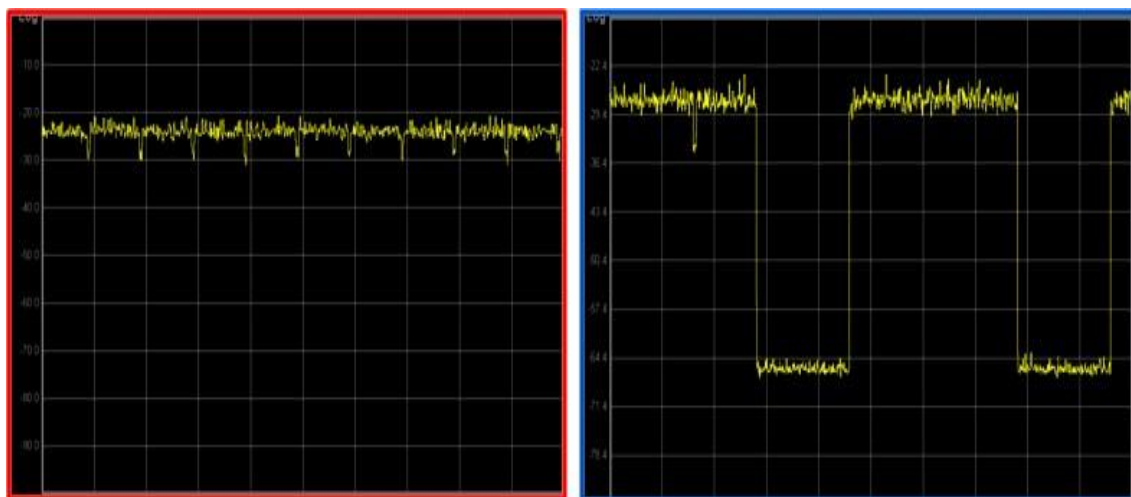
- Az SS/PBCH blokkokon kívül eső resource elemeket nem sugározhatja nagyobb teljesítménnyel vagy nem használhat nagyobb antenna nyereséget a bázisállomás.
- Minden, nem nulla, az SS/PBCH blokkon belüli resource elemet egyenletes teljesítménnyel és antennanyereséggel sugározza a bázisállomás.
- A használt rms detektor átlagolási idejének rövidebbnek kell lennie, mint négy szimbólum, hogy képes legyen csak az SS/PBCH blokkon belül mérni. [9]

Az 5G bázisállomások által kisugárzott teljesítmények is az ICNIRP nemzetközi szabályozásának kell megfelelnie hazánkban (10 W/m^2 a lakosságot érő sugárzás maximális értéke). [10] Az erre vonatkozó szabvány (IEC 62232) 5G szempontokat figyelembe vevő frissített változata 2020-ban jelent meg. A teljesítmény értékeket ezután is átlagolás útján kell meghatározni, ezért mind az egyszerűsített, mind pedig a regisztráló méréseknél a jelenlegi ismeretek alapján és a továbbiakban is az eddigi mérési módszereket kell alkalmazni kisebb módosításokkal. [11] Jelenleg a Narda és a nemzeti/nemzetközi hatóságok, szervezetek egy új mérési módszer kifejlesztésén dolgoznak az 5G beamforming bázisállomások mérésére, mert jelenleg nincs nemzetközileg elfogadott mérési módszer. Amit módosítani lehet, hogy a mérőműszer közelében egy 5G eszközt helyezünk el, hogy a bázisállomás a mérőműszer

irányába is sugározzon, mintha egy előfizetőt szolgálna ki, ezzel szimulálva az embereket érő sugárzást az 5G bázisállomás felől. Ezen kívül szoftveres és hardveres újításokra lehet szükség a magasabb frekvencia és a TDD használata miatt. Az extrapolációs eljárás, a hatékony kiválasztásán alapul a kísérleti csatornának, amelynek vett teljesítménye alkalmas lehet a technika referencia szintjének meghatározására. Az extrapolációs képletnek olyan tényezőket is tartalmaznia kell, amelyek figyelembe veszik a TDD-t és a beamforming-ot az 5G jelszint mért értékében. Ezzel rövid idő alatt elvégzett mérések alapján képesek vagyunk megbecsülni a pillanatnyi maximális teljesítményt.

3.1 EMF-szint becslés extrapolációs technika alkalmazásával

A modern cellás kommunikációs rendszerek sugárzott teljesítménye az idő függvényében változik, függ a resourceblock méretétől, ideértve az adatátvitel fajtáját. Ezen tényezők figyelembevételének egyszerű és hatékony módja az extrapolációs technika használata. Általánosságban elmondható, hogy az idővariáns jel átlagának vagy maximális értékének becslése megköveteli az állandó teljesítményszinten továbbított jel egy összetevőjét, amelyet referenciaként használnak. Például a 4G technológia esetén a már korábban is említett extrapolációs képletet (1. Egyenlet) alkalmazzák. Az LTE-ben a referenciaszintet a cella specifikus referenciajelből (CRS) kapjuk. A CRS továbbítása a fizikai lefelé irányuló megosztott csatornában (PDSCH) történik. A maximális EMF-szintet becsljük, a megfelelő extrapolációs faktor K_{CRS} bevezetésével. Azonban a NR úgy lett kialakítva, hogy a lehető legnagyobb mértékben elkerülje a „mindig bekapcsolt” jeleket. Következésképpen az 5G-ben csak egy „mindig bekapcsolt” jel van, a szinkronizációs jel / fizikai broadcast csatorna (SS / PBCH), más néven "SS blokk" (SSB, Synchronization Signal Block), amely magában foglalja a szinkronizációs jelet (SS, Synchronization Signal), a fizikai broadcast csatornát (PBCH, Physical Broadcast Channel) és a fizikai broadcast csatorna demodulációs referencia jelet (PBCH-DMRS, Physical Broadcast Channel Demodulation Reference Signal), amely referenciajelként működik a PBCH dekódolásához. A jel által megvalósított hozzáférési mód döntő szerepet játszik az extrapoláció meghatározásában. Az 5G rendszerek jelenleg főként a TDD módban működnek, ahol lefelé (Downlink) és felfelé (Uplink) irányuló átvitelekhez ugyanazt a vivőfrekvenciát használják, de a kommunikáció során előre meghatározott időközönként váltanak az Uplink és Downlink között, azonban találkozhatunk a már 4G esetén megismert FDD módban működő álművekkel is.

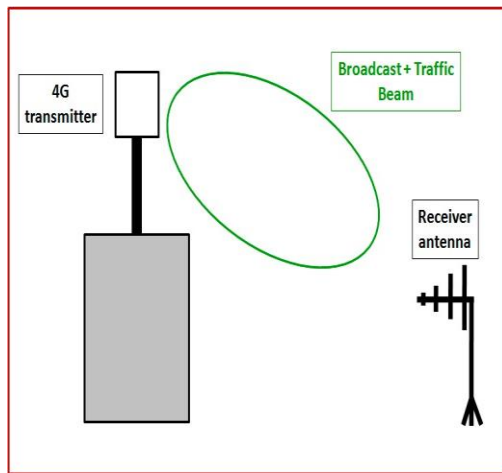


3. Ábra: Bal oldalt a 4G által használt FDD átvitel idő tartományban zero span üzemmód segítségével. Jobb oldalt az 5G által előnyben részesített TDD időtartománya. Itt a jelszint érték lecsökken az uplink szakaszban [2]

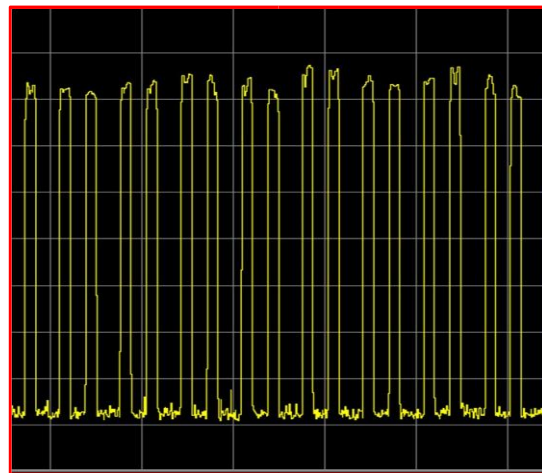
Az FDD-forrás által létrehozott elektromágneses mezőnek való kitettség meglehetősen eltér, a TDD forrásból származóhoz képest. Az FDD rendszer esetében a forrás „mindig be van kapcsolva”, vagyis az átvitel a vivőfrekvencián folyamatos. A TDD rendszer ehelyett váltogatja a lefelé és felfelé irányuló réseket, szakaszos átvitelt eredményez, ami a pillanatnyi maximum teljesítmény csökkenését vonja maga után. A TDD hozzáférési mód következtében az átvitelhez kapcsolódó korrekciós tényezőt, amit F_{TDC} -nek neveznek, bele kell foglalni az 5G extrapolációs javaslatba. [9]

3.2 A passzív és aktív antenna közti különbség, Beamsweeping

A 4G-ről 5G-s hálózatra való áttéréssel kapcsolatos legfontosabb javulás az aktív antennák használata. Ezeknek az intelligens eszközöknek köszönhetően az üzemeltetők maximalizálhatják az értékes spektrum kihasználását, a hálózati kapacitás növelése érdekében. Az 5G előtt az antennák sugárzás karakterisztikája rögzített érték volt. Passzív módon előre meghatározott, amelynek alakja és sugáriránya időben nem változik. Az 5G rendszerek aktív antennái ehelyett képesek sok különböző irányba mutató sugár szintetizálására, és ez dinamikusan átalakítható az elektromágneses környezetnek megfelelően. Ez a szolgáltatás nagy mértékben megváltoztatja az 5G sugárzott csatornák átviteli módját a 4G rendszerekhez képest. Mint ahogy a 4. Ábra a 4G bázisállomásokban (a) használt fix sugárforma és az ahhoz tartozó zero span mérési tartományt mutatja a CRS vett teljesítményének mérésével (b).



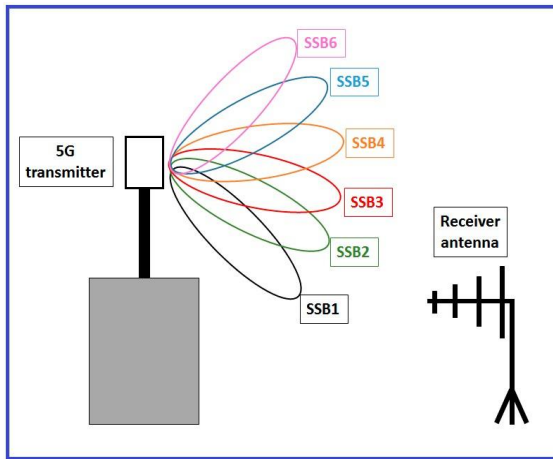
(a)



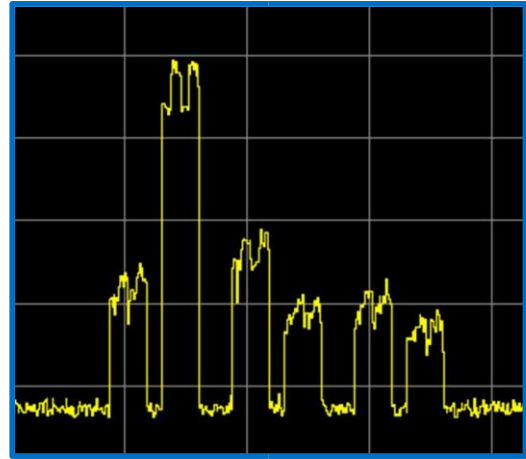
(b)

4. Ábra: A 4G statikus sugár formája, amit passzív antennával hoz létre, zero span módban vizsgálva a kisugárzott CRS referencia jelet, megállapítható, hogy a kisugárzott teljesítmény időben konstans értékű [2]

A cellarendszerek utolsó generációjához eljutva, ami az 5. Ábra bal oldalán látható. Dinamikus beamforming-ot használ (nyaláb irányítást) az 5G rendszerekben az SSB-k továbbítására. Minden sugár SSB-adásokhoz van társítva (példámban SSB1-től SSB6-ig). Az 5. Ábra jobb oldalán az SSB-k által kisugárzott teljesítmény szint változása látható időben (zero span funkció segítségével megjelenítve). Az ábra azt mutatja, hogy a beamforming miatt az SSB-be csomagolt pilotesatornák vételi energiája az időben már nem állandó. Ez azt jelenti, hogy néhány komolyabb megfontolást kell megtenni annak érdekében, hogy azonosítsuk a csatornát, amely a legjobban megfelel teljesítményreferenciának az 5G jelek extrapolációs módszerében. A következőkben az időben változó fogadott SSB teljesítményt a megfelelő tényező meghatározására fogom használni, ezt R -nek nevezzük, az SSB-k mérése alapján, amelyet egy vektor jelanalizátorral végeztek. A Vector Signal Analyzer azért előnyös, mert lehetővé teszi az SSB-k pontos azonosítását, abban az esetben is amikor az adatokat az SSB-k által használt ugyanazon időbeli résszel rendelkező RE-kben (resource element, a legkisebb egység a fizikai csatornán) továbbítják. Érezhető, hogy az SSB teljesítményszint mérése nehézkes a jel időtartománybeli elemzésével.



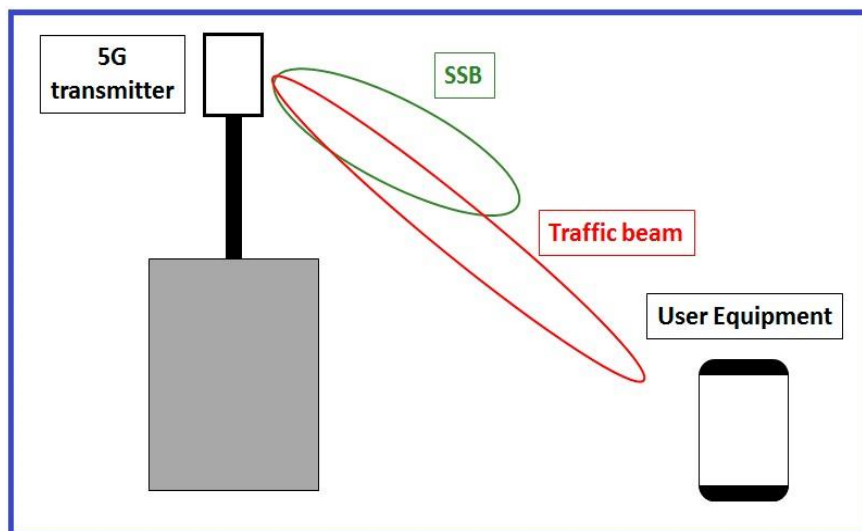
(a)



(b)

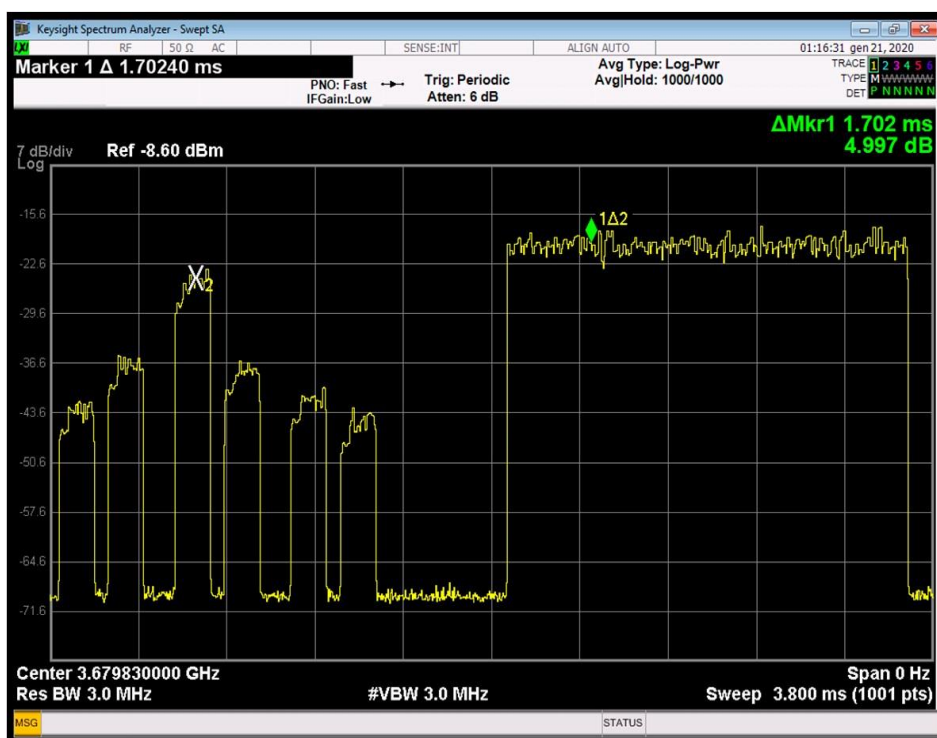
5. Ábra: A bal oldali ábrán az 5G aktív antennával létre hozott beamforming (irányított sugár formázás), a jobb oldalt az SSB szinkronizációs jel zero span ábrája látható. A 4G-hez képest időben változó teljesítmény mérhető [2]

Az 5G források által használt aktív antenna irányított sugárnyalábot képes létre hozni (beamforming) ezzel megnövelve a vételi nyereséget. A beamforming létrehozásához a bázisállomás több antenna elem által ki sugárzott jelet kombinálja. Ennek következményeként előállnak maximális erősítésű interferencia helyek és teljes kioltási helyek. Így egy nagy teljesítményű csatorna létrehozására képes, amelyen keresztül a felhasználó gyors kommunikációra és nagy adatátvitelre számíthat. [12] Ezt az irányított sugárnyalábot mutatja a 6. Ábra.



6. Ábra: A sugárformálás hatása látható. Míg az SSB-k véges számú előre kiválasztott sugárhoz vannak társítva, az adatforgalmat a felhasználói berendezés felé fókuszált sugár segítségével továbbítják [2]

Ezen képesség miatt, az 5G rendszerek esetében a sugárzáshoz kapcsolódó fogadott csatornák (azaz az SSB-kbe csomagolt jelek) már nem lehetnek önmagukban referenciaértékek a maximálisan befogadható teljesítményszint értékére, mivel az adatátvitel egy dedikált mintával van ellátva, amelyet magasabb nyereség jellemez az SSB nyaláb szinkronizációs jelével összehasonlítva. Ezért az 5G rendszer referenciáját egy nyalábalakító tényezővel kell korrigálni (az alábbiakban F_{beam}). Például a beamforming hatását zero span méréssel értékelve a 7. Ábraán látható, ahol mind az SSB-k, mind az 5G adat átviteli jel értékei bemutatásra kerülnek. Az ábrán az F_{beam} értéke 5 dB.



7. Ábra: Zero span üzemmódban mérve, bal oldalon az SSB sorozat, amely 6 SS blokkot tartalmaz, jobb oldalon a felhasználói adatokhoz társított jel, a felhasználói adatokat +5 dB-el nagyobb erősítésű sugár segítségével továbbítják [2]

4 Az ARPA Lazio kutatói által javasolt extrapolációs technika az 5G jelekhez

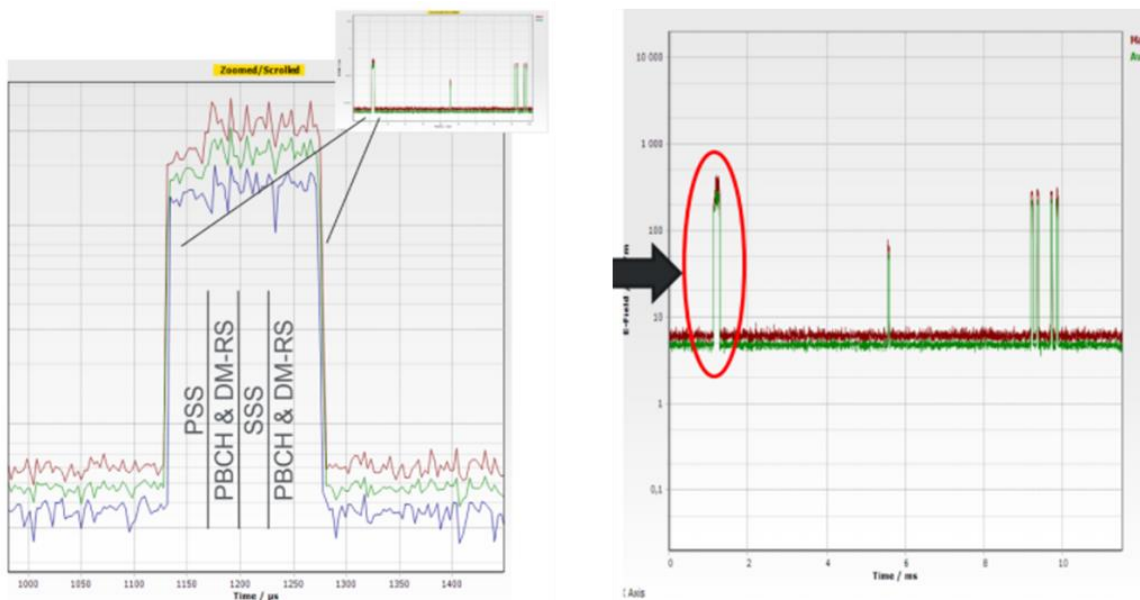
Ennek a szakasznak a célja az 5G jelek extrapolációs technikájának leírása az ARPA Lazio kutatói vizsgálata alapján. Az EMF maximális szintjét egy adott helyen három tényező szorzata adja meg:

$$E_{5G}^{max} = \sqrt{N_{SC}(B, \mu) F_{TDC} E_{RE}^{max}}$$

2. Egyenlet

ahol:

- Az $N_{SC}(B, \mu)$ az NR csatorna összes alvivőének és az SS/PBCH blokkhoz tartozó alvivőknek az aránya. Ez a paraméter mind a jel sávszélességétől (B), mind az alvivők egymástól való távolságától (μ) függ. A paraméter kiértékeléséhez a SS/PBCH blokk sávszélességének meghatározása szükséges spektrumanalízissel, majd kisebb RBW (felbontási sávszélesség) használatával meghatározható a blokk alvivőinek távolsága, a két adatból pedig az alvivők száma. Ahogy azt a 8. Ábra is mutatja.



8. Ábra: A bal oldali ábrán a SS/PBCH blokk sávszélesség meghatározása, a jobb oldali ábrán a blokkban az alvivő szám meghatározása, kis RBW (felbontási sávszélesség) használatával (a frekvencia 1/ms kifejezve) [3]

- Az F_{TDC} a determinisztikus skálázási tényező, amely a downlink időtartományát mutatja a teljes jel átviteli időhöz képest. FDD módban működő állomások esetén értéke 1, TDD módban működő állomásoknál az Uplink/Downlink arány határozza meg.
- E_{RE}^{max} az egyetlen erőforráselemnél (RE) mért maximális EMF-szintet jelenti, amely a resourceblock legkisebb egysége, ami egy frekvenciatartományban lévő egyik hordozóból és egy OFDM szimbólumból áll az időtartományban.

Nyilvánvaló, hogy az E_{RE}^{max} meghatározása döntő szerepet játszik az egyenletben. Mint már tárgyaltuk az előző szakaszokban a fő kérdések a pilotsatorna megválasztásával foglalkoznak a kapott eredmény referenciaként szolgálhat az extrapolációs technikához. Ezenkívül néhány sajátos 5G karakterisztikus hatás, amely befolyásolja a pilotsatorna vételi teljesítményét, mint a beamforming, beamsweeping, TDD mód és figyelembe kell venni a MU-MIMO antennák használatával előállított sugárnyalábok számát is. A 4G és 5G extrapolációs technikák harmonizálása érdekében a javasolt kísérleti csatorna a PBCH demodulációs referenciajel (PBCH-DMRS). A PBCH-DMRS az SSB-k egyik alkotóeleme, fizikai elhelyezkedését a fizikai cella azonosító határozza meg, ez a választás szerint a maximális EMF-szint egy single RE esetén így definiálható

$$E_{RE}^{max} = (E_{RE}^{PBCH-DMRS}) \sqrt{\frac{F_{beam}}{R}}$$

3. Egyenlet

ahol:

- $E_{RE}^{PBCH-DMRS}$ a PBCH-DMRS átlagos EMF-szintje egyetlen RE-nél
- R az összes SSB-sorozat átlagos detektált teljesítményének és a sáv teljesítményének az aránya a legnagyobb teljesítményű SSB sávhoz viszonyítva. Ez a paraméter a beamforming hatását veszi figyelembe a kapott EMF szintek értékelésekor az összes SSB esetén, lehetővé téve a pontos értéket a PBCH-DMRS maximális befogadott EMF-szintjének becslésére egyetlen RE esetén.
- Az F_{beam} egy olyan paraméter, amely figyelembe veszi a traffic beamsweeping potenciális hatását a pilotsatornától kapott maximális EMF szint tekintetében. A paraméter kapcsolódik az 5G sugárformáló tulajdonságához, amely lehetővé teszi a magas teljesítményű csatorna létrehozását a felhasználói berendezés felé a nagy adat átvitel támogatásához. A F_{beam} paraméter a nyaláb által továbbított RE EMF-szintjének

növekedését jelenti a legintenzívebb SSB PBCH-DMRS csatornának megfelelő EMF-szinthez képest.

Érdemes megjegyezni, hogy a PBCH-DMRS választása, mint referencia érték egyetlen RE esetén különösen hatékony, mivel közvetlenül mérhető egy VSA segítségével. Ez az átlagát jelenti az összes SSB-ből származó PBCH-DMRS csatorna EMF szintjének. A beamsweeping következménye, hogy a kapott EMF szint minden SSB esetében különbözik.

4.1 Az extrapolációs technika validálása

Az előző szakaszban javasolt 5G-forrásból kapott pillanatnyi maximális EMF-szint számszerűsítésére szolgáló extrapolációs technikát számos kísérleti mérés validálta egy 5G-jelkészleten. Annak érdekében, hogy reális jelek jelenjenek meg teljesen ellenőrzött körülmények között, a kereskedelmi forgalomban lévő FR1 (7,125 GHz alatti) 5G bázisállomások által továbbított jeleket OTA (Over the Air) méréssel laboratóriumban végezték. A jelek pontos replikációját és mérését, egy Keysight Technologies N5172B EXG X-sorozatú vektorjelgenerátorral és egy Keysight Technologies N9020A MXA vektorjelelemzővel hajtották végre. Az extrapolációs egyenletben szereplő egyes korrekciós tényezők (azaz F_{TDC} , R és F_{beam}) szerepének vizsgálatához három különböző, növekvő „komplexitású” 5G jelet kell használni a vizsgálat során. Amint azt a fentiekben megjegyeztem, a jelek szerkezete megegyezik egy OTA jel jelelemzőjével az FR1 (7,125 GHz alatti) sávban, amelyet egy kereskedelmi 5G bázisállomás továbbít. Az ehhez a tanulmányhoz generált 5G jelek jellemzőit az 1.Táblázat tartalmazza

1.Táblázat: 5G jel karakterisztikája

	Signal #1	Signal #2	Signal #3
Center frequency [MHz]	3680.01	3680.01	3680.01
Bandwidth [MHz]	100	100	100
Numerology [μ]	1	1	1
SS-Block center frequency [MHz]	3679.83	3679.83	3679.83
# of SS-Block per SS-Burst	6	6	6
Access Mode	FDD	TDD	TDD
TDD scheme	-	DDDDDDDSUU	DDDDDDDSUU
Power boost for SSBs	-	-	Yes
Power boost for traffic channel	-	-	5 dB
Data scenario	Full traffic	Full traffic	Full traffic

4.2 FDD 5G jel ($E^{\text{PBCH-DMRS}}$ mérési eljárás)

Első példaként egy FDD jelet vizsgáltak, amelynek paramétereit az 1. Táblázat első oszlopa sorolja fel. Mivel az extrapolációs egyenlet az 5G forrás által létrehozott pillanatnyi maximális EMF-szint meghatározására összpontosít, a mintajeleket a teljes forgalom ideális állapotában generálják, vagyis a teljes jelsáv szélességet lefelé irányuló adatátvitelre fordítják. A jel erőforrás-allokációját a 9. Ábra mutatja. Az ábrán egy SS Burst látható, amely hat SS-PBCH-t tartalmaz (az ábrán sárga színnel rajzolt), és a DL-BCH-t (DownLink BroadCast Channel, zöld színnel). Mivel a DL-BCH felhasználói adatokat és személyhívó információkat kódol, a teljes forgalom a FDD duplex állapotában az összes rendelkezésre álló erőforrást kitölti. A kódolt adatokat ezután leképezzük egy fizikai lefelé irányuló megosztott csatornára (PDSCH). A 10. Ábra mutatja a VSA 5G szoftver kimenetének képernyőképét, amely a jel néhány jellemzőjét ábrázolja.



9. Ábra: FDD jel keret felépítése. A zöld blokkok az adatátvitelhez allokkált erőforrásokat jelentik [2]

4.3 PBCH-DMRS mérése

Amint azt az 3.1 szakasz tárgyalja, a PBCH-DMRS kiválasztása mért paraméterként az extrapolációs eljáráshoz különösen fontos, mivel ez az egyik paraméter, amely közvetlenül elérhető a VSA-n. A 10. Ábraán a VSA által adott keretösszefoglaló példa látható. A PBCH-DMRS átlagos teljesítménye az egyik standard paraméter, amelyet a VSA 5G demodulációs szoftvere értékel. A jelre alkalmazandó korrekciós tényezők mért értéke a 2. Táblázat első sorában található. A korrekciós tényezőkből becsült $E^{\text{PBCH-DMRS}}$ és E_{5G}^{max} értékeket mutatja a 3. Táblázat az első két sora.

Name	EVM (%rms)	Power per RE (dBm)	Modulation	Num. of RBs	RNTI
PSS	0.278	-46.84	BPSK	33	***
SSS	0.287	-46.84	BPSK	33	***
PBCH	0.502	-46.73	QPSK	60	***
PBCH_DMRS	0.307	-46.73	QPSK	60	***
PDSCH0	7085.963	-52.01	QAM64	5460	0x1
PDSCH0_DMRS	0.000	-52.04	QPSK	5397	0x1

10. Ábra: A PBCH-DMRS csatorna átlagos fogadott teljesítményével [2]

2.Táblázat: Korrekciós értékek a vizsgált jel esetén

	Signal #1	Signal #2	Signal #3
Nsc	3300	3300	3300
FTDC	1	0.744	0.746
R	1	1	0.285
Fbeam	1	1	3.162

4.4 Nsc meghatározása

Az 5G resourceblock-ban az alvivők száma dinamikusan változhat függően az átviteli sebességtől, a kapcsolat minőségtől. Az alvivők számát spektrum analízissel határozták meg. Merve a blokk teljes sáv szélességét, majd csökkentve a felbontási sáv szélességet (RBW) lemérték két szomszédos alvivő távolságát (8. Ábra), ebből a két adatból kiszámolható az alvivők pontos száma. Az értéket a 2.Táblázat mutatja.

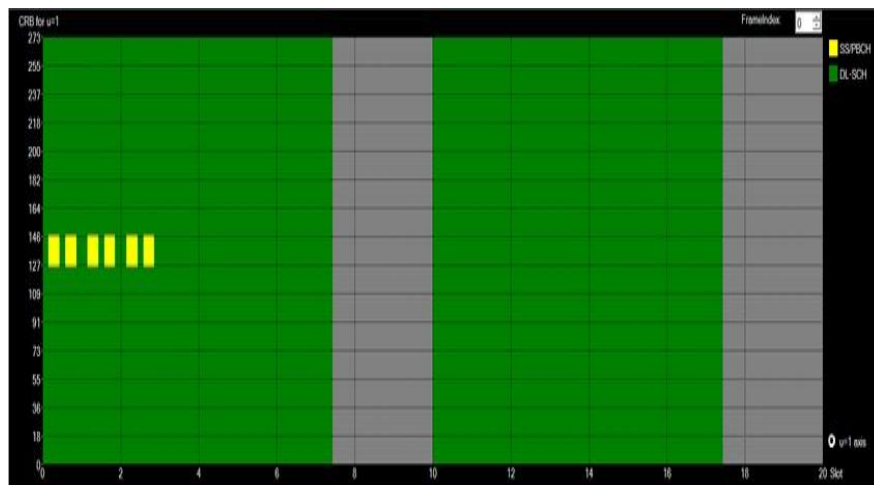
3.Táblázat: A csatorna teljesítményének és az pillanatnyi maximális EMF-szintnek az összehasonlítása

	Signal #1	Signal #2	Signal #3
$E^{\text{PBCH-DMRS}}$	1.030×10^{-3}	1.021×10^{-3}	3.133×10^{-4}
E_{5G}^{max}	5.927×10^{-2}	5.069×10^{-2}	5.183×10^{-2}
Channel Power	5.929×10^{-2}	5.093×10^{-2}	5.152×10^{-2}

Az extrapolációs módszer validálása érdekében az $E_{5G}^{\max}$ -t összehasonlították egy csatorna teljesítménymérés eredményével, amely a jel által azonnal átvitt teljesítmény pontos becslése. Látható, hogy ez az összehasonlítás jó validálási módszer, mivel a csatorna teljesítményméréséből származó pillanatnyi EMF szint megfelel a maximális EMF szintnek, feltételezve, hogy az adatátvitelhez 100% erőforrás-allokáció tartozik. A 3.Táblázat utolsó sorában közölt csatorna teljesítménymérés eredménye kiválóan egyezik az extrapolált adatokkal.

4.5 TDD 5G jel (F_{TDC} mérési eljárás)

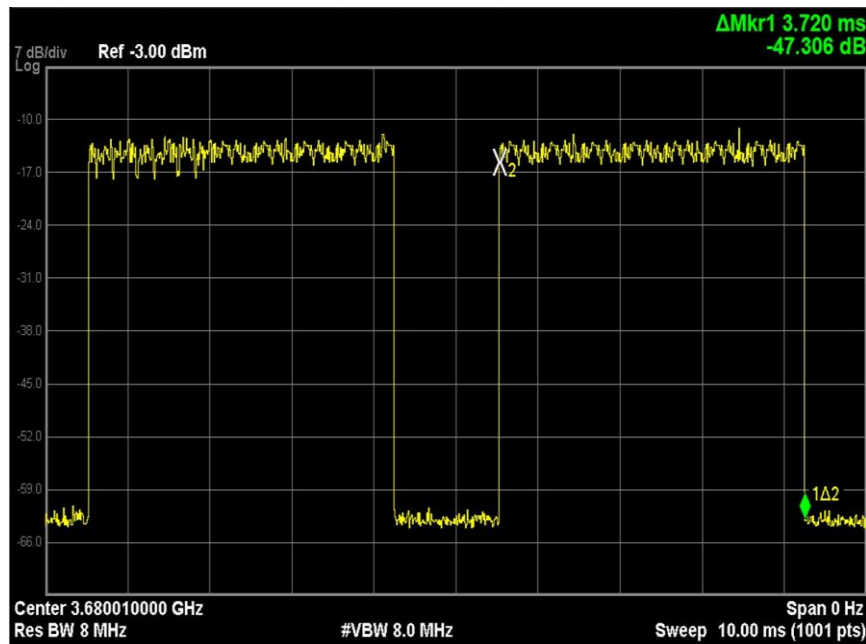
A fent leírt validáció egy FDD jelre vonatkozik, következésképpen nem foglalja magában a TDD jelekhez társított paramétert. Második példaként egy TDD jelet vizsgáltak, amelyet Signal#2-ként jelöltek, és amelynek paramétereit az 1.Táblázat alapján vették figyelembe. A Signal#2 ugyanazokkal a paraméterekkel rendelkezik, mint az OTA mért jel, de az SSB amplitúdója nem változik. Következésképpen az extrapolációs technikához az F_{TDC} paraméter és a $E^{PBCH-DMRS}$ érték szükséges, de R értéke nem. A jel által megvalósított specifikus TDD séma szerint a Signal#2 körülbelül 74% -át allokálják lefelé irányuló adatátvitelhez. A 11. Ábra az erőforrások elosztását mutatja TDD jel esetén. Sőt, ez esetben a jel ideális teljes forgalom mellett jött létre. A TDD duplexálás miatt azonban az erőforrások egy részét a felfelé irányuló kapcsolat számára tartják fenn (szürke képpontként rajzolva a 11. Ábraán) az átvitel során alkalmazott specifikus TDD-séma szerint.



11. Ábra: TDD jel keretszerkezete, a zöld és a szürke blokkok az adatátvitelhez rendelt erőforrásokat jelentik, illetve a szürke a felfelé irányuló adatátvitelhez rendelt erőforrásokat jelenti [2]

Az $E^{PBCH-DMRS}$ becslését közvetlenül a VSA 5G szoftver kimenetéből nyerjük, a 4.3 szakaszban leírt eljárás szerint. Az $E^{PBCH-DMRS}$ mért értéke a 3.Táblázat első sorában található.

A 12. Ábra a zero span spektrumot mutatja a lefelé irányuló adatátvitel időtartamának mérésével, $T_{dw} = 3,720$ ms. Az F_{TDC} mért értékét ekkor kapjuk meg, a T_{dw} és a TDD séma periódusának arányában (5 ms, a Signal#2 esetében), aminek eredményeként $F_{TDC} = 0,744$



12. Ábra: A jel zero span módú mérése, jól látható a downlink és uplink szakasz hossza és jelszint különbsége, ezzel a korrekciós tényező (F_{TDC}) meghatározható [2]

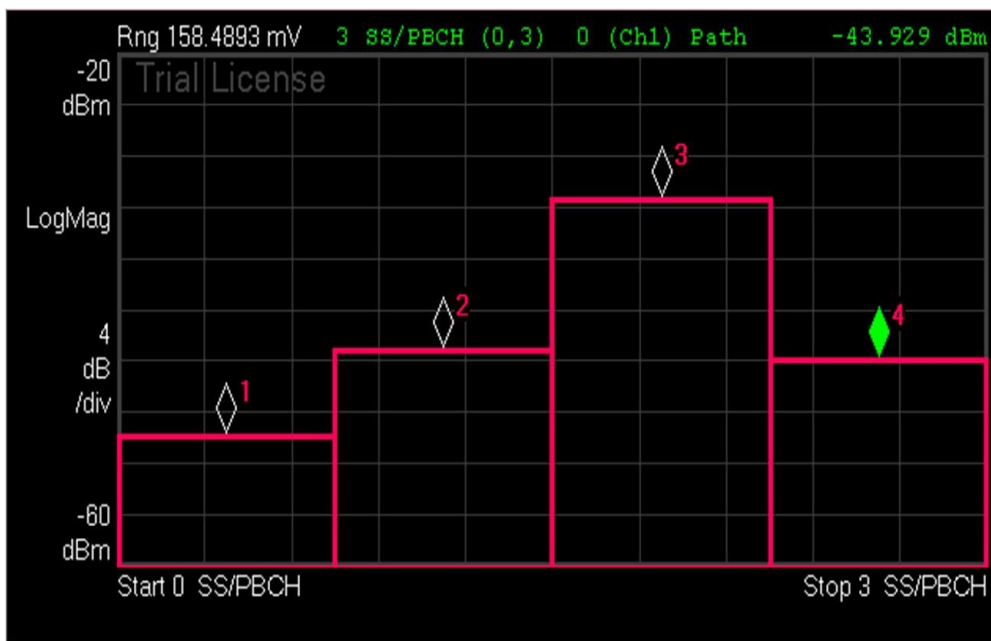
A 2. Egyenlet 3. Egyenletben a Signal#2 esetén alkalmazandó korrekciós tényezők mért értékét a 2.Táblázat első sora sorolja fel. A korrekciós tényezőkből becsült E_{5G}^{max} értékeket a 3.Táblázat második két sorában közli és E_{5G}^{max} értéke a csatorna teljesítménymérésének eredményével (a 3.Táblázat harmadik sora) ismét kiváló egyezést mutat.

4.6 TDD 5G jel (R, F_{beam} mérési eljárás)

A Signal#2 állandó SSB szinttel rendelkezik az SS sorozatban. Amint azt a 3.2 szakasz tárgyalja, a beamsweeping technika a kapott SSB szintjének változását okozza. A Signal#3 tartalmazza ezt a hatást. A Signal#3 paraméterei megegyeznek az előző szakaszban tárgyalt OTA-mért jellel, és az 1.Táblázat harmadik sorában vannak felsorolva. A beamsweeping hatása miatt minden egyes létrehozott SSB-hez, különböző teljesítmény generálódik. Érdeemes hangsúlyozni, hogy a teljesítménynövelés pontosan szimulálja a jel valós, helyszíni SSB-mérését az FR1 sávban, és hogy az azonos sorozatba tartozó SSB-k detektált teljesítményszintje nem állandó, az ütemezett idő végett (5. Ábra). Végül a beamforming hatását (lásd a 7. Ábra) úgy szimulálják, hogy 5 dB-es emelést alkalmaznak a forgalmi sugár által továbbított RE EMF szintjére a legintenzívebb SSB PBCH-DMRS csatornájának

megfelelő EMF szinthez képest. Ebben az esetben az extrapolációs technika megköveteli az összes paraméter becslését: $E^{\text{PBCH-DMRS}}$, F_{TDC} , R és F_{beam} . Az első két paraméter becslésének eljárását az 4.3 és az 4.4 szakaszok ismertetik. Az R paraméter becslésére összpontosítanak, az R paramétert azért vezették be, hogy kiértékeljék a beamsweeping az SS-blokk által észlelt teljesítményszintre gyakorolt hatását:

„ $R = \langle \text{PSS-blokk} \rangle$ ” ahol a $\langle \text{PSS-Block} \rangle$ az összes SS-blokk átlagos detektált teljesítménye egy sorozatban, a PSS-Block $| \max$ pedig a legerősebb teljesítménye. Az SS sorozat hat SS blokkot tartalmaz, de ezek közül csak négyet észleltek, a zajszint felett. A detektált SSB-k fogadott teljesítményszintjét a 13. Ábra mutatja.



13. Ábra: Az SSB-k fogadott teljesítményszintje, ahol a beamsweeping hatását szimulálják, a magas zajszint miatt csak négy SSB-t észlelnek [2]

A demodulációs szoftver biztosítja az összes SSB vételi teljesítményszintjének mérését, lehetővé téve az adott nyaláb R tényezőjének pontos becslését. Végül az F_{beam} értékét zero span üzemmóddal megbecsülték, és megmérték az EMF forgalmi sugárszint és a legintenzívebb SSB PBCH-DMRS csatornájának megfelelő EMF szint közötti különbséget, így $F_{\text{beam}} = 3,162$ értéket kapták. Az E_{5G}^{max} érték összehasonlítása a csatorna teljesítménymérésének eredményével (3.Táblázat, Signal#3) ebben az esetben is kiváló egyezést mutat. [13]

4.7 Következtetések

Ebben a cikkben az 5G jelek extrapolációs eljárását javasolják. Az eljárás magában foglalja a jelenleg használt vagy üzembe helyezett 5G cellás bázisállomások által sugárzott jelek komplex hatásait négy paraméter segítségével: F_{TDC} , $E^{PBCH-DMRS}$, R és az F_{beam} . A bemutatott mérési eljárás ezen paraméterek becslését egy VSA segítségével végzi el, ami egyes paraméterek (N_{SC}) meghatározására frekvenciaszelektív más paraméterekhez ($E^{PBCH-DMRS}$) kódszelektív módszer alkalmaz. Különösen az F_{TDC} -t és az F_{beam} -et mérjük zero span üzemmóddal, míg a $E^{PBCH-DMRS}$ és R értékeket a resourceblock-kód tartományában mérjük. Meg kell jegyezni, hogy az OTA mérések F_{beam} -tényezőjének becsléséhez meg kell erősíteni az adatkapcsolatot a mérési pont felé. Egy lehetséges megoldás az, ha kapcsolatot létesítünk a bázisállomás felé egy megfelelő vevő segítségével, amely a mérési pont közelében van, és teljes forgalmat kényszerít a bázis állomásra. Erre lehet megoldás a JPERF szolgáltatás. Általánosságban elmondható, hogy az FR1 sávban OTA-mért jelek másolatát képező jelek felhasználásával, ellenőrzött körülmények között végzett vizsgálatok kiváló egyezést mutatnak a csatorna teljesítménymérése és az extrapolált értékek között a vizsgált esetekben. Ez arra utal, hogy a javasolt extrapolációs módszer hatékony eszköz az 5G-források által kisugárzott pillanatnyi maximális EMF-szint helyes értékeléséhez. A tervek szerint befejezik a technika valós körülmények közötti validálását.

5 5G EMF mérési módszerek

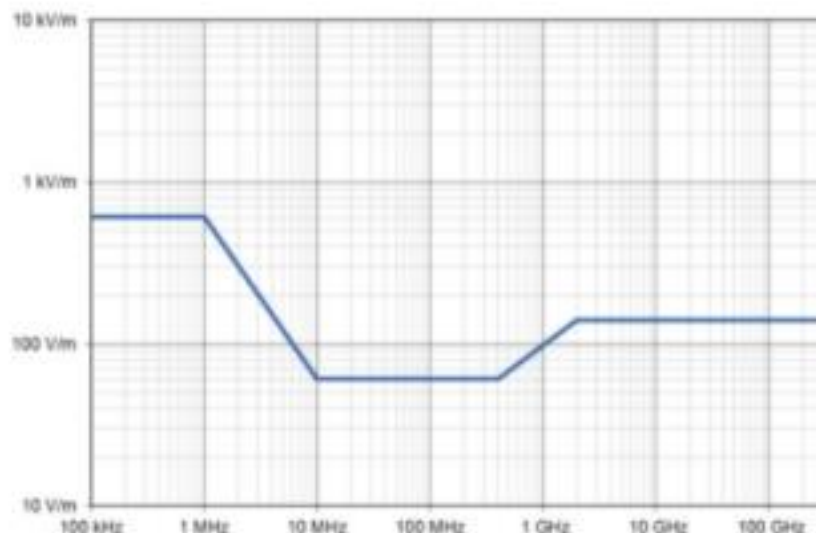
5.1 Narda szélessávú mérése

A szélessávú mérési módszer lehetővé teszi az elektromos térerősség (E) RMS-értékének és a teljesítménysűrűség (S) meghatározását egy bázisállomás közelében. Amint azt korábban megjegyeztem, a méréseket általában a távoli mezőterületen hajtjuk végre, vagyis azon a területen, ahol a térerősség E és a teljesítménysűrűség S összefüggenek egymással, ezért az EMF egyértelmű meghatározásához elegendő meghatározni az elektromos térerősség RMS értékét. A tipikus mérőberendezés egy szélessávú izotróp mérőantennával, azaz egy szondával összekapcsolt elektromos térerősségmérőből áll. A teljes szélessávú EMF mérés eredménye E_{sum} és S_{sum} valójában az összes komponens összege E_k és S_k (k-tól n-ig), amit a mérőantenna a teljes mérési sávban érzékel.

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = \frac{E^2}{120\pi}$$

4. Egyenlet

A Nardalert S3 mérőműszerrel vizsgálható sáv szélessége 100 kHz-50 GHz-ig. A mérés előtt az eszköz naplózási ideje két esemény között, 0.25 s-1min intervallumban állítható, ezt az értéket minél kisebbre válasszuk 5G mérés esetén. A műszeren beállíthatók a szabványnak megfelelő értékek, ezekhez hasonlítva értékeli ki a műszer a mért értékeket. A ki értékelés történhet a maximális térerősség értékekkel vagy az átlagolt mért érték felhasználásával is. A műszer a tér két irányából érkező jelek elektromostérerősségét méri. A szabvány alapján beállított értékkel összehasonlítva, százalékosan kiértékeli a mért eredmény arányában. A szenzort felülettel a sugárzó forrás felé fordítva kell használni. A szabadtéri csillapítás és az antenna közel/távol terének hatása erősen befolyásolja a mért eredményeket. Éppen ezért, a méréseket olyan távolságról kell végezni, ahol a személyi védelmet garantálni akarjuk. 6 perces csúszó átlagos mérést, fél órás periódusban végezzük, a területi átlagolás miatt, ezért javasolt egy területet legalább fél órán keresztül vizsgálni. A vizsgálat során felhasználói eszközzel adatforgalmat szükséges generálni. [14]

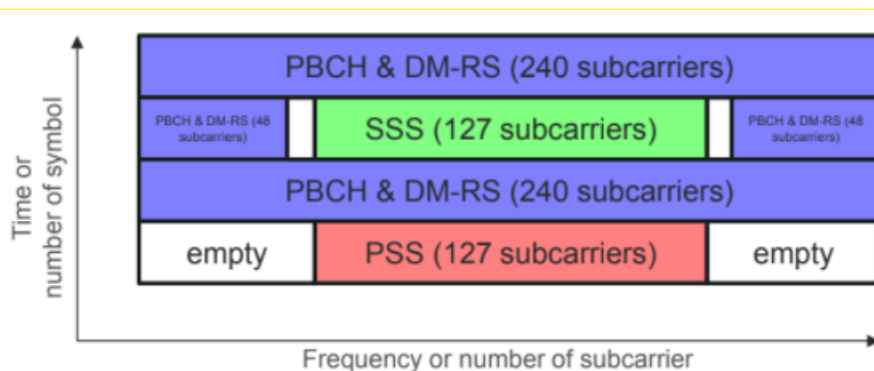


14. Ábra: A szabvány által meghatározott értékek frekvencia függően vannak meghatározva és a műszeren beállítva, a mért értékeket ehhez viszonyítva értékeli ki a műszer [4]

5.2 Anritsu és Narda szelektív mérések

A MS2720T műszer alkalmas szelektív mérések végrehajtására 6 GHz-ig, és megtudja különböztetni a különböző szolgáltatásokat is. Az 5G bázis állomások kisugárzott teljesítménye nagyban függ az aktuális átviteltől. Emiatt a pillanatnyi teljesítmény nagyon eltérhet az átlagos pl. 6 perces időtartamot jellemző átlagos teljesítménytől. Emiatt az Anritsu és a Narda jelenleg két különböző mérési módszert javasol az extrapolációs együtthatók meghatározására, melyből később meghatározható a bázis állomás maximálisan kibocsátott teljesítménye. Mindkét mérési módszer azon alapszik, hogy azokat a jel komponenseket mérjük a jeltartományon belül, melyek függetlenek a bázis állomás terheltségétől. Azonban a mérések végzése folyamán szükséges egy felhasználói eszközzel adatforgalmat generálni.

Az első módszer a frekvencia szelektív mérési módszeren alapszik. A módszer hasonló, mint amit a 4G esetén használunk. A második módszer az úgynevezett demodulációs extrapoláció. Mindkét esetben a két jel komponens jellemzőit mérjük a PSS (primary signalization signal) és az SSS (secondary synchronization signal). Mindkét jelet a fizikai broadcast csatorna tartalmazza (SS/PBCH). Az egész blokk 240 alvivő szélességű, ebből a PSS és SSS jelek is 127 alvivő szélesek, ahogy az 15. Ábra is mutatja.



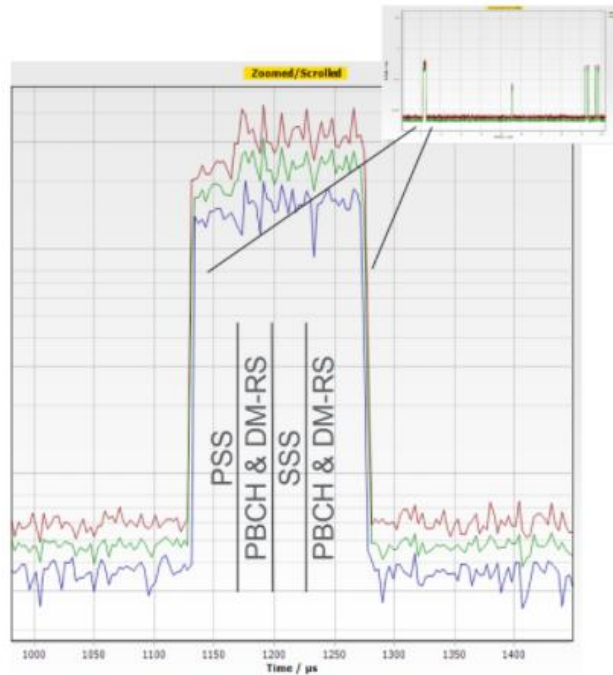
15. Ábra: A csomagok elején kiküldött SS/PBCH blokk felépítése [3]

Ahhoz, hogy meghatározzuk a maximálisan kibocsátott teljesítményt. Elsőként az SS/PBCH blokk vizsgálatát végezzük frekvencia szelektíven vagy az SSS jel vizsgálatát végezzük demodulációs technikával. Ezt követően extrapolációt végzünk a teljes sávszélességen, itt figyelembe kell vennünk, hogy a bázisállomás TDD rendszert használ tehát egy sávban időosztással váltja az uplink és downlink szakaszokat, ha igen korrigálni kell az extrapolációs képletet az uplink időrésével. Ez után figyelembe vesszük, hogy a bázis állomás beamforming-ot használ-e a kapcsolat során, ha igen akkor korrigálni kell a képletet a kisugárzott teljesítmény és beamforming-ból származó nyereség közti különbséggel az átviteli sáv és broadcast sáv közt.

Az Anritsu MS2720-T műszer képes 5G frekvencia szelektív mérésére Scope funkcióban, ahogy az már az LTE mérésekor használva volt. A demodulációs mérésekre jelenleg nem alkalmas a műszer, azonban ez mérési módszer hasonlít az LTE esetén használt UMTS opcióhoz. A demodulációs mérési mód előnye, hogy független az átvitel minőségétől, megtudja különböztetni a cellákat (az eltérő nyalábok által lefedett területeket) és nem veszi figyelembe azokat a jeleket melyeket a mobil eszköz sugároz. A frekvencia szelektív mérés hibája, hogy csak addig ad pontos eredményt a vizsgált jelről, amíg az átviteli sáv teljesítmény szintje alacsonyabb, mint a szinkronizációs jelszint. [15]

5.2.1 Frekvencia szelektív mérés

A mérés során szinkronizációs jel frekvenciáját meghatározhatjuk, az SS/PBCH blokk sáv vizsgálatával. A középfrekvencia beállításával a signalization blokkban, scope mode segítségével vizsgálva a sávot, a legnagyobb jelszinthez tartozó jelünk lesz a szinkronizációs jel. A szinkronizációs jel szélessége és időtartománybeli rendelkezésre állása függ az alvivők sávbeli elosztásától, ahogy azt a 16. Ábra is mutatja.



16. Ábra: A blokkban az alvivők számának meghatározása történhet kis RBW (felbontási sáv szélesség) használatával (a frekvencia 1/ms kifejezve), ehhez a SS/PBCH blokk részletes vizsgálata szükséges [3]

Mivel az SSS és PSS csak a SS/PBCH blokk alvivőinek felét használja, a mellettük levő üres blokk mérésből való kiszűrésére az RBW (felbontási sáv szélesség) ajánlott értéke 800 kHz, de ez függ az alvivők közti távolságtól ehhez VBW 300 kHz értéke ajánlott.

A maximális térerősség értékének meghatározása a gyártó által ajánlott extrapolációs képlettel:

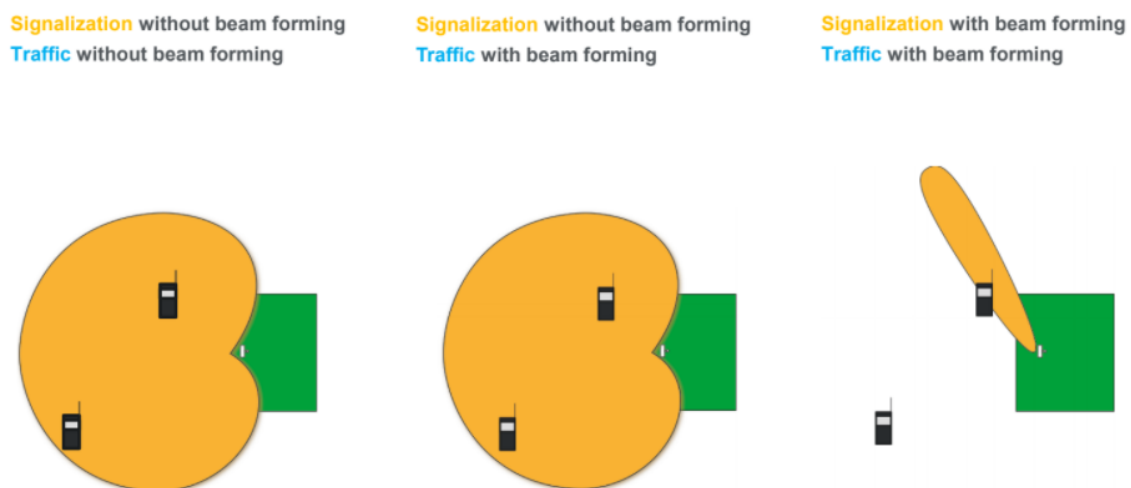
$$El_{max} = \frac{E_{SSPBCH}^2}{E_{ref}^2} \times \frac{N_{SC}}{127} \times k_{TDD} \times k_{SYSTEM}$$

5. Egyenlet

A képletben szereplő értékek:

- E_{SSPBCH}^2 frekvencia szelektív vagy demodulációs mérési módszerrel mért térerősség érték, az adott fizikai blokkon
- E_{ref}^2 frekvencia szelektív mérés esetén a PSS-hez tartozó középfrekvenciás jel térerősség értéke, demodulációs technika esetén a SSS-hez tartozó középfrekvenciás jel tér erőssége szolgál referencia szintként. A PSS a mért PBCH blokk alsó felében lesz észlelhető, a mérési tartomány erre a sávra állítva részletesen vizsgálható a PSS jel blokk és megállapítható a CF (középfrekvencia) és az ahhoz tartozó amplitúdó szint.

- N_{SC} az átviteli csatornában használt alvivők száma pl. 100 MHz-es sáv szélesség esetén 30 kHz alvivő távolságokkal $275 \cdot 12$ azaz 3300 alvivőt használunk. Az alvivők számát, két alvivő távolságából és a sáv szélességből határozható meg, ehhez a megfelelő RBW (felbontási sáv szélesség szükséges). Ezt osztjuk az SSS által lefoglalt alvivőkkel
- k_{TDD} a maximum downlink idő aránya a teljes átviteli időhöz képest ez a paraméter csak TDD funkció használatakor szükséges. Értéke a műszer zero span módját használva meghatározható, a kapott időtartomány elemzése után.
- k_{SYSTEM} egy speciális paraméter, aminek értéke 1, ha a kibocsátott teljesítmény meg egyezik az átvitel és a szinkronizációs jel kibocsátásakor. Azonban az antenna által létrehozott irányított sáv miatt a nyereség így az effektív kisugárzott teljesítmény sem lesz egyforma az átviteli csatornában és a szinkronizációs közegben. Ugyanis az 5G a kommunikáció során egy szinkronizációs jelet használ, hogy feltérképezze az eszközöket a közelében, ha ez megtörtént akkor létrejön a kommunikáció az eszköz és a bázis állomás között. Az állomás képes mindkét esetben beamforming nélkül kapcsolatot létesíteni, de lehetőség van arra, hogy a szinkronizációs jelet beamforming nélkül küldje, míg az átvitel egy irányított nyalábon keresztül történik és képes mindkét jelet irányítottan létrehozni, ahogy a 17. Ábra szemlélteti. A különböző módoknak jelentősége van az extrapolációs képlet kiértékelésében. [15]



17. Ábra: A bázis állomás által kisugárzott, szinkronizációs jel és az adatátviteli csatorna kialakításnak módjai [3]

6 Anritsu MS2720T mérőműszer mérési paraméterek frekvenciaszelektív vizsgálat esetén

Frekvenciaszelektív vizsgálat során a műszert spektrumanalizátor üzemmódban használjuk. Beállítjuk a mérni kívánt frekvenciasávot, erre a bal alsó sarokban található Freq opcióban van lehetőségünk. Középfrekvenciának a vizsgált csatorna középfrekvenciáját állítsuk be, és a megfelelő span értéket. Például 20 MHz csatorna szélesség esetén 30 MHz spannal. Szükség esetén az Amplitudo fül alatt változtathatjuk a referencia szint és bemeneti csillapító értékét. A mérés során a RBW (felbontásisávszélesség) ajánlott értéke 800 kHz vagy ennél alacsonyabb, ezzel a spektrum középső részéről kivehetővé válik a P-SS, S-SS és PBCH blokk. Az alkalmazott VBW (videosávszélesség) ajánlott értéke 300 kHz, ezzel viszonylag optimális burkoló görbét kapunk. Ezt követően a műszer EMF mérési módját használjuk. Ez a Shift+Meas (4 gomb) érhető el, itt a Power and Bandwith funkció alatt található. Az Anritsu izotróp antennával együtt kell használni, olyan frekvenciatartományban, amely megfelel a használt műszer és antenna specifikációinak. Ez az izotróp antennáról leolvasható (18. Ábra). Az antenna csatlakoztatása (18. Ábra) során használjuk a K-N átalakítót, ehhez csatlakoztassuk az antennát (1) és az USB csatlakozót a bemeneti porthoz (2).



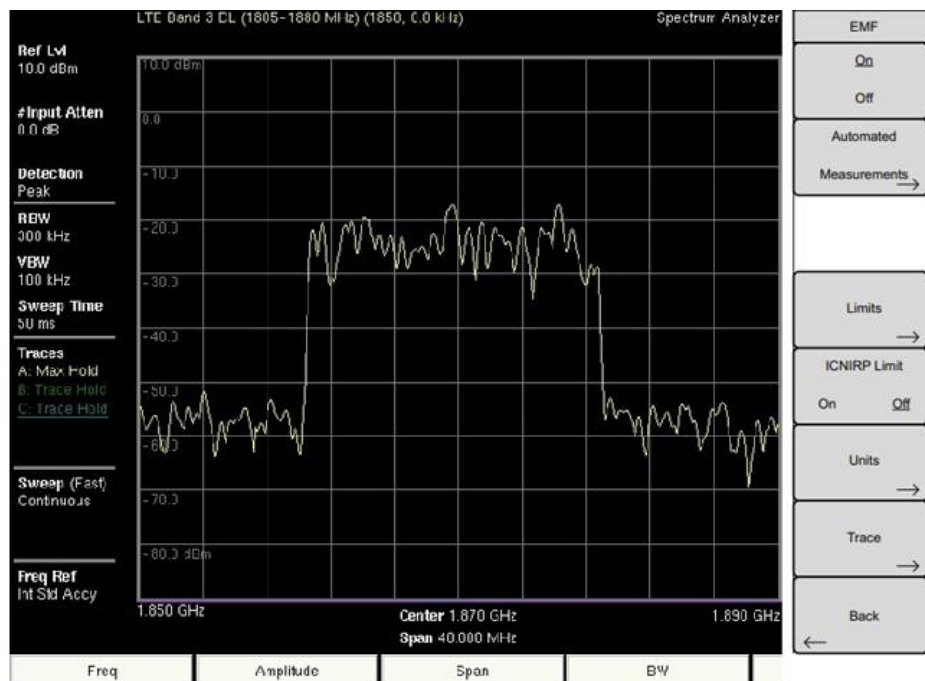
(a)



(b)

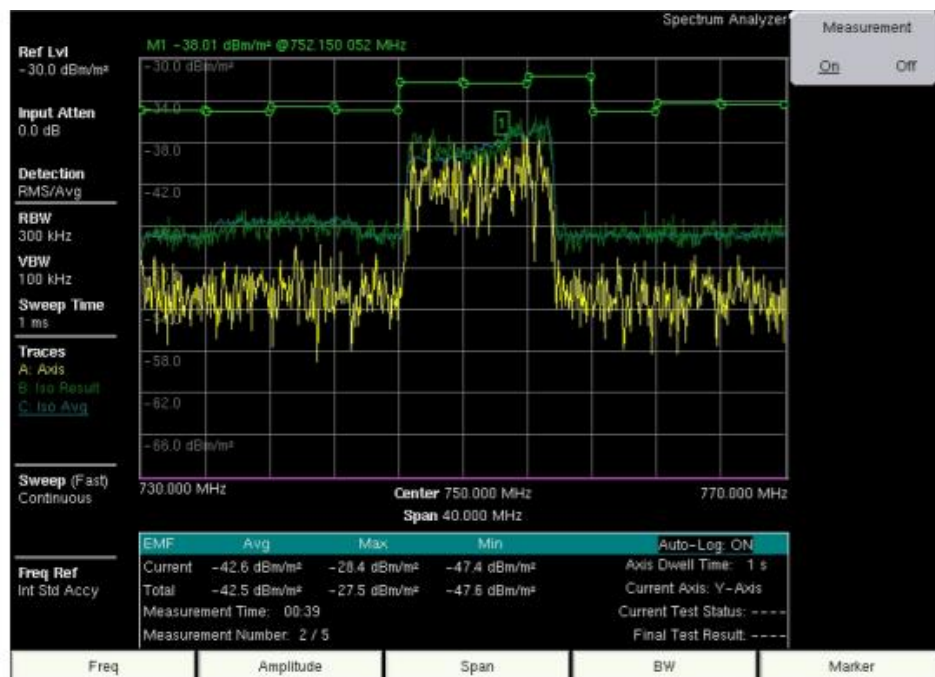
18. Ábra: Anritsu Izotróp antenna csatlakoztatása [5]

Az EMF menüben (19. Ábra) található az EMF on/off ezzel kapcsolhatjuk be a mérési funkciót. A mérés indítása után az eszköz automatikusan átállítja a sweep time értékét és RMS/Avg értékelési módot használ. Kikapcsolás után visszaállítja az értékeket az előzőleg megadottra. A Measurment time alatt állíthatjuk be a mérési idő hosszát általában a határértékeknek megfelelő időt állítunk be 6 perc, 30 perc, de szabadon megválasztható az érték 1-30 perc között. Az izotróp antenna 3 irány jelét méri 1 sec idő közönként, tehát egy átlagolt értékhez 3 sec-re van szüksége, így például 1 perces mérési idő alatt 3 sec Axis Dwell Time mellett 20 mérési érték átlagát kapjuk. A képernyő alján lévő összefoglaló táblázat aktuális sora 3 másodpercenként futási átlag eredményének maximum és minimum értékét jeleníti meg. A megjelenített értékeket az összes eddig elvégzett mérésből számítja ki, a mérési időn belül. A mérési idő végén az aktuális sor törlődik, és a Total sor frissül az összes izotróp eredmény maximum, minimum és futási átlagával. Az ICNIRP Limit opció segítségével használhatjuk a tárolt ICNIRP szabványnak megfelelő határértékeket, ezek frekvencia függvényében automatikusan betöltődnek a spektrum képre. A mérés során az eszköz ehhez viszonyítva végzi a ki értékelést. Units menüben állítható be milyen mértékegységben jelenítse meg a műszer a vizsgált értékeket. Trace menü alatt 3 különböző Trace közül választhatunk Axis módban az aktuálisan kiválasztott tengely irányában mért értékek jelennek meg. Result opciót választva a műszer a három irányból érkező jeleket átlagolja $(X^2+Y^2+Z^2)^{0.5}$ és jeleníti meg a monitoron. A Trace C választva beállíthatjuk, hogy a megjelenített jel alak az aktuális átlagolt érték legyen Avg opcióval, a teljes mérési időre vett maximális érték TMax opcióval és a teljes mérési időre vett átlag érték legyen TAvG opcióval.



19. Ábra: EMF menü opciói [5]

A mérés befejezése után a műszer kiértékeli az izotróp antenna által vett 3 irányból érkező jeleket, majd az eredményt kijelzi a képernyőn (20. Ábra). A mért értékeket egy táblázatban is összegyűjti és kijelzi. A marker érték aktuális csúcsát minimumát és átlag értékét, ezeket kiértékeli a teljes mérési időre nézve is (Current Avg Max Min, Total Avg Max Min). A táblázat tartalmazza a mérési időt (Measurement Time) és a mérések számát (Measured Number). A paraméterként meg adott síkok közti átváltási időt (Axis Dwell Time), a kiválasztott aktuálisan kijelzett tengelyt (Current Axis) és a vizsgálat értékelését Pass/Fail. Az értékelést a beállított limithez viszonyítva teszi meg, aktuális (Current Test Status) és a teljes tartományra (Final Test Result) nézve. Ezt követően marker segítségével leolvassuk a PBCH jel értékét és extrapoláció segítségével meghatározzuk, a bázisállomás maximális expozíció értékét. [16]



20. Ábra: Az EMF mérés kiértékelése [5]

6.1 Anritsu MS2720T mérőműszer mérési paraméterek kódszelektív vizsgálat esetén

Kódszelektív vizsgálat esetén a műszer alapvető EMF mérési paraméterei megegyeznek az előzőleg bemutatott paraméterekkel. Nagy különbség azonban, míg a frekvenciaszelektív vizsgálat egy spektrumanalizátor módban végzett EMF mérés. A kódszelektív vizsgálat a műszer LTE demodulációs üzemmódjában végezzük. Ezt követően meg adhatjuk a vizsgálni kívánt csatorna frekvenciáját, de ebben az üzemmódban lehetőségünk van standard LTE band kiválasztására és akár a vizsgálni kívánt csatorna számát is megadhatjuk. Ezzel a vizsgálatot az éppen általunk használt csatornán is könnyedén elvégezhetjük. A megfelelő frekvencia és referencia amplitúdó érték beállítása után az EMF mérés paramétereit kell beállítanunk, ezek a mérési paraméterek nagyrészt hasonlóak az előzőekben bemutatottakkal. A limit beállítása mellett pedig a mérés végeztével ki is értékeli a kapott eredményt.

LTE Band 3 DL (1805-1880 MHz) (1848)						LTE	EMF
Center Freq 1.869 800 GHz							Measurement
Channel 1848	Index	Cell ID (Grp, Sec)	RS (Total Max)	P-SS (Total Max)	S-SS (Total Max)	On	Off
Reference Source Int Std Accy	1	25 (8, 1)	-30.8 dBm/m2	-62.7 dBm/m2	-34.1 dBm/m2	Measurement Time	
Power Offset 0.0 dB Ext Loss	2	169 (56, 1)	-36.5 dBm/m2	>83.52 dBm/m2	-49.3 dBm/m2	6 min	
Auto Range On	3	271 (90, 1)	-46.7 dBm/m2	>83.52 dBm/m2	-57.4 dBm/m2	Number of Measurements	
	4	312 (104, 0)	-37.6 dBm/m2	>83.52 dBm/m2	-47.1 dBm/m2	1	
BW 10 MHz	5	315 (105, 0)	-51.5 dBm/m2	-58.4 dBm/m2	-58.8 dBm/m2	Auto Logging	
	6	500 (166, 2)	-40.5 dBm/m2	-54.1 dBm/m2	-46.9 dBm/m2	On Off	
Cyclic Prefix Normal	Total		-22.6 dBm/m2	83.5 dBm/m2	-29.2 dBm/m2	Measurement	
EVM Mode Auto: --	Field Strength(Ex Avg)		-10.1 dBm/m2	Parameters			
Sync Type Normal (SS)	Field Strength(Total Ex Avg)		-10.1 dBm/m2	EMF Units			
	Current Axis		X-Axis	dBm/m2 V/m W/m2			
Measurement Time		06:00	Current Test Status	Limits			
Measurement Num		1/1	Final Test Status	19.8 dBm/m²			
				Back			
Freq		Amplitude		Setup	Measurements		

21. Ábra: Kódszelektív EMF mérés paraméterek

A Measurement parameters fül alatt beállíthatjuk, hogy mérés közben mely CRS jeleket dekódolja a műszer. Alapvetően mind az RS, P-SS és S-SS cella referenciajeleket dekódolja műszer a vizsgált csatorna sávban. Ezen opción belül lehetőségünk van bekapcsolni az extrapolációt, így a műszer a mért eredményeket automatikusan extrapolálja. A műszer az extrapolációt az RS (referencia jel) értékét felhasználva végzi. A P-SS és S-SS cella referenciajeleket megjeleníthetjük, de az extrapolációval kiértékelt térerősség szintben nem szerepelnek. Az egyes cellareferenciajelek beállítási füleken belül beállíthatjuk, hogy a műszer a referenciajelek teljes mérési időre vett maximumát, minimumát vagy átlagolt értékét jelenítse meg, esetleg az aktuális értékét. [17]

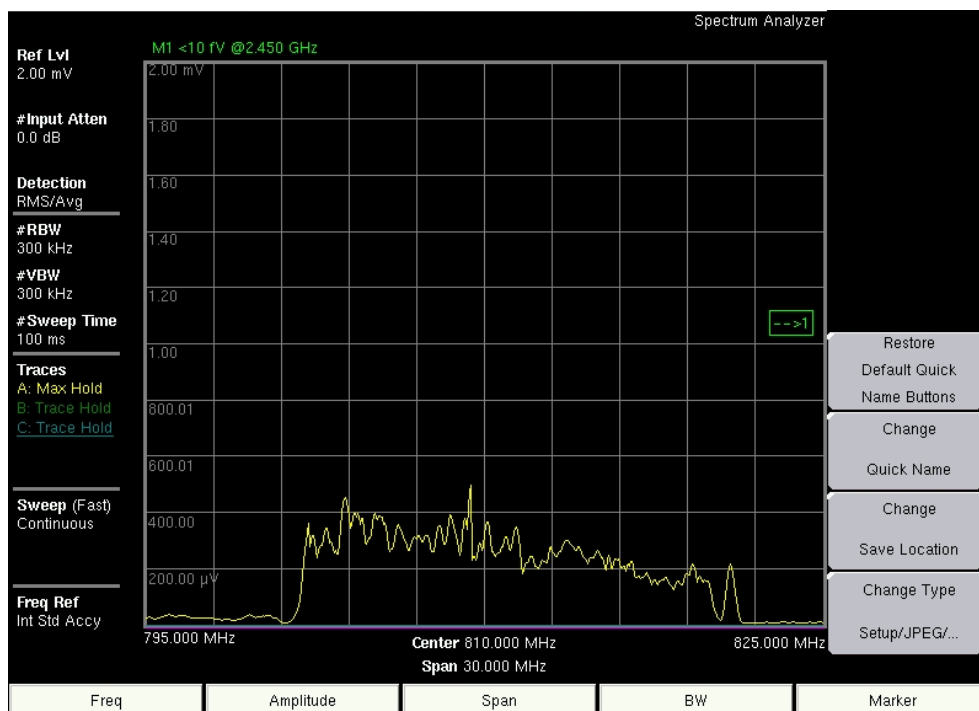
6.2 Anritsu MS2720T mérőműszerrel végzett vizsgálatok

Anritsu MS2720T mérőműszerrel méréseket végeztem szabadban az egyetem területén. A vizsgálatok során frekvenciaszelektív és kódszelektív üzemmódban mértem a bázisállomás elektromágneses expozíció értékét, azaz az okozott elektromágneses kitettséget. A méréseket két különböző környezetben végeztem el, megfigyelve mekkora mértékben vannak ezek hatással a kapott expozíció értékekre. Első esetben a mérés folyamán a legnagyobb teljesítményt akartam megmérni, ezért a mérőműszerhez viszonylag közel elhelyeztem egy 4G képes készüléket (Nemo Handy), amely a vizsgált bázisállomással kommunikált és eközben a lehető legnagyobb adatforgalmat generálta. Az ezt követő mérés közben semmilyen

adatforgalmat nem generáltam 4G képes eszközzel, csak azt mértem meg, amit a jelenlévő eszközök generáltak. Mindkét esetben elvégeztem a vizsgálatot frekvencia és kódszelektív mérési módszerrel. Ezt követően a 4G rendszeren végzett frekvenciaszelektív mérést megismételtam 5G rendszeren, egy 5G képes készülék használata mellett.

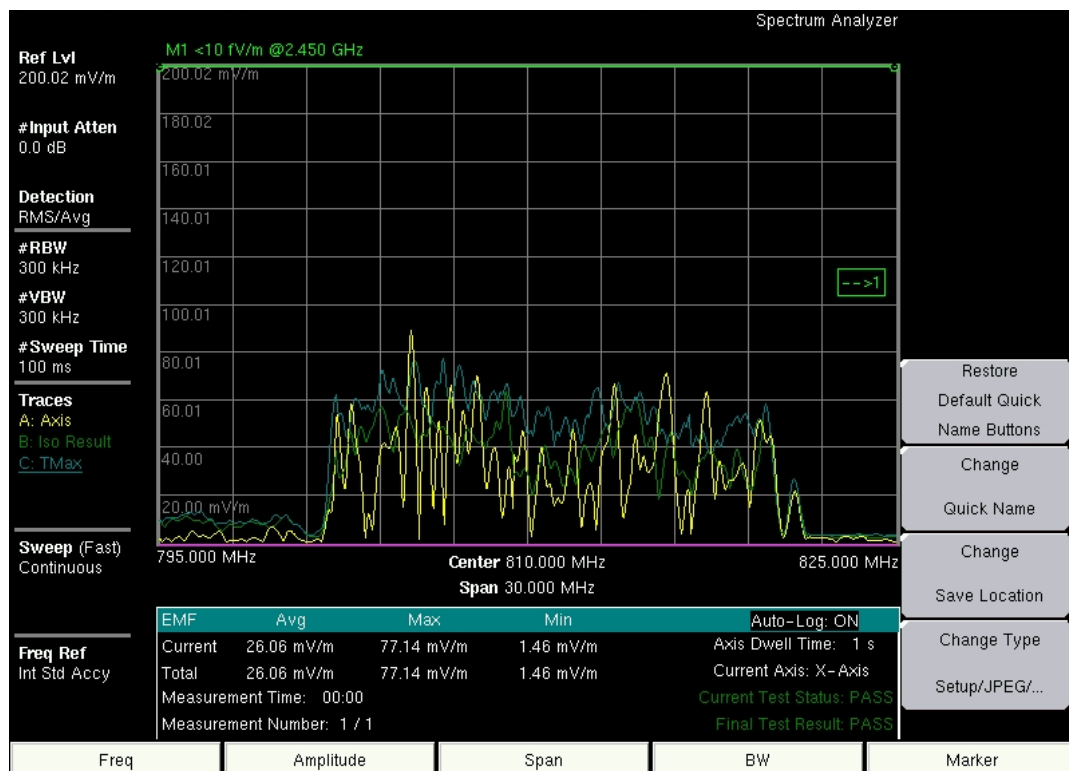
6.3 Frekvenciaszelektív vizsgálat nagy adatforgalom mellett 4G esetén

Az Anritsu mérőműszert a 6 pontban bemutatott mérési paraméterek beállításával felkonfiguráltam. A vizsgálat során egy 700 MHz-6 GHz tartományban használatos izotrópikus antennát használtam. Ezzel az antennával az x, y, z polarizációs síkban végeztem a mérést, a síkok között a mérő műszer automatikusan vált. Mindhárom síkból vett értékeket összesíti és egy végleges átlagolt eredményt jelez ki számunkra, de lehetőségünk van síkonként is kiértékelni a mérést. Frekvenciaszelektív vizsgálat esetén a mérőműszert spektrumanalizátor üzemmódban használtam. A Freq fülön beállítottam a vizsgált tartományt, esetemben a 20 Band 6350-es csatornáját vizsgáltam, amely középfrekvenciája 811 MHz. Az optimális kijelzéshez, a kezdőfrekvenciát 795 MHz-re a végfrekvenciát 825 MHz-re állítottam, így a vizsgált tartomány a spektrum közepén látható 815 MHz-es középfrekvenciával és 20 MHz-es sáv szélességgel, ahogy azt a 22. Ábra is szemlélteti. Az Amplitude fülön a bemeneti csillapító értékét 0 dB-re állítottam a megfelelő referenciaszint mellett az optimális kijelzéshez. A BW opció belül az RBW (felbontási sáv szélesség) értékét az ajánlott 800 kHz-nél részletesebbre 300 kHz-re állítottam, a VBW (video sáv szélességet) pedig 300 kHz-re. Ezeknek a paraméternek az értéke fontos, mert befolyásolhatják a mérés eredményét. [14] Ugyanis műszer az IF szűrőnek nevezett sáv szűrővel folyamatosan méri és megjeleníti a jelek teljesítményét a szűrő sáv szélességén belül. A szűrő sáv szélességét állíthatjuk az RBW paraméterrel. Ha túl széles az RBW, akkor nem láthatók az egymáshoz közeli jelek. A VBW-nek az a célja, hogy kiegyenlítse a bemeneti jelben rejlő zajt. [16] Ez fontos mind a PBCH és a SS/PBCH blokk meghatározásához, melyek az extrapoláció fontos paraméterei. A mérés során folyamatos Sweep-et alkalmaztam.



22. Ábra: Frekvenciaszelektív EMF mérés paraméterek beállítása

Az alapvető mérési paraméterek beállítása után bekapcsoltam a műszer EMF mérő funkcióját. Ezen belül a limitet az ICNIRP által ajánlott értékre állítottam. A vizsgálat esetén 3 Trace-t jelenítettem meg, sárga színnel az éppen aktuálisan mért értékeket ábrázoltattam, zöld színnel a 3 polarizációból átlagolt aktuális értékét és kék színnel a teljes mérési időre vett maximális értéket jelenítettem meg. Az egyes polarizációk mérési idejét 1 s-ra állítottam, ezzel részletes eredményt kaptam mindhárom irányban mért teljesítményszintről. A mérések kiértékelését mV/m-ben hajtottam végre. A vizsgálatot egyszer végeztem el 6 perces mérési idő mellett. A mérés ideje alatt közvetlen a mérőműszer mellett elhelyeztem egy 4G képes eszközt, mellyel nagy mennyiségű adatforgalmat generáltam, a mérés teljes ideje alatt. A vizsgálat végén a mérő műszer kiértékeli a beállított limit alapján a mérési eredményt, ez azonban az aktuális esetre vonatkozik. A megfelelő mért értéket extrapolálva kapható meg a bázis állomás becsült maximális expozíció értéke, a „legrosszabb eset”.



23. Ábra: Frekvenciaszelektív EMF mérés eredmények

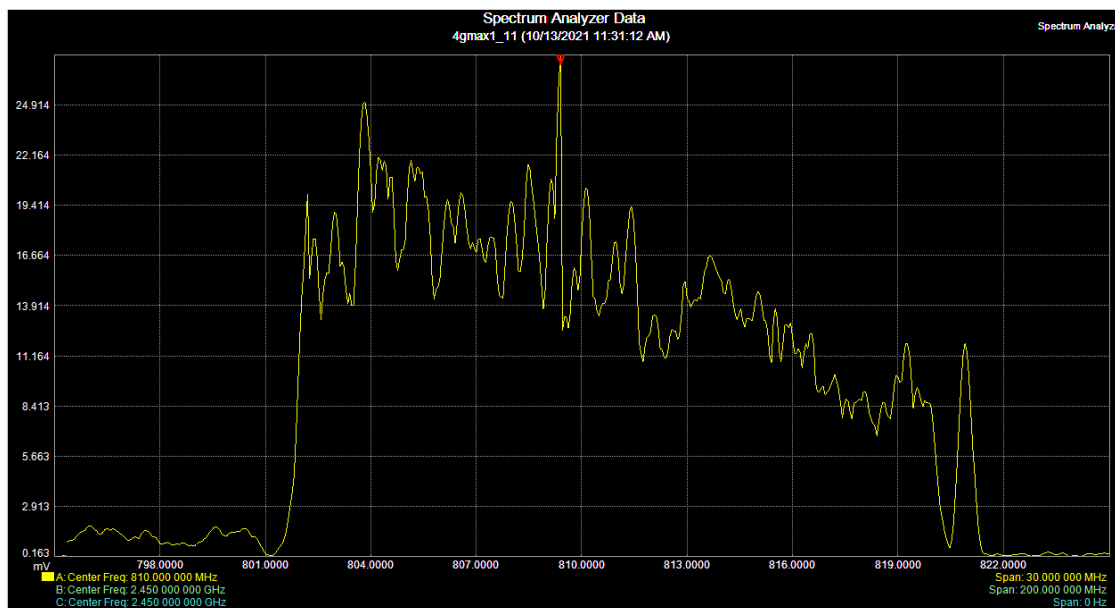
Ahhoz, hogy a bázisállomás maximális expozíciós értékét megkapjuk a mért eredményt extrapolálni kell. Ehhez a mért csatorna PBCH blokkjának teljesítmény szintjét használtam, amit LTE -ben mindig rögzített periodicitással kerül továbbításra a vivő középfrekvenciája körül, ezért a mérés során vizsgált trace-t max hold funkcióban írtam ki. Ez markerrel jelölve látható a 24. Ábra értéke 27.664 mV/m. Az értékét beírtam az IEEE által ajánlott extrapolációs képletbe (6. Egyenlet).

$$E_{LTE_BS}^{max} = \sqrt{k_{CRS} E_{CRS}}$$

6. Egyenlet

Az k_{CRS} érték pontos meghatározásához rendszerinformációkra (alvivő szám, resourceblokk méret, sávszélesség stb.) van szükség a rendszer üzemeltetőtől. Ezért ehhez egy körülbelüli értéket használtam, amely 20 MHz-es sávszélesség mellett átlagosan 1200 osztva a referenciaként használt PBCH blokk alvivő számával és korrigálva az SSS blokk alvivőinek számával ezt a 15. Ábra szemlélteti. Így az extrapolált értéként 0.567 V/m kaptam, ami 0.691 dbm/m² teljesítménysűrűséget jelent. Ez az érték jóval az ICNIRP által meghatározott limit alatt van, ami erre a frekvencia tartományra vonatkozóan 41 V/m, tehát a vizsgált bázisállomás expozíciós értéke megfelelő. A pontos expozíció értékéhez szükségesek

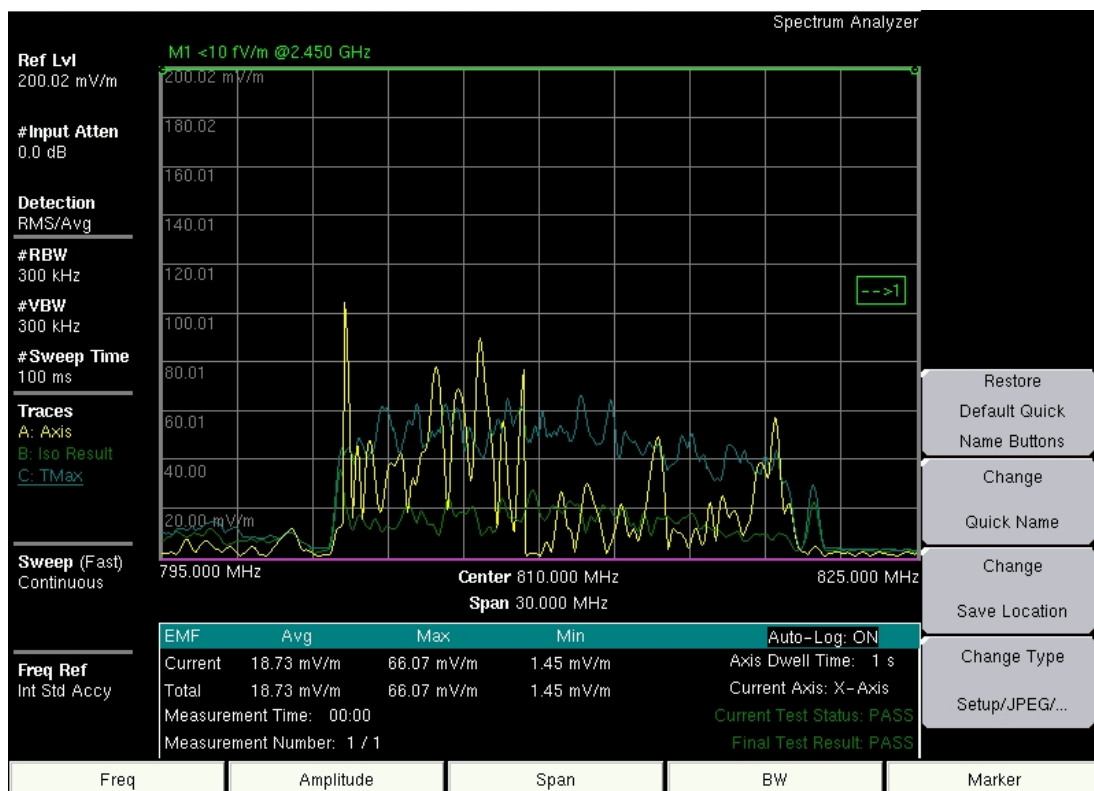
a tényleges rendszer paraméterek. Emellett nem tekinthetünk el a mérési bizonytalanságtól és a frekvenciaszelektív mérési módszer esetleges túlbecslésétől sem, ugyanis ez esetben az ezen frekvencián működő rendszerek növelik a teljesítménysűrűséget, így a mért térerősség értékét.



24. Ábra: Frekvenciaszelektív EMF mérés 1 Marker PBCH blokk

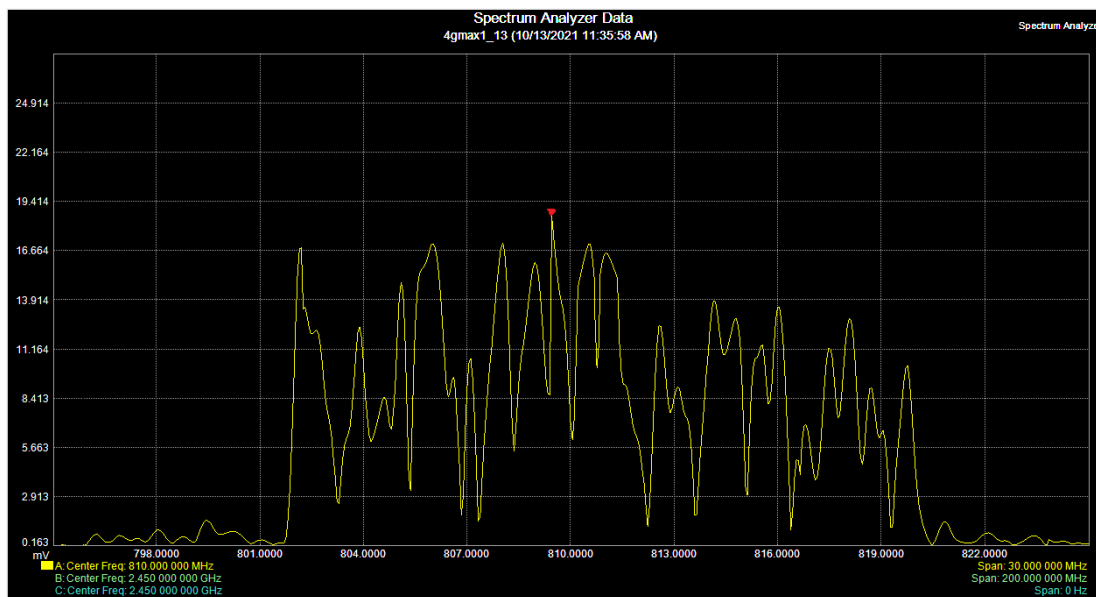
6.4 Frekvenciaszelektív vizsgálat adatforgalom nélkül 4G esetén

A vizsgálat során ugyanazokat a műszer paramétereket használtam, mint a nagy adatforgalom mellett végzett mérés során, azonban ebben az esetben semmilyen adatforgalmat nem gerjesztettem a műszer közvetlen közelében, kizárólag a bázisállomás átlagos forgalma volt jelen. A vizsgálat esetén 3 Trace-t jelenítettem meg, sárga színnel az éppen aktuálisan mért értékeket ábrázoltattam, zöld színnel a 3 polarizációból átlagolt aktuális értékét és kék színnel a teljes mérési időre vett maximális értéket jelenítettem meg. A mérések kiértékelését mV/m-ben hajtottam végre. A vizsgálatot ez esetben is egyszer végeztem el 6 perces mérési idő mellett.



25. Ábra: Frekvenciaszelektív EMF mérés közvetlen adatforgalom nélkül

A 25. Ábra látható, hogy a nagy adatforgalmú méréshez képest alacsonyabb térerősségszinteket mértem. Ez szemlélteti számunkra, hogy a bázisállomás frekvenciaszelektív expozíció mérése során, a mért eredményt befolyásolja, hogy a műszer közvetlen környezetében van vagy nincs nagy adatforgalmat generáló eszköz. A mért értékekkel ez esetben is elvégeztem az extrapolációt a 6. Egyenlet alapján. Így a bázisállomás becsült maximális expozíció értéke 0.473 V/m, ami -2.266 dBm/m² felel meg. Ez az érték is jóval az ICNIRP által meghatározott limit alatt van, ami erre a frekvencia tartományra vonatkozóan 41 V/m, tehát a lakossági limit körülbelül század része mérhető. A két vizsgálat eredménye közti 19%-os eltérés elfogadható tekintve, hogy az első esetben a mérőszonda közvetlen közelében helyeztem el nagy forgalmat bonyolító eszközt. Ebben az esetben is igaz, hogy a pontos expozíció értékéhez szükségesek a tényleges rendszer paraméterek. Ezen vizsgálat kiértékelésekor is a PBCH blokk teljesítmény szintjét használtam, ezt a 26. Ábra markerrel jelöltem, ez 19.269 mV/m. Azonban ezen mérés esetén a blokk térerősségszintje 3,14 dB eltérést mutat. Észrevehető, hogy a korábban állandó teljesítményűnek feltételezett PBCH blokk teljesítményét is befolyásolja, ha nagy adatforgalmat generálunk a mérőműszer közvetlen közelében. Ezt az eltérést, azonban az extrapoláció csökkenti.



26. Ábra: Frekvenciaszelektív EMF mérés 1 Marker PBCH blokk

6.5 Kódszelektív vizsgálat nagy adatforgalom mellett

Az Anritsu mérőműszert a 6.1 pontban bemutatott mérési paraméterek beállításával felkonfiguráltam. Kódszelektív vizsgálat esetén a mérőműszert LTE demodulációs üzemmódban használtam. A Standard LTE band fülön beállítottam a vizsgált tartományt, esetemben a 20 Band 6350-es csatornáját vizsgáltam, amely középfrekvenciája 811 MHz. Az Amplitude fülön a bementi csillapító értékét 0 dB-re állítottam és 0 dBm-es Power offset-et állítottam be. Ez esetben is egy mérést végeztem 6 perces mérési idő mellett, miközben az Axis dwell time értékét 3 s-re állítottam, így a műszer a polarizációok közti váltást 3 másodpercenként tette meg. A Measurement parameters fül alatt beállítottam, hogy mérés közben mely CRS jeleket dekódolja a műszer. Mind az RS, P-SS és S-SS cella referenciajeleket dekódolta a műszer a vizsgált csatorna sávjában, ezzel összehasonlítható a kódszelektív esetben mért P-SS és S-SS értéke a frekvenciaszelektív esetben referenciaként használt PBCH blokkal. Bekapcsoltam az extrapolációt, így a műszer a mért eredményeket automatikusan extrapolálta. Ehhez a műszer egy általános k_{CRS} értéket és az RS (referencia jel) értékét használja fel. A CRS komponensek átlagos értékét jelenítettem meg a kijelzőn, mert a műszer a teljes mérési időre vett átlag értékkel végzi az extrapolációt. A beállított limit érték mellett a műszer kiértékeli a mért eredményeket. A cella specifikus referenciajelek (CRS), ahogy a fizikai broadcast csatorna (PBCH) is a PDSCH (Physical Downlink Synchronisation Channel) része, ezért ezek teljesítményszintje közel megegyezik.

LTE Band 20 DL (791–821 MHz) (6350)

LTE
EMF

Center Freq
811.000 MHz

Channel
6350

Reference Source
Int Std Accy

Power Offset
0.0 dB Ext Loss

Auto Range
On

BW
20 MHz

Cyclic Prefix
Normal

EVM Mode
Auto: --

Sync Type
Normal (SS)

Index

Cell ID
(Grp, Sec)

RS
(Avg/Meas)

P-SS
(Avg/Meas)

S-SS
(Avg/Meas)

1

15 (5, 0)

10.04 mV/m

1.64 mV/m

11.80 mV/m

2

16 (5, 1)

1.33 mV/m

469.70 uV/m

1.41 mV/m

3

175 (58, 1)

2.93 mV/m

>9.22 kV/m

1.18 mV/m

4

181 (60, 1)

49.26 uV/m

8.22 uV/m

10.34 uV/m

5

260 (86, 2)

587.43 uV/m

516.14 uV/m

529.13 uV/m

Total

14.95 mV/m

>9.22 kV/m

14.93 mV/m

Field Strength(Ex Avg)

414.82 mV/m

Field Strength(Total Ex Avg)

414.82 mV/m

Current Axis

X-Axis

Auto-Log: ON

Measurement Time

06:00

Current Test Status

Pass

Measurement Num

1/1

Final Test Status

Pass

Restore
Default Quick
Name Buttons

Change

Quick Name

Change

Save Location

Change Type

Setup/JPEG/...

Freq

Amplitude

Setup

Measurements

Marker

27. Ábra: Kódszelektív EMF mérés közvetlen adatforgalom mellett

A kódszelektív mérés esetén a bázisállomás extrapolációval becsült maximális expozíció szintje 414.82 mV/m, ami -3.423 dBm/m² felel meg. Ez az érték jóval az ICNIRP által meghatározott limit alatt van, ami erre a frekvencia tartományra vonatkozóan 41 V/m, tehát a vizsgált bázisállomás expozíciós értéke megfelelő, körülbelül század része a megengedett lakossági értéknek. A mérési eredmények közt látható egy rendkívül kimagasló érték 9.22 kV/m. Ezt a mért értéket okozhatja a demodulációs eljárás esetleges hibája, ez esetben figyelmen kívül hagyható. A kiértékelés során látható, hogy míg frekvenciaszelektív mérés esetén a vizsgálati eredményt a PBCH blokk (P-SS, S-SS) jelekből származtatjuk, addig kódszelektív esetben a bázisállomás RS referencia jeléből. Emellett nem tekinthetünk el a mérési bizonytalanságtól sem. Azonban szembevetve, a frekvenciaszelektív és kódszelektív mérések eltérő eredményt hoztak, előbbi -0.691 dBm/m² utóbbi -3.423 dB/m². Ez a körülbelül 3 dB eltérés elfogadhatónak mondható, tekintve, hogy a két eljárás más referencia értéket használ alapjául és az extrapolációs k_{CRS} érték sem megegyező a két esetben, mert míg frekvenciaszelektív vizsgálat során kézzel határoztam meg a sávszélességből és a PBCH blokk alvivő számának arányából, ez esetben a műszer egy beépített átlag értékkel számol. Összehasonlítva a frekvenciaszelektív PBCH blokk térerősség szintjét az aktuális dekódolt mérés eredményével látható, hogy körülbelül 5 dB-es eltérés van közte. Ebből az értékből is látszik, hogy a két mérés nem teljesen egyező értéket produkál. A műszergyártói leírások alapján általánosságban 2-8 dB es eltérés figyelhető meg a két mérésimódszer által adott eredmény között.

6.6 Kódszelektív vizsgálat adatforgalom nélkül

A vizsgálat során ugyanazokat a műszer paramétereit használtam, mint a nagy adatforgalom mellett végzett mérés során, azonban ebben az esetben semmilyen adatforgalmat nem gerjesztettünk a műszer közvetlen közelében, kizárólag a bázisállomás átlagos forgalma volt jelen. Ez esetben is egy mérés végeztem 6 perces mérési idő mellett a 20 Band 6350-es csatornáján. Előzetesen arra számítottam, hogy a vizsgált értéket csak kis mértékben fogja befolyásolni a közvetlen adatforgalom hiánya, ugyanis az állomás RS jele csak kis mértékben függ az állomás terheltségétől, ezt a mérés igazolta. A mérés során ugyancsak kijeleztetem a P-SS és S-SS értékét, így összevethetők a nagy adatforgalmú mérés során mért értékekkel, és a frekvenciaszelektív vizsgálat során mért eredményekkel.

LTE Band 20 DL (791-821 MHz) (6350)

LTE
EMF

Center Freq
811.000 MHz

Channel
6350

Reference Source
Int Std Accy

Power Offset
0.0 dB Ext Loss

Auto Range
On

BW
20 MHz

Cyclic Prefix
Normal

EVM Mode
Auto: --

Sync Type
Normal (SS)

Index

Cell ID
(Grp, Sec)

RS
(Avg/Meas)

P-SS
(Avg/Meas)

S-SS
(Avg/Meas)

1

15 (5, 0)

10.14 mV/m

1.49 mV/m

10.81 mV/m

2

16 (5, 1)

1.61 mV/m

492.83 uV/m

1.54 mV/m

Total

11.74 mV/m

1.98 mV/m

12.35 mV/m

Field Strength(Ex Avg)

386.08 mV/m

Field Strength(Total Ex Avg)

386.08 mV/m

Current Axis

X-Axis

Auto-Log: ON

Measurement Time

06:00

Current Test Status

Pass

Measurement Num

1/1

Final Test Status

Pass

Restore
Default Quick
Name Buttons

Change
Quick Name

Change
Save Location

Change Type
Setup/JPEG/...

Freq

Amplitude

Setup

Measurements

Marker

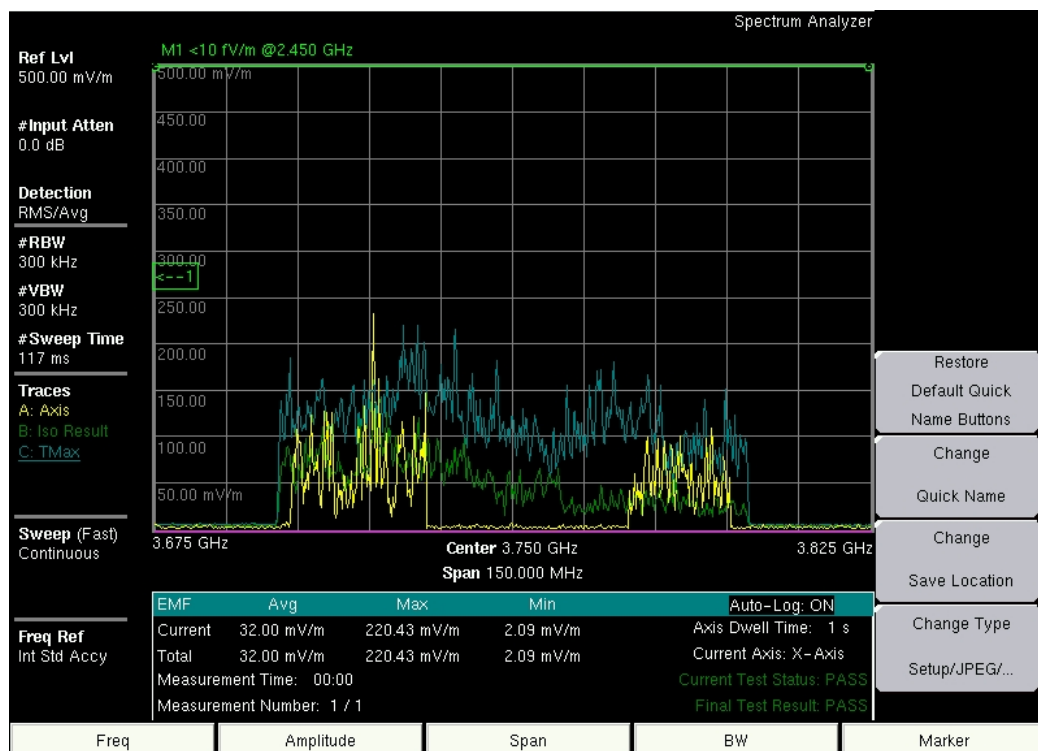
28. Ábra: Kódszelektív EMF mérés közvetlen adatforgalom nélkül

A mérés esetén a bázisállomás extrapolációval becsült maximális expozíció szintje 0.386 V/m, ami -4.031 dBm/m² ez az érték jóval alacsonyabb az ICNIRP által ajánlott limithez képest. Ebben az esetben is igaz, a pontos expozíció értékéhez szükségesek a tényleges rendszer paraméterek. Emellett nem tekinthetünk el a mérési bizonytalanságtól sem. A frekvenciaszelektív és kódszelektív mérések adatforgalom nélküli esetben is eltérő eredményt hoztak, előbbi -2.266 dBm/m² utóbbi -4.0311 dB/m². Ez a körülbelül 2 dB eltérés elfogadhatónak mondható, látható, hogy közvetlen adatforgalom mellett és adatforgalom nélkül

is körülbelül 2-3 dB-es eltérés van a két mérésimódszer között. Összehasonlítva a frekvenciaszelektív PBCH blokk teljesítmény szintjét az aktuális dekódolt mérés eredményével látható, hogy körülbelül 4.3 dB-es eltérés van közte. Ebből az értékből is látszik, hogy a két mérés nem teljesen egyező értéket produkál. Ahogy a frekvenciaszelektív mérések esetén, úgy a kódszelektív mérések esetén is megfigyelhető, hogy a műszer melletti közvetlen adatforgalom generálás befolyásolja a szinkronizációs jelek teljesítmény szintjét is. Az értékek eltérése ez esetben kevesebb, 7,5%. Összeségében elmondható, hogy az adatforgalom általi várható expozíciós szint eltéréseket, mindkét vizsgálati módszer igazolta. Azonban ezek az eltérések az extrapolációhoz használt szinkronizációs jelek esetén minimálisnak mondhatók és ez a differencia az extrapolációt követően tovább degradálódik.

6.7 Frekvenciaszelektív vizsgálat nagy adatforgalom mellett 5G esetén

A vizsgálathoz ugyanazokat a műszer paramétereket használtam, mint a 4G esetén végzett frekvenciaszelektív mérések esetén, azonban ebben az esetben 5G képes készülékkel gerjesztettem nagy adatforgalmat a műszer közvetlen közelében. A vizsgálat esetén 3 Trace-t jelenítettem meg, sárga színnel az éppen aktuálisan mért értékeket ábrázoltattam, zöld színnel a 3 polarizációból átlagolt aktuális értékét és kék színnel a teljes mérési időre vett maximális értéket jelenítettem meg. A mérések kiértékelését mV/m-ben hajtottam végre. A vizsgálatot ez esetben is egyszer végeztem el 6 perces mérési idő mellett. Ahogy korábban az alapvető mérési paraméterek beállítása után bekapcsoltam a műszer EMF mérő funkcióját. Ezen belül a limitet az ICNIRP által ajánlott értékre állítottam.



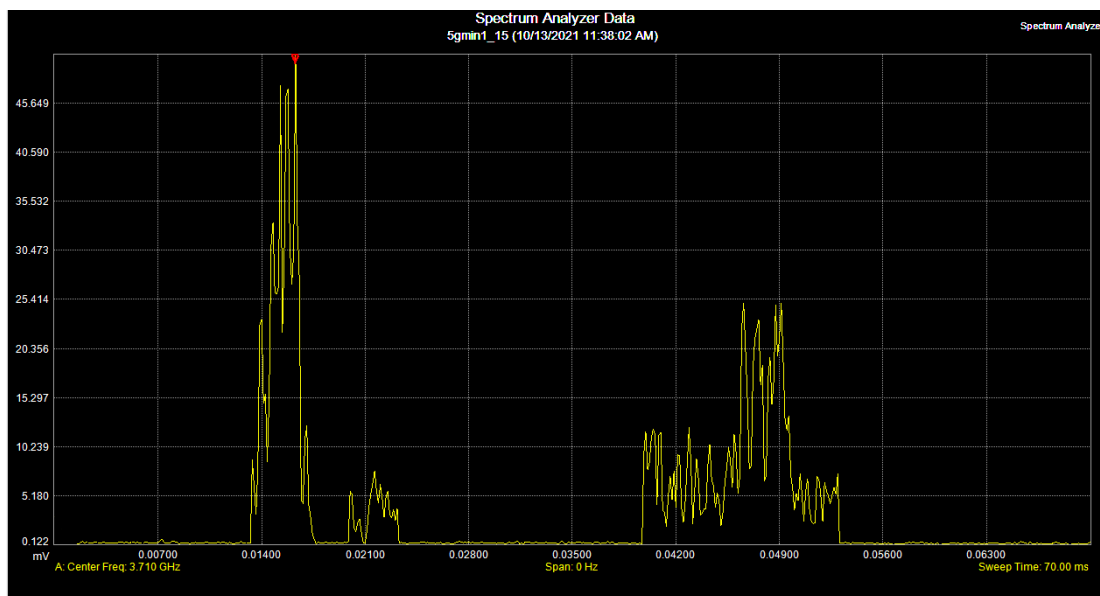
29. Ábra: Frekvenciaszelektív EMF mérés eredmények

Ahhoz, hogy a bázisállomás maximális expozíciós értékét megkapjuk a mért eredményt extrapolálni kell. Ehhez a mért csatorna alsó felében elhelyezkedő SS/PBCH blokk teljesítmény szintjét használtam, aminek átlagos értékét beírtam az ARPA Lazio kutatói által javasolt extrapolációs képletbe (7. Egyenlet).

$$E_{5G}^{max} = \sqrt{N_{SC}(B, \mu) F_{TDC} E_{RE}^{max}}$$

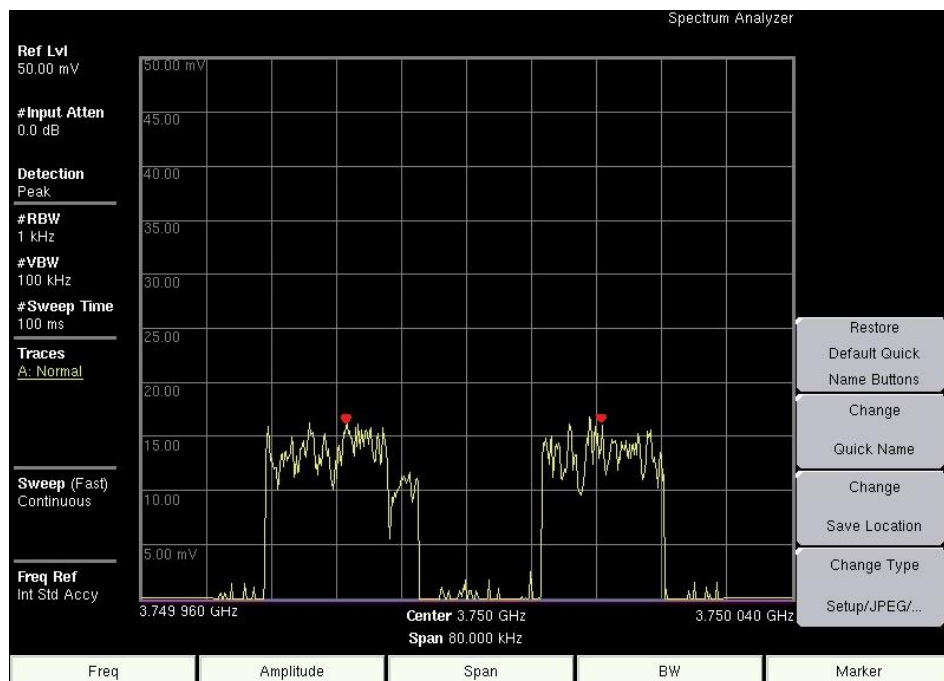
7. Egyenlet

Az egyenlet használatához szükséges paraméterek mérhetők, azonban igazán pontos értékeket a rendszerüzemeltetőtől kaphatunk.



30. Ábra: Frekvenciaszelektív SSB blokk térerősségének meghatározása

Az N_{SC} azaz az összes alvivő számának meghatározásához szükségem volt a sáv szélességre ez 100 MHz és az alvivők egymástól való távolságára. Ezt méréssel határoztam meg. Ebben az esetben a sáv közepét vizsgáltam 80 kHz-es spannal és alacsony felbontási sáv szélességgel. A kiértékeléshez markereket használtam és a kettő közti eltérésből megkaptam az alvivők távolságát. A kapott távolság 30 kHz, ebből következik, hogy N_{SC} értéke 3300. Ezt korrigáljuk a SS/PBCH blokk alvivő számával.



31. Ábra: Alvivők távolságának meghatározása

Az állomás TDD módban működik ezért szükséges F_{TDC} meghatározása. Ezt a paramétert a vizsgálat során forgalom gerjesztésre használt Nemo Handy segítségével határoztam meg. Ez a paraméter jelen esetben 0.5 értékű. Tehát az uplink és downlink irányú kommunikáció szimmetrikus. Ezt követően az E_{RE}^{max} értékét határoztam meg. Az imént kiértékelt SSB-k legnagyobb térerősség szintjeit használtam fel, ami 48.247 mV/m (30. Ábra), mellyel összehasonlítottam a maximális adatforgalom esetén mért térerősség szinteket, ami 220.43 mV/m (29. Ábra). A két érték számottevő eltérést mutat ezért belátható, hogy a signaling és traffic folyamatok más nyereségű nyalábon keresztül zajlanak. Ezért az E_{RE}^{max} értékét korrigálni kell a legmagasabb teljesítmény szintű SSB blokkok átlagával és Traffic channel teljesítményszintek arányával a 3. Egyenlet alapján, így 1.14. Az így kapott paraméterekkel végrehajtottam az extrapolációt, így a bázisállomás becsült maximális expozíció értéke 0.611 V/m, ami -0.042 dBm/m² felel meg. Ebben az esetben sem tekinthetünk el a mérési bizonytalanságtól és a frekvenciaszelektív mérési módszer esetleges túlbecslésétől sem. Ezek mellett kiemelhetők az új technológia hatásai, mint beamforming, beamsweeping és a burst szerű rendkívül nagy sebességű adatátvitel, melyek nagy mértékben befolyásolják a pillanatnyi térerősségszintek. Ezt jól tükrözi, hogy az SS/PBCH blokk zero spannal mért térerősségszintje, négy és félszeres eltérést mutat az aktuális átviteli csatorna teljesítményéhez képest. Azonban ezen hatás a korábban kiértékelt E_{RE}^{max} paraméterben korrigálásra került. Ezek a hatások rendkívül jól szemléltethetők egy összehasonlító elemzésben, melyben a nagy adatforgalom mellett végzett méréseket adatforgalom nélküli mérésekkel hasonlíthatók össze. Azonban erre jelenleg nem volt lehetőségem, mert az általam vizsgált NR bázisállomás non-standalone 5G állomás. Így adatforgalom nélkül az állomás 4G kapcsolatot létesít a mobileszközzel.

7 Összegzés

A gyakorlati mérések alapján elmondható, hogy a korábbi technológia (4G) esetén is az extrapolációval becsült maximális bázisállomás expozíció érték meghatározása bizonytalan. Ez esetben is nagy mértékben függött a vizsgálat eredménye attól, hogy a mérőműszer közvetlen környezetében elhelyeztem egy nagy adatforgalmú mobil eszközt vagy nem, azonban a megfelelő referenciajellel és az extrapoláció alkalmazásával bizonyos mérési bizonytalanság mellett a frekvenciaszelektív módszer alkalmazható bázisállomási expozíció vizsgálatokhoz. Ugyanis látható, hogy a frekvenciaszelektív EMF mérések átlag térerősségértéke közel megegyezik a használt PBCH és SS/PBCH referencia jelek térerősségértékével. Azonban nem megfelelő referenciaérték, például a frekvenciaszelektív mérések maximális térerősségszintjének használata az extrapolációhoz, egy nagyon túlbecsült expozíció értéket ad eredményül. Ez a hatás az 5G NR (New Radio) bázisállomások esetén nagyobb különbséget okoz tekintve, hogy 4G esetén nem alkalmazunk beamformingot sem beamsweepinget, kisebb az átviteli sebesség és az NR-ben kevesebb olyan cella referenciajel van, melyet az állomás állandó teljesítményszinten sugároz. Az átviteli sebesség azért folyásólhatja be az eredményeket, mert 5G esetén a nagy átviteli sebességnek köszönhet előfordul, hogy a hálózat lassabban pufferelem az adatot, így rövid idő alatt nagy adatmennyiséget viszünk át az RF csatornán, azonban ezt követően a pufferelemési idő végéig minimálisat. Ez a sugárzott teljesítményszintben is ingadozást okozhat. Tapasztalható, hogy a NR hálózat magas átviteli sebességei miatt, a forgalmi csatornák teljesítmény szintje rendkívül ingadozó, ezek extrapolációhoz való használata egy JPerf-el gerjesztett állandó maximális forgalom esetén jóval túlbecsüli a tényleges expozíció szintet, azonban átlagos forgalom esetén a burst szerű átvitel miatt alul becsüli azt. Ezek mellett, kitűnt a két mérési módszer közti különbség, ez feltehetően a NR esetén is jelen lesz. Az extrapolációból származó bizonytalanság is fellelhető, azonban esetemben ezt főként a becsült rendszerinformációk okozták, de az új mobiltechnológiában ez a bizonytalanság jelenleg még nagyobb mértékű. Fontos a megfelelő tényezők megállapítása, melyeket az egyenletben alkalmazunk, ahogy a megfelelő referencia jel kiválasztása is. Ennek kapcsán a műszergyártók próbálják megtalálni a megfelelő mérési eljárást és elkészíteni a vizsgálathoz szükséges mérőműszert. A vizsgálati eredmények alapján a bázisállomások által okozott elektromágneses kitettség értéke megfelelő. Mindkét mérési eljárás esetén a mért teljesítménysűrűség jóval az ICNIRP által ajánlott limit érték alatt van.

A jövőben új vizsgálati eljárás eredményeit szeretném összevetni az eddigi eredményeimmel. Az egyik esetben egy eszközzel átlagos adatforgalmat generálnék a mérőműszer környezetében, ezzel értékelve a felhasználókat érő átlagos expozíció értéket, mert úgy vélem a NR rendszer burst szerű adatátvitel miatt az átlagos expozíció érték alacsonyabb, mint LTE rendszer esetén. Másik esetben több eszközzel generálnék átlagos adatforgalmat, így szimulálva egy csoportot érő térerősségértékeket. Ezt követően ezeket a vizsgálatokat működő standalone NR bázisállomáson végezném el, ebben az esetben pedig már a forgalom nélküli vizsgálatok is elvégezhetők, közvetlen az 5G signaling jelfolyamát vizsgálva. Ezeket a méréseket kódszelektív eljárással is elvégezném, ezáltal összehasonlítnám a két eljárás közti különbséget és eltérés nagyságát. Azonban jelenleg a műszergyártók még dolgoznak a pontos, hiteles eljárásokon a NR kódszelektív vizsgálatához. Ezt követően komplex vizsgálatokat végeznék az állomásokon, amely során az átlagos expozíció értékeket határoznám meg adott cella területén, melyben együttesen értékelném ki a NR és LTE rendszerek emberi expozíciós hatását. Ehhez több készülék segítségével egyszerre kommunikálnék 4G és 5G hálózaton, majd méréseket végeznék szélessávú mérővel és szelektív mérőkkel egyaránt. Ezzel kiértékelve a teljesen általános térerősségértékeket, amelyeket összevetnék a sávra vonatkozó limit értékekkel.

8 Irodalomjegyzék

- [1] Walter, „A digitális műsorszórás alapjai,” 2005.
- [2] Fahad, „Method Analysis For The Measurement Of Electromagnetic Field From LTE Base Stations,” 2017.
- [3] Sergey, „Measurment Techniques,” 2020.
- [4] Cetin and Mutlu, „Comprehensive radiofrequency electromagnetic field measurements and assessments: a city center example,” 2020.
- [5] Matthias, „Measuring RF Electromagnetic Fields,” 2019.
- [6] Magyar Szabványügyi Testület, „MSZ EN 62232:2018 Determination of RF field strength, power density and SAR in vicinity of radiocommunication base station for the purpose of evaluating human exposure,” 2018.
- [7] Gajsek et. al., „Mathematical Modeling of EMF Energy Absorption in Biological Systems,” 2003.
- [8] Reiner, „5G EMF Measurment Aspects,” 2020.
- [9] IEEE Access, „A Theoretical and Experimental Investigation on the Measurement of the Electromagnetic Field Level Radiated by 5G Base Stations,” 2020.
- [10] Helth Phys, „ICNIRP Guidelines For Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100kHz to 300GHz),” 2020.
- [11] International Electrotechnical Comission, „prEN IEC 62232:2021 Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure,” 2021.
- [12] IEEE Access, „A Comparison Between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna,” 2019.
- [13] Deniele et. al., „A Comparison Between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna,” 2020.
- [14] Narda Safety Test Solutions GmbH, „Nardalert S3 Operating Manual,” 2019.
- [15] Narda, „5G in a Nutshell,” 2020.

- [16] Stratakis et. al., „Measurements on Modern Wireless Communication Technologies and Estimation of Human Exposure,” 2014.
- [17] f

9 Ábrajegyzék

- [1] Matthias, „Measuring RF Electromagnetic Fields,” 2019.
- [2] Deniele et. al., „A Comparison Between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna,” 2020.
- [3] Narda, „5G in a Nutshell,” 2020.
- [online] <https://www.narda-sts.com/en/applicationstechnology/knowledge/5g-measurement-method-published/>
- [4] Narda Safety Test Solutions GmbH, „Nardalert S3 Operating Manual,” 2019.
- [5] Anritsu, „Spectrum Master User Guide MS2720T,” 2020
- [online] <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Manuals/Users-Guide/10580-00340N.pdf>

10 Mellékletek

I. Melléklet: Anritsu mérési fájlok (Anritsu_meas.rar)