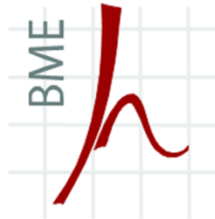




Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem



Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék



Mobil Kommunikáció és Kvantumtechnológiák Laboratórium

Jegyzet (részlet)

Mobil kommunikációs hálózatok

Készítette:

Gódor Győző

Dr. Jakó Zoltán

Knapp Ádám

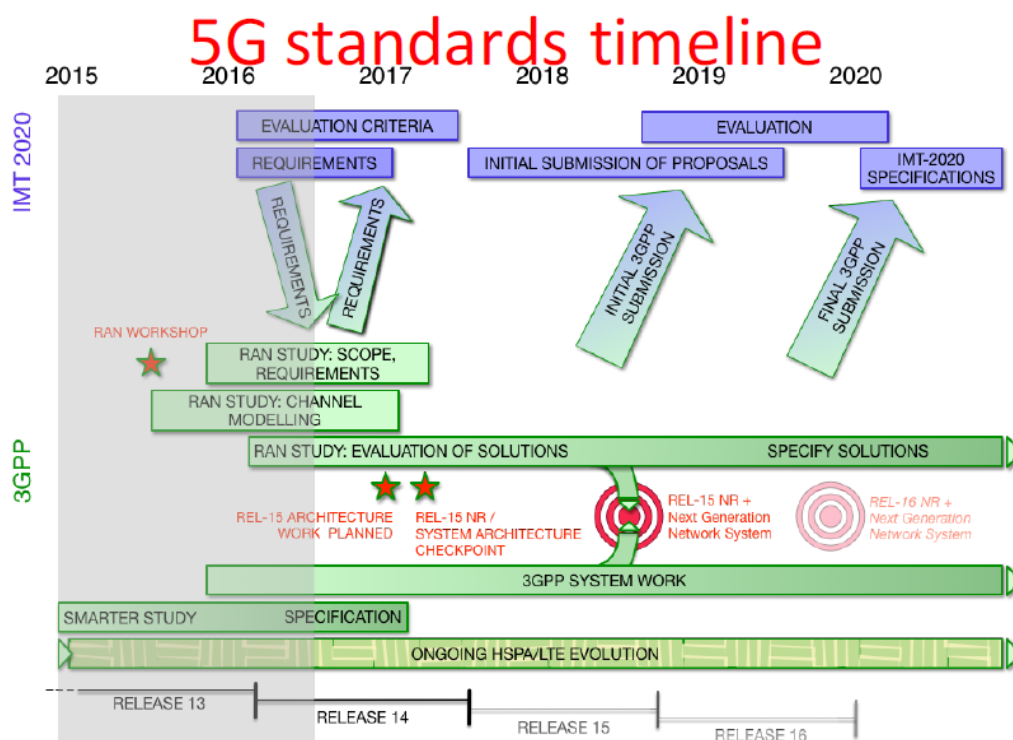
2018. november 28.

1 A jövő mobil hálózatai, 5G

Jelen fejezetben egy rövid kitekintést adunk a jövő mobil hálózataira, illetve bemutatjuk azokat az ígéretes technológiákat, amelyeket a jövő mobil hálózataiban alkalmazni fognak. A jegyzet írásakor az 5G-s hálózatok szabványosítása még zajlott, így a bemutatott újítások a szabvány jelenlegi (2018.08.) állapotát tükrözik. A fejezetben szót ejtünk a felhő alapú hozzáférési hálózatról, illetve a masszív MIMO rendszerekről, továbbá a látható fényt használó rendszerekről, mint például Li-Fi.

1.1 5G hálózatok, a szabványosítás jelenlegi állapota

Az 5G szabványosítását az IMT2020 projekt keretében valósítják meg. A folyamat 2016-ban kezdődött és a tervek szerint 2020-ban indulnak el az első közcélú 5G-s mobil hálózatok. A szabványosításban a 3GPP is aktívan részt vesz, az IMT2020 projekt célkitűzéseit figyelembe véve. A szabványosítás több körben ún. „release”-ek, azaz szabványgyűjtemények kiadásával történik. Az 5G szabványosítás idővonala a 01. ábrán látható.



1. ábra: Az 5G-s hálózatok szabványosítása (2018)

Az 5G szabványosítása során három követelmény típust, „profil” fogalmaztak meg:

1. eMBB (enhanced Mobile Broadband),
2. URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications),
3. mMTC (massive Machine Type Communications).

Az 5G-s hálózatoknak, hogy megfeleljenek a fent említett profiloknak, erős követelményeket kell kielégíteniük. Ezeket a követelményeket a 01 táblázatban foglaltuk össze.

1. táblázat: 5G-s követelmények

Felhasználói adatsebesség	<ul style="list-style-type: none"> DL: 100 Mbps – 1 Gbps UL: 50 Mbps – 500 Mbps
Max. adatsebesség	<ul style="list-style-type: none"> DL: 20 Gbps UL: 10 Gbps
Max. spektrális hatékonyság	<ul style="list-style-type: none"> DL: 30 bit/s/Hz UL: 15 bit/s/Hz
Sáv szélesség	100 MHz – 1 GHz
Mobilitás	500 km/h-ig
Késleltetés	<ul style="list-style-type: none"> URLLC: 0.5 ms (rádiós interfészen) eMBB: 4 ms (rádiós interfészen)
Kapcsolat sűrűség	250 000 felhasználó/km ²
Energia hatékonyság	100x IMT-Advanced
Területi forgalmi kapacitás	15 Mbps/m ²

1.2 5G NR architektúra

Az 5G-s architektúra két fő részből tevődik össze. Ez az 5GC – 5G Core Network (azaz a maghálózat) és az NG-RAN (New Radio, „új rádiós”, hozzáférési hálózat). Az 5G-s hálózatokban az alábbi alapelvek és koncepciók kerültek középpontba:

- Felhasználói sík (User Plane – UP) és vezérlő sík (Control Plane – CP) funkcióinak szétválasztása, ami független skálázhatóságot, fejlődést és rugalmas telepítést tesz lehetővé.
- Moduláris funkció tervezés (pl. hálózati szeletek – network slicing).
- A folyamatok szolgáltatásokként való definiálása (ha lehet), így az újrafelhasználásuk egyszerűbbé válik.
- Függségek minimalizálása a hozzáférési hálózat és a maghálózat között.
- A hálózati funkciók közvetlenül más hálózati funkciókkal is együttműködhetnek, ha szükséges.
- Egységesített hitelesítési keretrendszer támogatása.
- „Állapotmentes” hálózati funkciók támogatása, amikben a számítási erőforrás el van választva a tárolási erőforrástól.

- Képesség felderítés támogatása.
- Egyidejű hozzáférés a helyi és központi szolgáltatásokhoz. UP funkciók a hozzáférési hálózatba is telepíthetők az alacsony késleltetésű szolgáltatások és lokális adatok miatt.

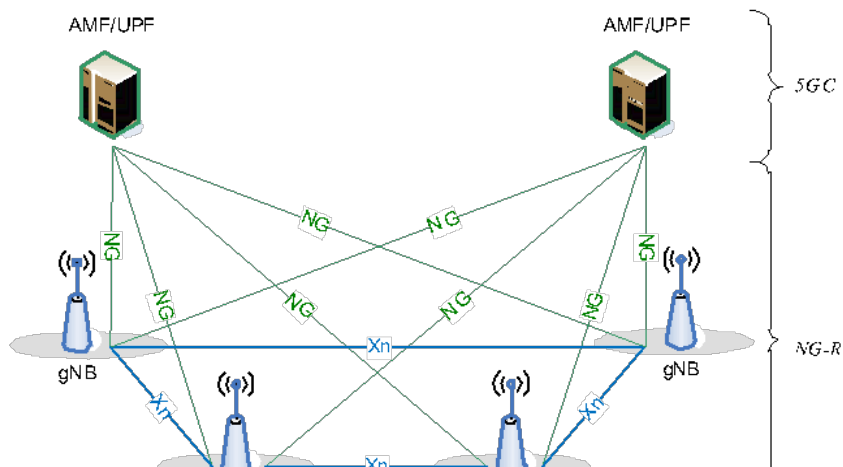
A jegyzetben főleg a NR hozzáférési hálózattal foglalkozunk, de röviden a maghálózatot is bemutatjuk. A maghálózatban entitások találhatóak, amelyek az alábbi funkciókat valósítják meg:

- **AMF:** Access and Mobility Management Function,
- **UPF:** User Plane Function,
- **SMF:** Session Management Function.

Az Access and Mobility Management Function (AMF) feladati közé tartozik a NAS, azaz az UE és az AMF között zajló jelzésüzenetek kezelése és biztonságossá tétele (pl. hitelesítés), továbbá az AS, azaz az UE és a bázisállomás között zajló jelzésüzenetek biztonságossá tétele. Az AMF felel a mobilitási jelzés üzenetek kezeléséért és a rendszeren belüli, valamint rendszerek közötti mobilitás támogatásért, mint például paging üzenetek vezérlése, tétlen állapotú UE-k felderítése.

A User Plane Function (UPF) feladata a horgony pont biztosítása, hiszen az UPF egy adathálózati átjáró, így részt vesz a csomagok irányításában és továbbításában. Az UPF feladata továbbá a QoS szabályok kezelése, betartatása és az adatforgalom nyilvántartása.

A Session Management Function (SMF) feladata a session-ök kezelése, IP cím kiosztás az UE-k számára, illetve az IP címek menedzselése. Természetesen az SMF is részt vesz a QoS és szabályok érvényesítésében.



2. ábra: 5G architektúra

Ahogy a 02. ábrán is láthatjuk, az egyes entitások között az alábbi (logikai) interfészek teremtik meg a kapcsolatot:

- **Xn interfész:** gNB és ng-eNB között,
- **NG interfész:** 5G core és RAN elemek (gNB, ng-eNB) között.

A hozzáférési hálózatban (NG-RAN) két féle entitás található: a ng-NB és a gNB. Látható, hogy a szabvány két NodeB típust említ:

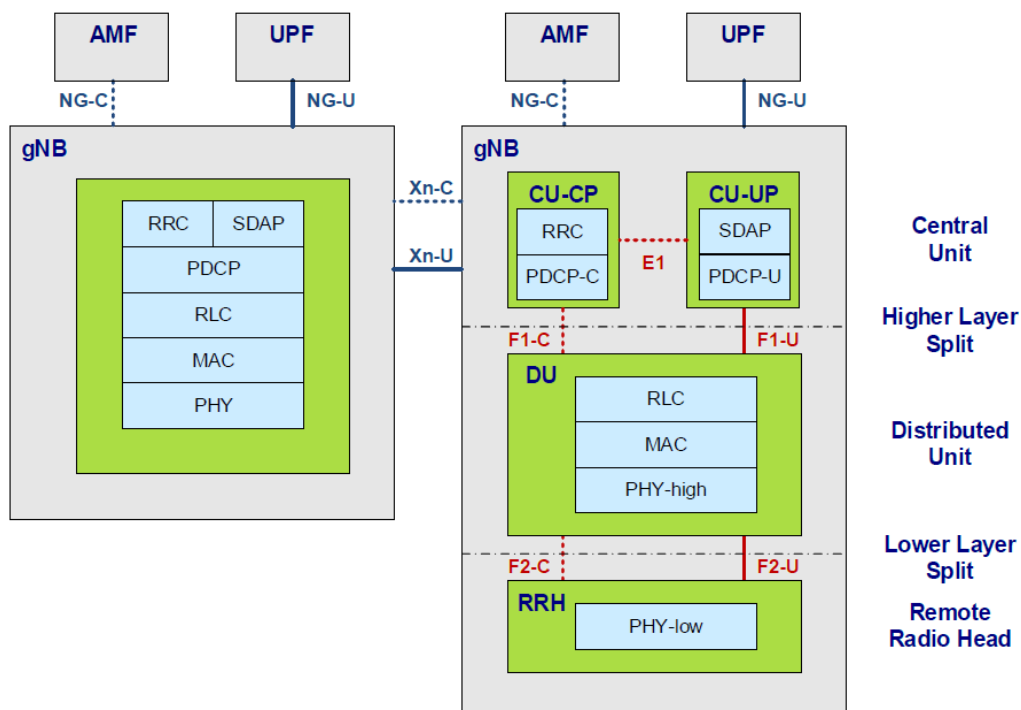
- ng-eNB: ez a „hagyományos” 4G-s (LTE Release 15-nek eleget tevő) NodeB. Ez a fajta NodeB nem tudja a NR-t, E-UTRA hozzáférést biztosít a mobiloknak.
- gNB: a valóban 5G-s NodeB, NR-t is tud kezelni.

A NodeB-k funkcióikat tekintve nem térnek el a korábbi 4G-s szerepüktől. A NodeB-k feladatai közt szerepel a rádiós erőforrás menedzsment, azaz rádiós vivők vezérlése, rádiós hozzáférés vezérlése, kapcsolati mobilitás vezérlés, ütemezés, paging, broadcast információk sugárzása, kapcsolat fel- és leépítés stb. Itt történik az IP fejléc tömörítése, az adatok titkosítása is. A NodeB szállítja a felhasználói sík adatait az UPF-nek, illetve a jelzés adatokat az AMF-nek.

1.2.1.1 gNb felépítése

A gNB felépítése kicsit eltér a „hagyományos” eNB-től, ugyanis többféle logikai egységből állhat össze, amit a 3. ábra illusztrál:

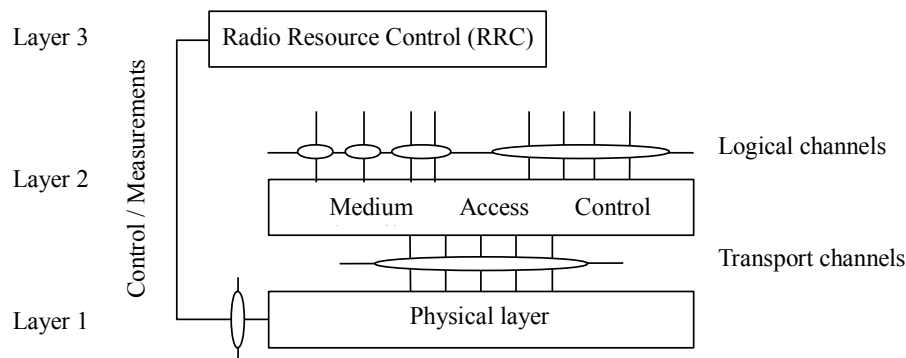
- Központi egység (Central Unit – CU),
- Elosztott egység (Distributed Unit – DU),
- Távoli fejegység (Remote Radio Heads – RRH).



3. ábra: gNB felépítése

Az egyes logikai egységek között az F1 és F2 interfészek teremtik meg a kapcsolatot. Az operátorok azt javasolják, hogy a 3GPP szabványosítsa az F1 és F2 interfészeket, hogy a többgyártós környezetnek kedvezzenek. Ugyanis előfordulhat, hogy a gNB központi egységét és a távoli fejegységet két különböző gyártó készíti, ilyenkor pedig a szabványos interfészek biztosítják a kompatibilitást és együttműködést az eszközök között.

A rádiós interfész az 1, 2 és 3. rétegből tevődik össze akárcsak az LTE-ben. Az első réteg a fizikai réteg, a második réteg a közeghozzáférési (MAC) réteg és a harmadik réteg a rádiós erőforrás kezeléséért felelős RRC réteg, ahogy a 04. ábrán is látható.



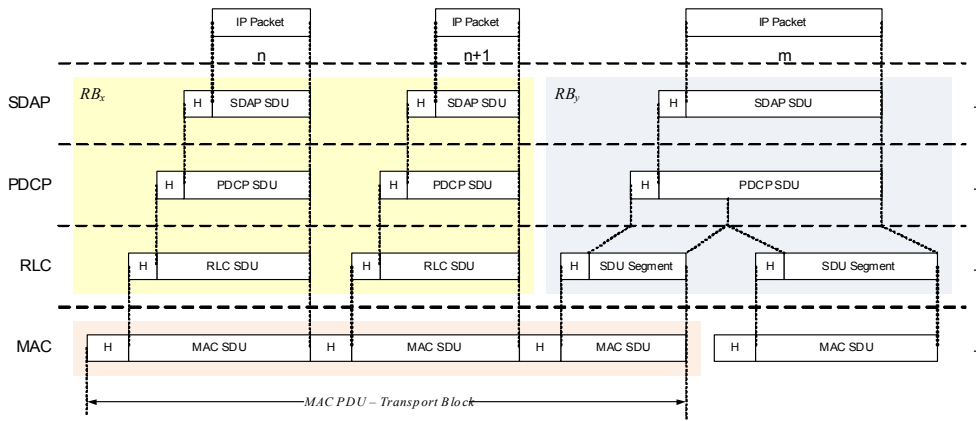
4. ábra: Rádiós interfész felépítése

A fenti ábra egy általános rádiós interfész felépítését mutatta be. A fizikai réteggel (Layer 1) később foglalkozunk részletesen, ezért most rögtön a második réteggel kezdünk. A második réteg az 5G-ben az alábbi részekből tevődik össze:

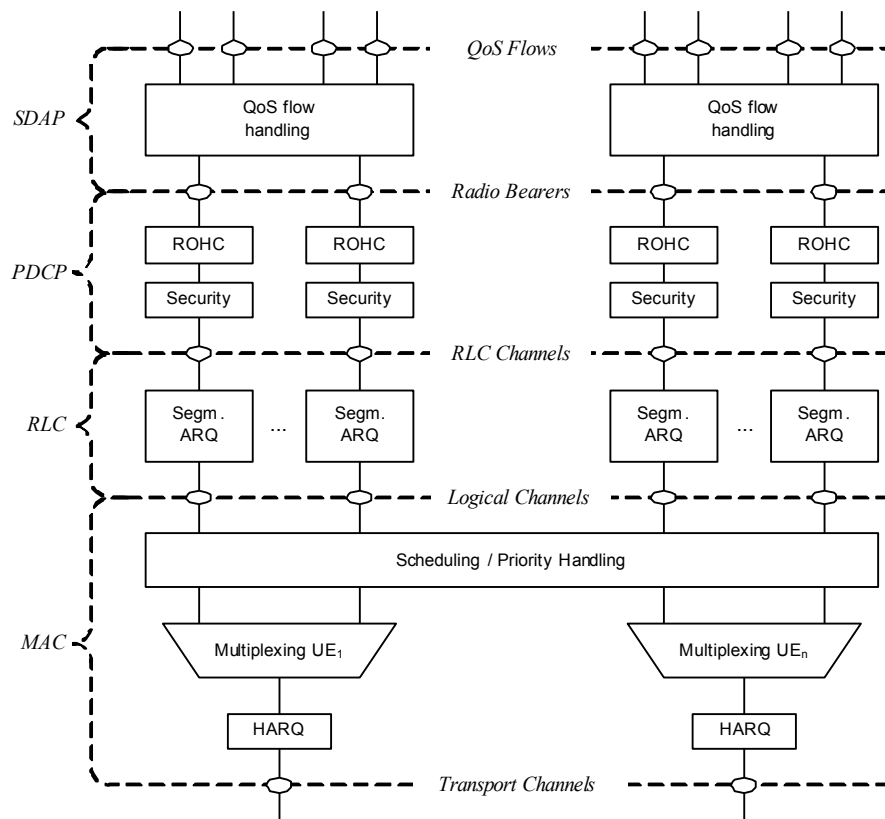
1. **Medium Access Control (MAC):** feladata a logikai csatornák és transzport csatornák közti leképzés megvalósítása. Felelős az adatcsomagok multiplexálásáért/de-multiplexálásáért, illetve a transzport blokkok összeállításáért. Az ütemezési információk jelentése és a hibajavítás (HARQ) is a feladatai közé tartozik, illetve a dinamikus ütemezés megvalósítása.
2. **Radio Link Control (RLC):** feladata a csomagok sorrend helyességének beállítása (szekvencia szám kiosztás), ARQ hibajavítás. Ugyanakkor, ellentétben az LTE-vel, ennek a rétegnek nem feladata a csomag újra rendezés (reordering), illetve a csomag összefűzés (concatenation).
3. **Packet Data Convergence Protocol (PDCP):** feladata a duplikált csomagok kiszűrése, csomag újra rendezés (reordering), illetve a csomag összefűzés (concatenation) és fejléc tömörítés (ROHC).
4. **Service Data Adaptation Protocol (SDAP):** A QoS betartásáért felelős funkció.

Nézzük meg, hogyan történik az 5G-ben az adatok továbbítása az egyes rétegek között:

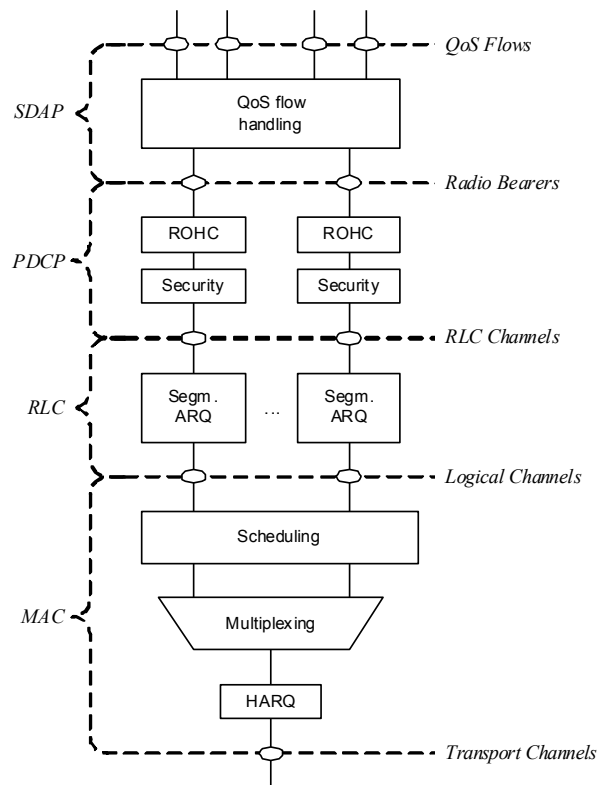
A 05-07. ábrák az adatok továbbítását mutatják be az 5G NR-ben az imént említett funkciók és rétegek között.



5. ábra: 5G adat áramlás



6. ábra: 5G NR downlink 2. réteg struktúrája



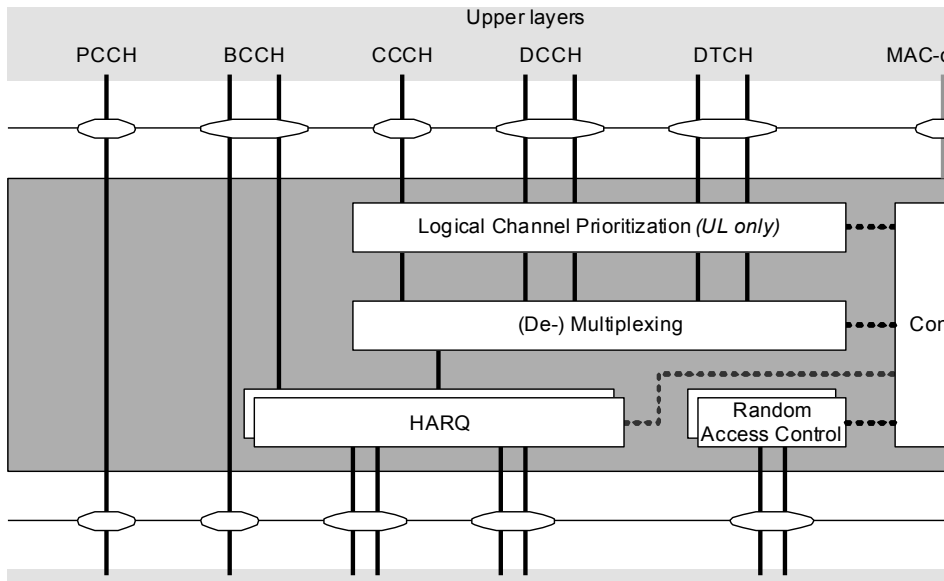
7. ábra: 5G NR uplink 2. réteg struktúrája

1.2.1.2 Logikai csatornák az 5G-ben

Mielőtt rátérnénk a NR újdonságaira, bemutatjuk a logikai csatornákat is. A MAC réteg feladata a fizikai csatornák logikai csatornákra történő leképzése. Az 5G-ben (hasonlóan a 4G-hez) az alábbi logikai csatornákat definiálták:

- Broadcast Control Channel (BCCH),
- Paging Control Channel (PCCH),
- Common Control Channel (CCCH),
- Dedicated Control Channel (DCCH),
- Dedicated Traffic Channel (DTCH).

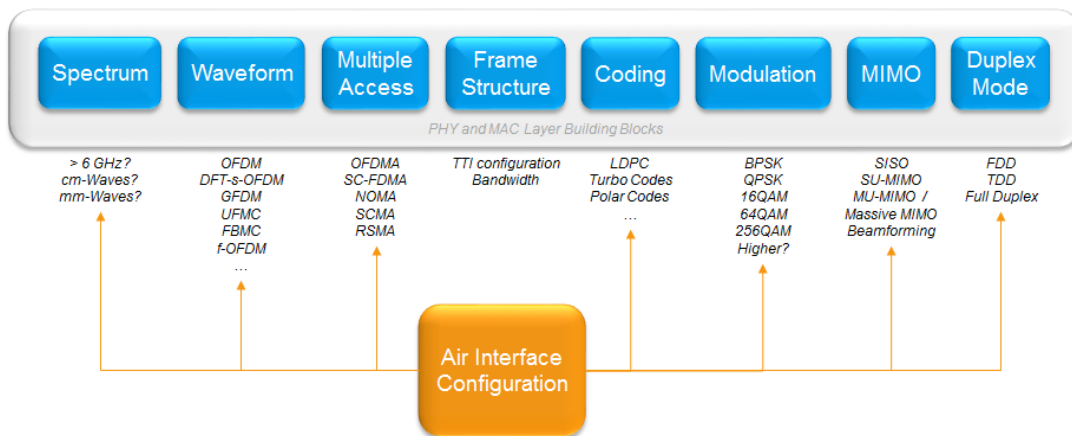
A logikai- és fizikai csatornák közti leképzés a 08. ábrán látható.



8. ábra: Logikai csatornák az 5G-ben (MAC réteg)

1.2.1.3 5G NR – New radio

A NR nyújtotta újítások mindhárom rétegben megtalálhatóak, ennél fogva külön tárgyaljuk az egyes rétegekben lévő újításokat. A NR újításait a 09. ábra foglalja össze.

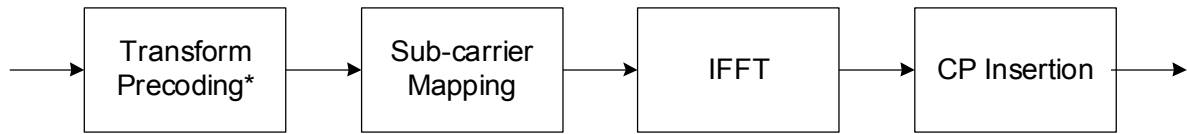


9. ábra: 5G NR újításai

Az NR vivőfrekvenciája a 1-100GHz-es tartományban működhet. Több új frekvenciasáv kerül bevezetésre, ezeket két fő csoportba soroljuk, attól függően, hogy 6GHz alatt vagy felett van a vivőjük. Utóbbiak az milliméteres hullámhosszúságba eső sávok, azaz ún. mmWave frekvenciasávok.

A moduláció és a többszörös hozzáférési rendszer tekintetében nincs nagy eltérés az LTE-hez képest, továbbra is OFDM alapokon valósul meg. A szabványosítás korai szakaszában felmerült, hogy a hagyományos ciklikus prefixes OFDM (CP-OFDM) hullámformát lecserélik,

végül ezek a terveket elvetették és a CP-OFDM mellett döntöttek az 5G esetén is. A CP-OFDM működésének vázlata a 10. ábrán látható.



**Optionally present in UL, not present in DL*

10. ábra: 5G – CP-OFDM

Azért érdemes megjegyezni, hogy az 5G NR-ben alkalmazott CP-OFDM nem teljesen egyezik meg a 4G LTE-sel. A fő különbség az alvivők közti távolságban keresendő. Míg a 4G-s OFDM esetén a szabvány fix 15kHz-es alvivő távolságot ír elő, addig az 5G-ben az alvivőtávolság nem állandó, hanem 2 hatványai szerint multiplikálható. Ezt nevezi a szakirodalom numerológiának (numerology).

A modulációkban sincs számottevő változás, a korábban is bevált, LTE-ben alkalmazott modulációkat használja a NR is, mint például BPSK, QPSK, 16-64-256-1024QAM mind uplink, mind downlink irányban. Ugyanakkor jelentős a változás a keretstruktúrában, köszönhetően a numerológiának. Ezen kívül a 4G-ben a csatornakódoláshoz alkalmazott ún. Turbo kódok mellett megjelentek új kódolási eljárások, mint például a Polár kódolás és az LDPC (Low-density parity-check). További újdonságnak számít a Masszív MIMO, illetve a nyálábformálás megjelenése is az 5G-ben. Noha ezek a technológiák már az LTE-ben is léteztek, az 5G NR szabványosítása során nagyobb figyelmet kaptak.

1.2.1.4 Numerológia

A numerológia tehát a változatható alvivő távolságot jelenti. Az alap alvivő távolság az 5G-ben 15kHz. A skálázási faktor kettő hatvány 2^μ , ahol $\mu \in \{0, 1, \dots, 4\}$, vagyis az alvivő távolság pontos értéke: $15 \text{ KHz} * 2^\mu$. μ értékétől függően a legkisebb alvivő távolság 15 kHz, míg a legnagyobb alvivő távolság 480 kHz.

2. táblázat: 5G NR változatható alvivő távolságai

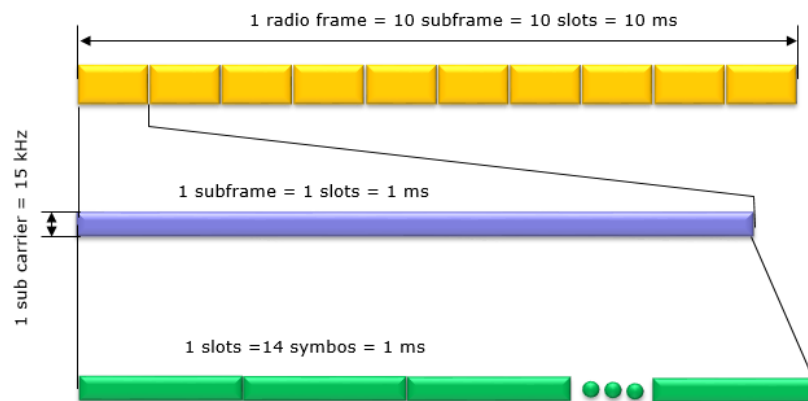
μ	15 KHz x 2^μ	Ciklikus prefix	Adatátvitelre támogatott?	Szinkronizációra támogatott?
0	15	Normál	Igen	Igen
1	30	Normál	Igen	Igen
2	60	Normál, Kiterjesztett	Igen	Nem
3	120	Normál	Igen	Igen
4	240	Normál	Nem	Igen

A keretstruktúra megegyezik az LTE keretstruktúra kialakítási elvével. Az egyetlen eltérést a numerológia bevezetése jelenti. Ugyanis a rádiós keret itt is 10ms hosszú és ugyanúgy 10

darab 1ms hosszú slot-ból áll össze. Abban az esetben, ha az alvivő távolság 15kHz, akkor 1 időrésben 14 szimbólum van és a 14 szimbólum hossza 1ms. A 11. ábra szemlélteti az 5G NR keretstruktúráját.

< 38.211 - v2.0.0 Table 4.3.2-1 >

μ	$N_{\text{slot}}^{\text{slot, symb}}$	$N_{\text{slot}}^{\text{frame, } \mu}$	$N_{\text{slot}}^{\text{subframe, } \mu}$
0	14	10	1
1	14	20	2
2	14	40	4
3	14	80	8
4	14	160	16
5	14	320	32

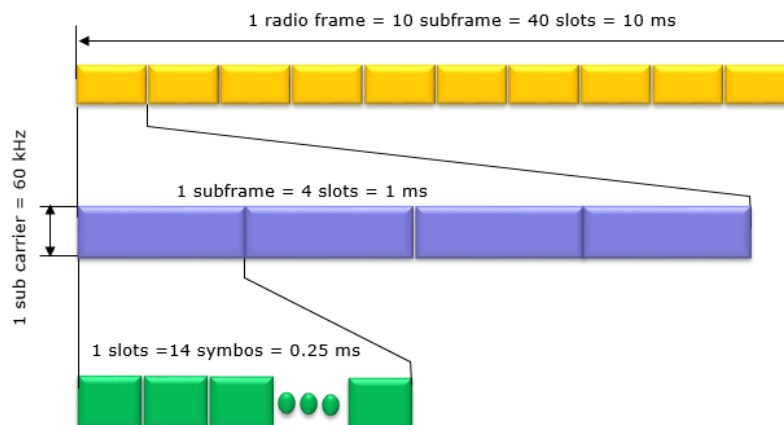


11. ábra: 5G keret struktúra – Numerológia ($\mu=0$)

Ugyanakkor, ha az alvivő távolság megnő, például 60kHz-re, akkor a 14 szimbólum hossza 0,25ms az 1ms helyett, ahogy a 12. ábra illusztrálja.

< 38.211 - v2.0.0 Table 4.3.2-1 >

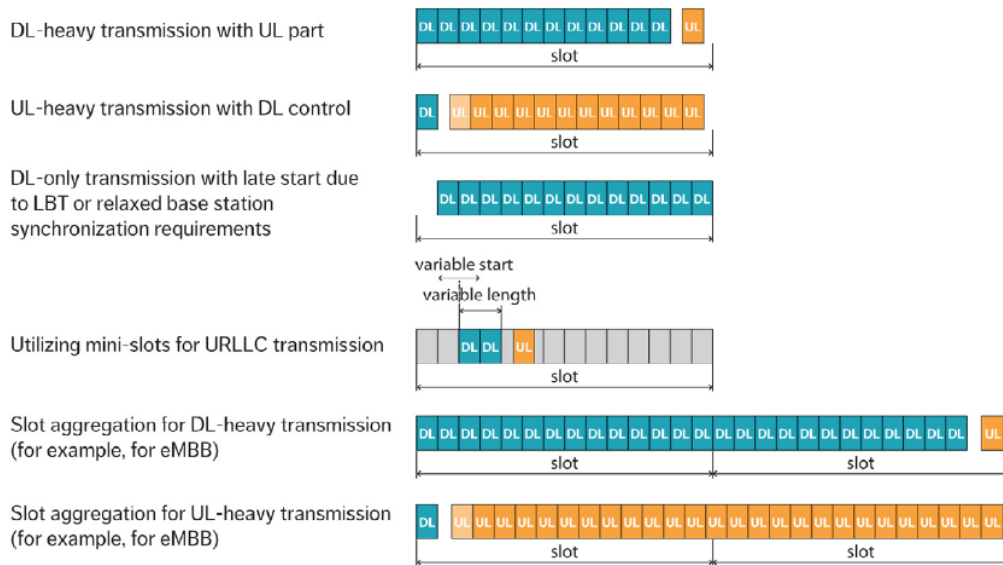
μ	$N_{\text{slot}}^{\text{slot, symb}}$	$N_{\text{slot}}^{\text{frame, } \mu}$	$N_{\text{slot}}^{\text{subframe, } \mu}$
0	14	10	1
1	14	20	2
2	14	40	4
3	14	80	8
4	14	160	16
5	14	320	32



12. ábra: 5G keret struktúra – Numerológia ($\mu=2$)

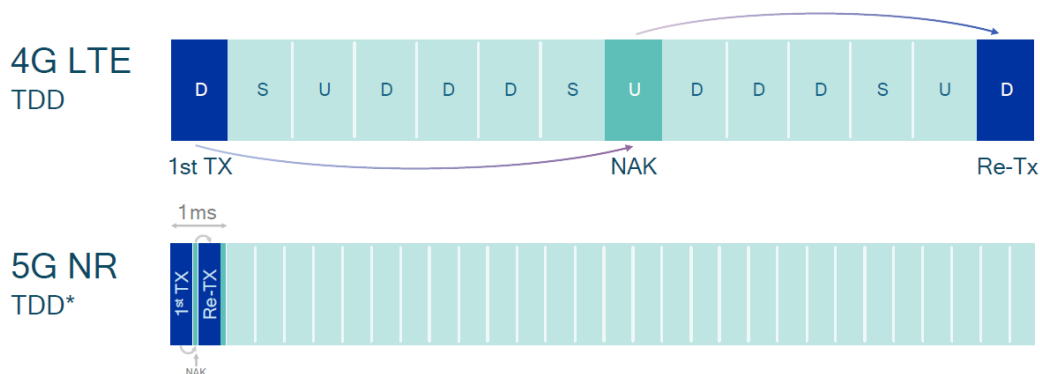
1.2.1.5 Időosztásos keret struktúra az 5G-ben

Az NR keretstruktúra támogatja a TDD és az FDD működési módot licenszelt és nem licenszelt frekvencia sávokon is. Néhány rövid példán keresztül bemutatjuk a TDD keretfeltöltés variánsait. A szabvány nagyfokú szabadságot ad a slot feltöltéséhez, például nagy downlink irányú kommunikáció esetén az időrés jelentős része downlink irányú, vagy fordítva jelentős uplink irányú forgalom esetén a slot többsége uplink irányú forgalmat szállít. Ez látható a 13. ábrán.



13. ábra: NR TDD keretstruktúra

A változtatható alvivő távolság (numerológia) egyik nagy előnye, hogy ha nagyobb az alvivőtávolság, akkor a sloton belül az OFDM szimbólumol ideje kisebb lesz. TDD üzemmódban ez a képesség kihasználható a hibás csomagok újraküldésének gyorsítására. Az LTE-ben egy TDD downlink esetén a hiba jelzésére (NACK) fix időrés volt dedikálva (uplink slot), majd az eNB ismét elküldte az adott csomagot pár slottal később. Viszont a numerológiának hála az 5G-ben (mivel kisebb az adott OFDM szimbólum idő) jóval hamarabb észlelhető a hiba és az újraküldés is sokkal hamarabb megtörténhet. Ezt a különbséget illusztrálja a 14. ábra.

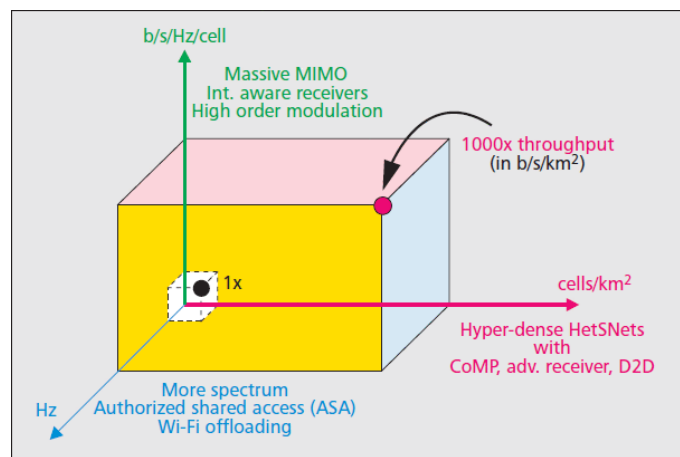


14. ábra: 4G LTE és az 5G NR nyugtázási mechanizmusa az alkeretben

1.3 Forgalmnövekedés, „kapacitás-kocka”: a kiszolgálás lehetséges módjai

A kapacitás kocka, mint absztrakt fogalom, nagyon jól szemlélteti a kapacitás bővítésének lehetséges irányvonalait. Ahogy az a 15. ábrán is látható, a kapacitás bővítésének lehetséges módjai a következők:

- cella szám növelése, szuper sűrű cella struktúra kialakítása;
- spektrális hatékonyság növelése: jobb modulációs eljárások alkalmazása, illetve Masszív MIMO alkalmazása;
- frekvenciasáv bővítése: együttműködés más rendszerekkel, pl.Wi-Fi-vel.



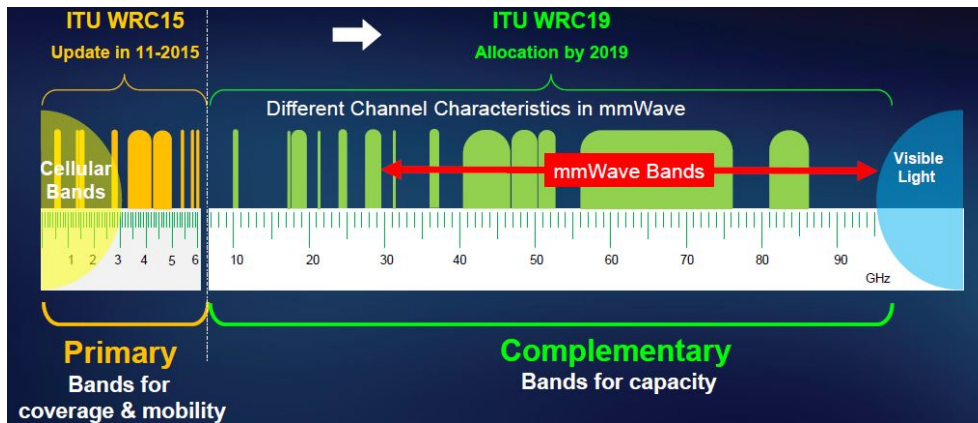
15. ábra: Kapacitáskocka

1.4 Attocellás hálózatok, magasabb sávokban

Ahogy arról már korábban írtunk, az 5G sok frekvenciasávon lesz képes üzemelni, amiket két kategóriára oszthatunk fel:

- **sub-6 GHz** frekvenciasávok, azaz 6 GHz alatt (450 MHz-6GHz),
- **mmWave** frekvenciasávok, azaz 6 GHz felett (24250MHz-52600MHz).

A 6GHz alatti sávok esetén a maximális sáv szélesség 100MHz. Továbbá az alábbi alvivő távolságokat lehet alkalmazni: 15 és 30kHz, illetve bizonyos esetekben 60kHz. A mmWave tartományban a maximális sáv szélesség 400MHz, ugyanakkor itt az engedélyezett alvivő távolságok 60, illetve 120kHz. Az 5G által használható frekvenciasávokat a 16 ábra mutatja.



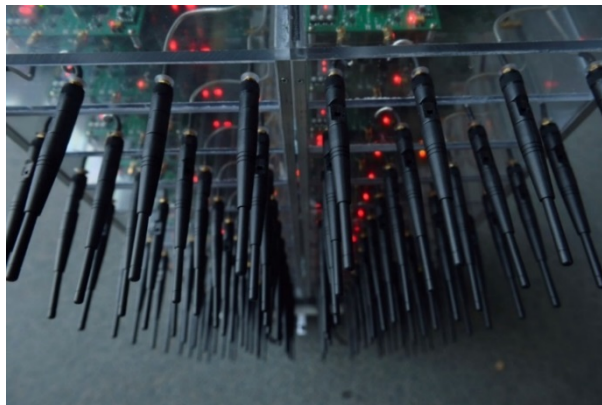
16. ábra: 5G-s frekvenciasávok

1.5 Masszív MIMO rendszerek; koordinált multipont átvitel; lehetőségek korlátai

Az 5G-s rendszerekben a Masszív MIMO és a koordinált multipont átvitel fontos szerephez jut. Ebben a fejezetben röviden bemutatjuk a két rendszer nyújtotta lehetőségeket, azok előnyeit és hátrányait.

1.5.1 Masszív MIMO

A Masszív MIMO (mMIMO) alatt olyan antenna rendszer kialakítást értünk, ahol a hálózatban résztvevő elemek, azaz bázisállomások jelentős számú, pl. 32, 64 vagy akár 128 antennával rendelkeznek. A mobil készülékek jellemzően kevesebb, 6, 8, vagy akár 16 darab antennát tartalmazhatnak. A szakirodalomban az adó- és vevő antennák számát fel szokták tüntetni, így pl. a 4x4 MIMO 4 darab adó és 4 darab vevő antennát tartalmaz.



17. ábra: Példa a Masszív MIMO rendszerre

Az ilyen nagyszámú antennát tartalmazó, több felhasználó kiszolgálására használt (MU-MIMO) rendszerekkel akár tízszer nagyobb rendszerszintű kapacitás érhető el, és akár 10 UE is képes ugyanazon a fizikai erőforráson kommunikálni. A Masszív MIMO számos előnnyel rendelkezik:

- nagy spektrális hatékonyság,
- nagy energia hatékonyság érhető el a mMIMO rendszerekkel,

- nagyobb megbízhatóság a több antennák köszönhetően,
- a felhasználók közti interferencia mértéke is alacsonyabb,
- könnyebb ütemezést megvalósítani,
- meghibásodás ellen jobban védett,
- olcsó antennákból is megépíthető.

Ugyanakkor a következő hátrányokkal, illetve nehézségekkel kell szembe nézni: ha nagyszámú adatfolyamot szeretnénk multiplexálni, nagyon jó csatornabecslésre van szükség minden antennapár között. Ez FDD-ben különösen sok overheadet jelent, emiatt sokan csak TDD-re vizionálják a sokszor sok antennás MIMO-s rendszereket. A pilot jelek miatt erőforrás „pazarlás” történik, ugyanis ezek csökkentik a felhasználói kommunikációra használható erőforrásokat. Ugyanakkor pilot szennyezés (interferencia) is történik a szomszédos cellák között, amire megoldás lehet a cellák közötti együttműködés (pl. a pilot jeleket együttesen ütemezik).

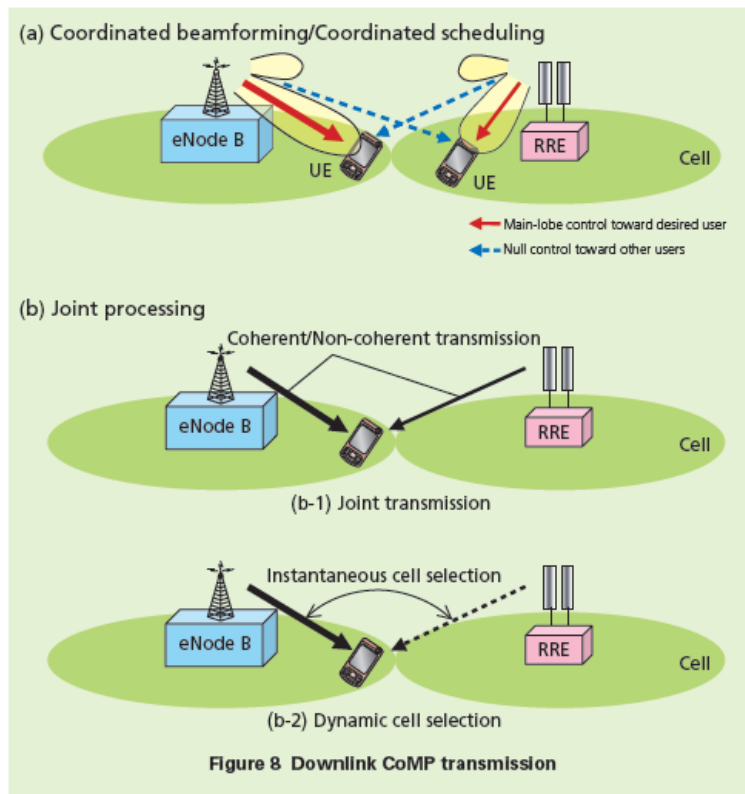
Az LTE szabványok az alábbi MIMO átviteli módokat támogatják (ezért valószínű, hogy hasonló lesz az 5G-ben is).

LTE Transmission mode	MIMO Scheme
Mode-1	single antenna transmission
Mode-2	transmit diversity
Mode-3	open loop codebook based pre-coding
Mode-4	closed loop codebook based pre-coding
Mode-5	Multuser MIMO version of transmission mode-4
Mode-6	single layer special case of closed loop codebook based pre-coding
Mode-7	release 8 non codebook based pre-coding supporting only single layer, based on beamforming
Mode-8	release 9 non codebook based pre-coding supporting upto 2 layers.
Mode-9	release 10 non codebook based pre-coding supporting upto 8 layers

18. ábra: Masszív MIMO módok

1.5.2 Coordinated MultiPoint (CoMP)

A koordinált multipont azt jelenti, hogy az adat és a csatorna állapot információk (CSI) megvannak osztva a szomszédos bázisállomások között azért, hogy koordinálni tudják a downlink átvitelt és az uplinken vett jeleket közösen dolgozzák fel. A koordinált ütemezés vagy nyalábformálás során az UE egy bázisállomással kommunikál mindkét irányba, de a vezérlési információk koordináltak a különböző elemek között. A közös feldolgozás során több, közösen koordinált BS kommunikál egy UE-vel párhuzamosan. Ezeket a módszereket illusztrálja a 19. ábra.



19. ábra: Koordinált multi-pont (CoMP) kommunikáció fajtái

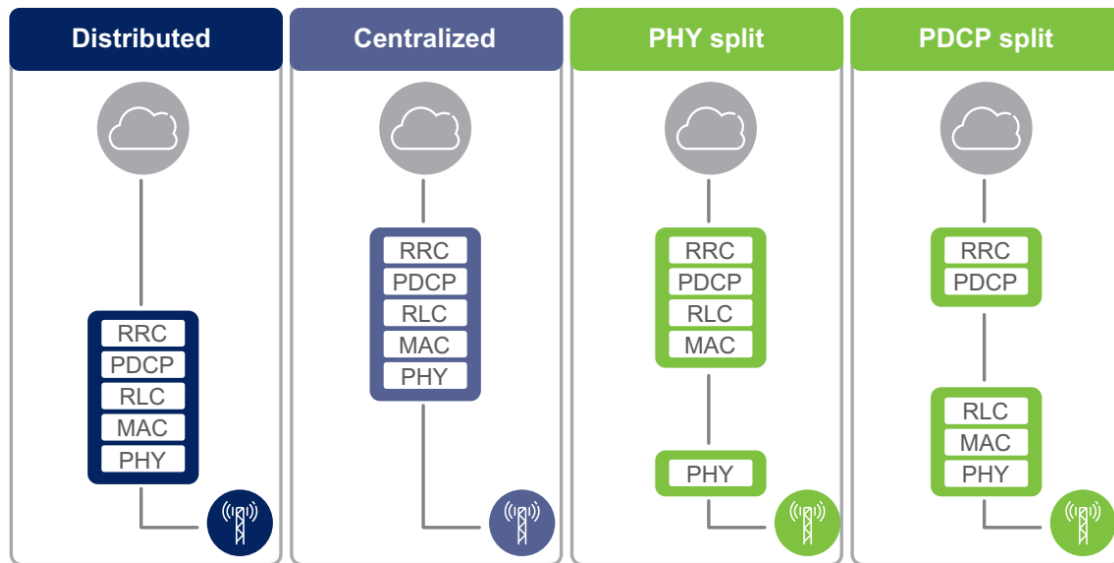
A CoMP előnye, hogy a hálózat jobb kihasználtságát teszi lehetővé azáltal, hogy egyszerre több BS-hez kapcsolódik az UE a CoMP segítségével, tehát az adatokat a legkevésbé terelt BS-ek felé lehet irányítani, így jobb erőforrás kihasználtságot elérve. A több bázisállomástól való vétel növeli a vett teljesítményt és a több BS-től való együttes vétel növeli az UE teljes vett teljesítményét, ugyanakkor csökkenti az interferenciát. A speciális kombinációs technikákkal ki lehet használni az interferenciát, ahelyett, hogy zavaró jelként kezelnék. Ezért az interferencia szintje is csökkenthető.

A CoMP hátránya, hogy pontos szinkronizációt igényel a hálózat elemei között, illetve a szükséges koordináció miatt hálózati overhead keletkezik.

1.5.3 Felhő alapú vagy központosított hozzáférési hálózat (Cloud/Centralized RAN)

A C-RAN (Cloud/Centralized RAN) egy valós idejű virtualizációs technológia. Az elosztott bázisállomás rendszer architektúrájának fejlődése során merült fel az igény a felhő alapú hozzáférési hálózatra. Az adatközpontok hálózati technológiájára épül, hogy alacsony költségű, nagy megbízhatóságú, alacsony késleltetésű és nagy sávszélességű hálózatot biztosítson a BBU-k számára.

A 20. ábra különböző példákat mutat be a rádiós hozzáférési protokoll réteg funkcionális felosztására C-RAN-ban.



20. ábra: C-RAN példa

A C-RAN előnye, hogy egységes hardvert biztosít számos alkalmazáshoz, az üzemeltetéshez egyféle ember kell, tartalékba egyféle kártya szükséges. Egységesíthető a felügyelet és a hibajelések kezelése. További nagy előnye, hogy a hardverbővítés is egyszerűbben megoldható, ugyanakkor nem szükségszerű, hogy egy gyártótól származzon a hardver köszönhetően a szabványosított hardver architektúrájának.

Szoftveresen elvégezhető több rádiós interfész futtatása (pl. 3G, LTE ugyanazon a hardveren) vagy új rádiós interfész feature (legalábbis egy részének a) bevezetése. Sokkal egyszerűbbé válik a konfigurálás és az új kapacitás hozzáadása, például ha új RRH-t telepítünk.

Ugyanakkor a C-RAN miatt nagyon nagy fronthaul kapacitás kell, hiszen nem ugyanannyi, mintha az RRH helyére egy teljes bázisállomást tennénk, hiszen a CPRI-n már a rádiós minták mennek digitalizálva. Emiatt késleltetés és szinkronizációs problémák adódhatnak a PHY teteje és a PHY alja közé (hiszen hálózat van közte).

Bizonyos rádiós eljárásoknál (pl. CoMP, vagy elosztott MIMO), amelyek különböző, egymástól távolabb lévő antenna együttműködését kívánják, nagyon nagyfokú szinkronizáció szükséges.

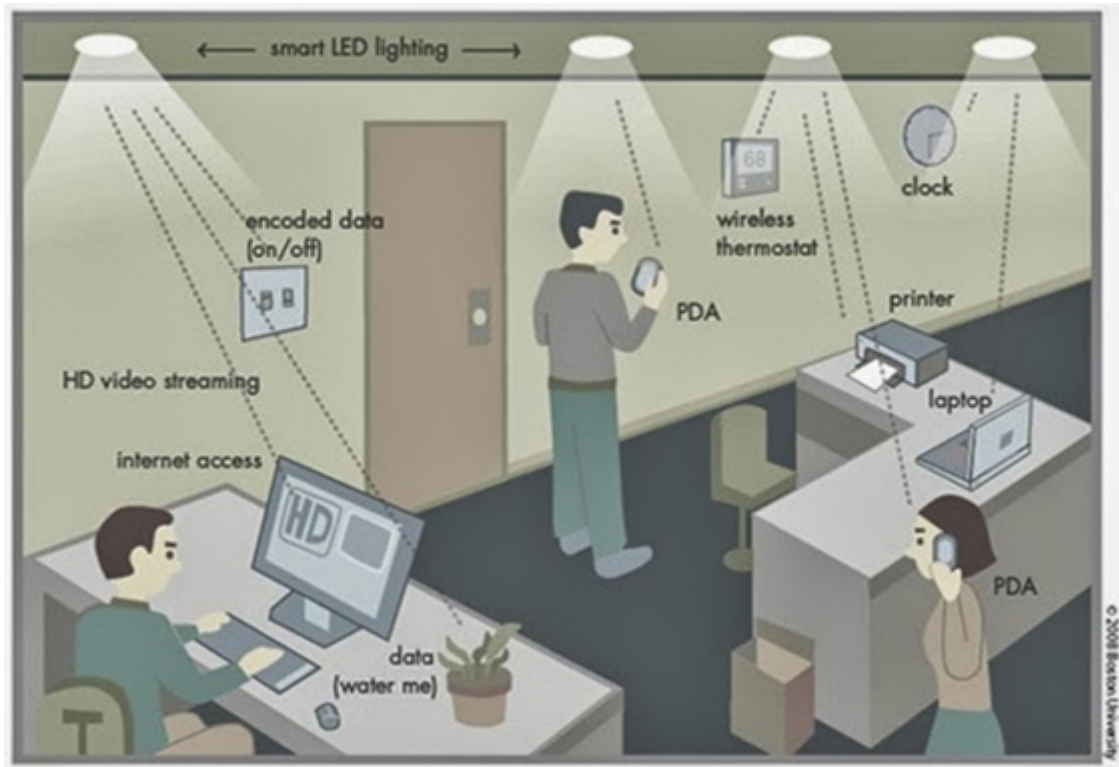
1.5.4 Látható fényt használó rendszerek – Li-Fi (Light Fidelity)

Jelenleg is számos kutatás zajlik ezen a területen. A VLC (Visible Light Communications) alapú rendszerek a világításra is szolgáló fehér fény intenzitását, és/vagy színét (frekvenciáját) modulálják. A kutatások 2011-ben kezdődtek, ma már léteznek ilyen termékek (2014-ben mutatták be az első ilyen piaci terméket), sőt van O-OFDM-et megvalósító eszköz is. Egyelőre nem tűnik úgy, hogy az 5G befogadná. Ezen kívül a gigabites sebességtől is messze van a Li-Fi-vel elérhető maximális adatsebesség. További érdekesség, hogy 802.11 szabvány is létezik: IEEE 802.15.7 LiFi. A szabvány három adatátviteli sebességet definiál:

- PHY 1: kültéri felhasználásra kb. 11,67-267,6 kbps közti átviteli sebesség.
 - Moduláció: on-off keying (OOK) és pulse position modulation (VPPM).

- PHY 2: kb. 1,25-96 Mbps közti átviteli sebesség.
 - Moduláció: on-off keying (OOK) és pulse position modulation (VPPM).
- PHY 3: 12-96 Mbps közti átviteli sebesség.
 - Moduláció: color shift keying (CSK).

A Li-Fi felhasználási esetei sem egyértelműek még, néhány lehetőséget a 21. ábra szemléltet.



21. ábra: Li-Fi felhasználási lehetőségek