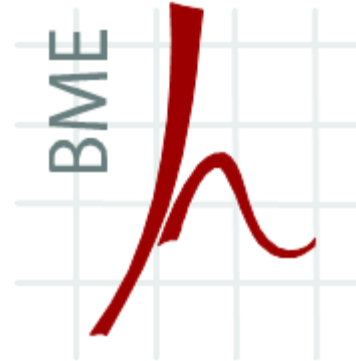
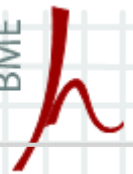




LTE: A RENDSZER FELÉPÍTÉSE, MŰKÖDÉSE ÉS A RÁDIÓS INTERFÉSZ.

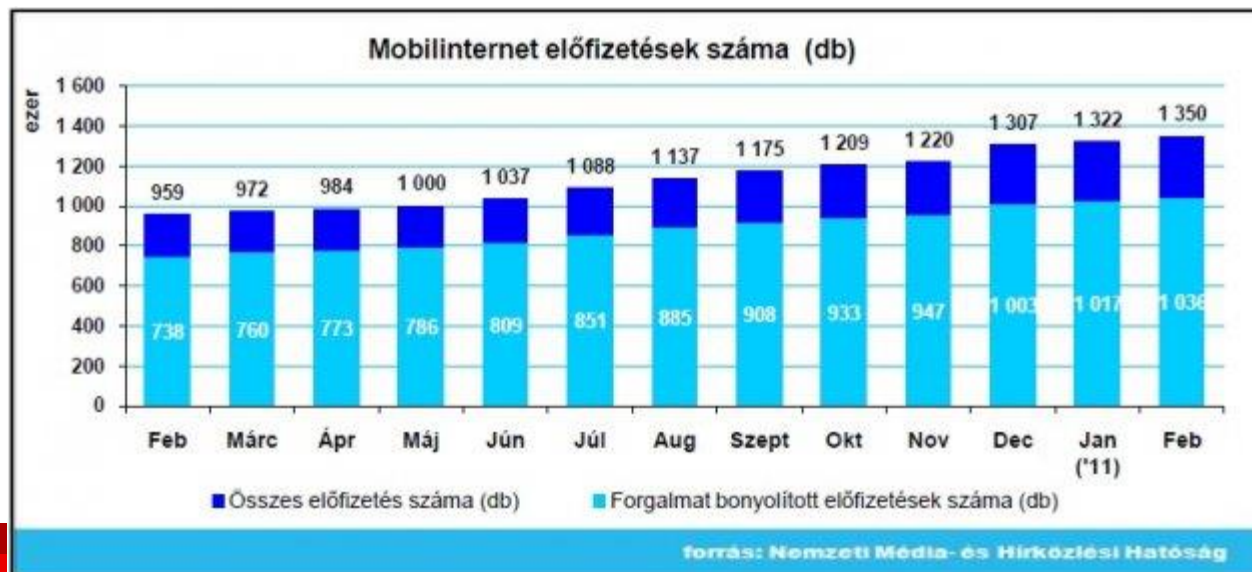


LTE rádiós interfész

Miért kell fejleszteni?

Sikeresnek bizonyult a „mobil Internet”

- hazánkban minden harmadik szélessávú Internet előfizetés
 - kb. 800000
- világszerte dinamikus növekedés
- átviteli sebességek: néhány Mbps elérhető
 - csatornától, userek számától, stb. függ
- az Internet technológia minden lehetőségének kiszolgálására még nem alkalmas (pl. szélessávú video, IPTV)



Szükséges a továbbfejlesztés

- a további forgalomnövekedés kiszolgálására nagyobb kapacitás és nyújtott átviteli sebesség szükséges
 - interferencia korlátolt mivolta és gyakorlati okok miatt (pl. nem megszerezhető site-ok) a 3G hálózat „sűrítése” nem megoldás
- az alkalmazások egyre több adatforgalmat generálnak
- a gyártók újabb eszközöket szeretnének eladni
- a szolgáltatók több előfizetőt szeretnének kiszolgálni

■Lehetséges utak

- növelni a 3G alapú rendszer spektrális hatékonyságát
- új rendszer kidolgozása, ami nagyobb sáv szélességet támogat (Shannon)

Fejlesztési lehetőségek a 3GPP Release 6 szabványok után

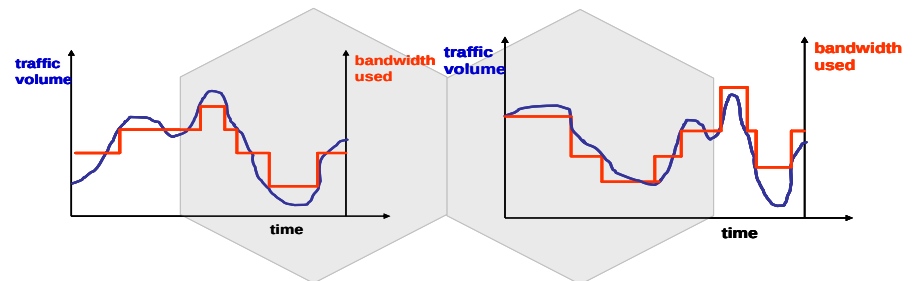
- Az eredeti, WCDMA alapú rádiós technológia továbbfejlesztései (Release 9)
 - **magasabb rendű moduláció** bevezetése (64 QAM downlink-en, 16 QAM uplink-en)
 - **MIMO** (Multiple Input Multiple Output) antenna és jelfeldolgozási technológia bevezetése
 - **két vivőfrekvenciás működés** bevezetése (két szomszédos sáv egyidejű használata)
 - következő Release: MIMO és kétvivős működés együtt
- Új rádiós interfész kifejlesztése („zöldmezős”)
 - A jelenlegi és közeljövő CMOS eszközökben megvalósítható lehető leghatékonyabb rádiós technológia fejlesztése
 - Az „all IP” hálózati képhez lehet optimalizálni

Az eredeti, WCDMA alapú rádiós technológia továbbfejlesztései

- A kapacitás és előfizetői átviteli sebesség növelése történhet lépésekben, egymásra épülve (előnyök)
 - az új képességek az előfizetői és hálózati berendezésekben lépésről lépésre történhetnek, lokálisan is megvalósíthatók
 - a fejlesztés firmware frissítést igényel, új hardvert nem (pl. 64 QAM)
 - a fejlesztések egymásra épülnek (pl. két rádiós fokozat a MIMO-hoz -> kétvivős működés)
 - visszafelé kompatibilis rendszer, az újabb készülékek teljesítőképességét viszont ki lehet használni
- A '90-es évek örökségét hordozza (hátrányok)
 - merev spektrumkiosztás és használat, 5 MHz-es sávokkal
 - áramkörkapcsolt hordozó szolgáltatások támogatása

Új rádiós technológia kifejlesztése (előnyök)

- Korszerű rádióhálózat fejlesztésének lehetősége
- rugalmas frekvenciahasználat (különböző méretű és a 3G-nél szélesebb sávok használata)
- csomagkapcsolt forgalomhoz optimalizált
- a frekvenciasávon belül az erőforrás hatékony használata
- a pillanatnyi előfizetői forgalmi igényekhez való gyors és könnyű adaptáció
- a frekvencia-szelektív fadinghez való adaptáció lehetősége



- Az új technológia nehézségekkel jár (hátrányok)
 - teljes hálózatra kiterjedő beruházás szükséges, vagy kétmódú előfizetői eszközökre
 - nincs visszafelé kompatibilitás
 - van már egy vetélytárs technológia (mobil Wimax)
 - -> eddig az LTE sikeresnek tűnik (nagy szolgáltatók elkötelezték magukat, teszhálózatok épültek)

LTE rádiós követelmények

- legalább 100 Mbps DL és 50 Mbps UL átviteli csúcssebesség, 20 MHz használatával
 - nagyobb sáv szélességeken arányosan nagyobb
- FDD és TDD támogatása
- kis csomag késleltetés a rádiós hozzáférési hálózatban (max. 5 ms alacsony terhelésnél)
 - kis méretű IP csomag késleltetése egy irányban, ha csak 1 terminál kommunikál
- 5 MHz-en egyszerre legalább 200 előfizető kiszolgálása egy cellában
 - nagyobb sáv szélességen legalább 400
 - nem aktív mobilok számára nincs explicit követelmény, de tipikusan jóval nagyobb

LTE rádiós követelmények

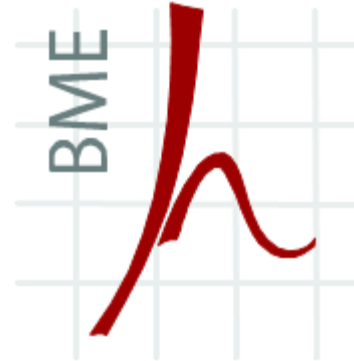
- többféle sáv szélesség támogatása (jelenleg: 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz)
- az alaphoz (HSDPA) képest követelt relatív javulás
 - átlagos előfizetői átviteli sebesség (per MHz): downlink 3-4x, uplink 2-3x
 - átviteli sebesség a cella szélén: uplink, downlink 2-3x
 - spektrális hatékonyság: downlink 3-4x, uplink 2-3x
- mobilitás: csúcs teljesítőképesség 15 km/h sebességű felhasználóknál
 - 120 km/h-ig nagy teljesítőképesség
 - 350 km/h-ig kapcsolat fennmaradása (handover esetén is)
- lefedettség: 5 km-ig a teljesítőképesség javulást tartani kell
 - 30 km-ig némi romlás megengedett, de mobilitásban nem

LTE rádiós követelmények

- valós idejű szolgáltatások csomagkapcsolt megoldása: legalább olyan minőségű mint az UMTS áramkörkapcsolt szolgáltatásai
- multicast/broadcast támogatása (MBMS)
 - dedikált műsorszóró sávú működés
 - kevert műsorszóró/egyéb forgalmat vivő sáv
 - cella szélén legalább 1 bps/Hz spektrális hatékonyság
- együttélés korábbi hálózatokkal
 - LTE-GSM, LTE-3G handover 300 ms, illetve 500 ms valós idejű és nem valós idejű szolgáltatások esetén

LTE alapvető rádiós jellemzők

- OFDM alapú rádiós interfész
 - downlink: **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
 - uplink: **Single Carrier-FDMA** más néven DFTS-OFDM (Discrete Fourier Transform Spread OFDM) --- ez is OFDM alapú
 - lehetővé teszi a rugalmas sávhasználatot
 - frekvencia szelektív fading hatása elleni védekezés
 - a megvalósítása egyszerű IFFT-vel
- számos sáv szélességet és átviteli sávot támogat
- FDD és TDD támogatás
- adaptív moduláció és csatornakódolás
- gyors második rétegbeli újraküldés (HARQ)
- többantennás támogatás (max. 4x4)



AZ LTE HÁLÓZAT: SAE

- Többféle hozzáférési hálózat támogatása
 - 3GPP és nem 3 GPP
 - fix hozzáférési rész
- Roaming
- Mobilitás a különféle hozzáférési hálózatok közt
- Any service IP alapon támogatása
- Interworking: PS és CS szolgáltatások közt

- Szigorú QoS biztosítása

- észrevehetetlen handover CS és PS beszédhálózat közt
- nincs adatvesztés fix és vezeték nélküli hozzáférés közti handovernél
- QoS : visszafelé kompatibilis 3GPP egyébbel (UMTS)

Fejlett biztonsági megoldások

- támadások ellen
- privacy különböző szintjeinek támogatása (kommunikáció, helyzet, azonosság), ugyanakkor törvényes lehallgatás lehetősége
- védve: tartalom, küldő, fogadó kiléte és helyzete

- Fejlett számlázási megoldások:
 - pl. QoS alapján
 - flat rate, adatmennyiség, stb.
 - rádióhálózati adatok felhasználása a számlázásnál

- Rendszer architektúra:
 - a működéshez szükséges funkciók logikai csomópontokhoz rendelve
 - interfészek a csomópontok közt
 - két fő blokk: maghálózat (Core Network, CN): **EPC, Evolved Packet Core**, rádiós hozzáférési hálózat (Radio Access network, RAN): **E-UTRAN**
- Funkciók:
 - rádióhálózat menedzsment
 - számlázás
 - hitelesítés
 - vég-vég kapcsolat menedzsment
 - gerinchálózati funkciók és rádióhálózati funkciók
 - mobilitás menedzsment

■ RAN funkciók LTE

- kódolás, interleaving, moduláció, más fizikai réteg funkciók;
- ARQ, fejléc tömörítés, ütemezés, stb. egyéb második réteg funkciók;
- rádiós erőforrás menedzsment, handover stb., más rádiós erőforrás kontroll funkciók
- biztonsági funkciók: titkosítás, adat integritás megőrzése

■ Core funkciók LTE SAE

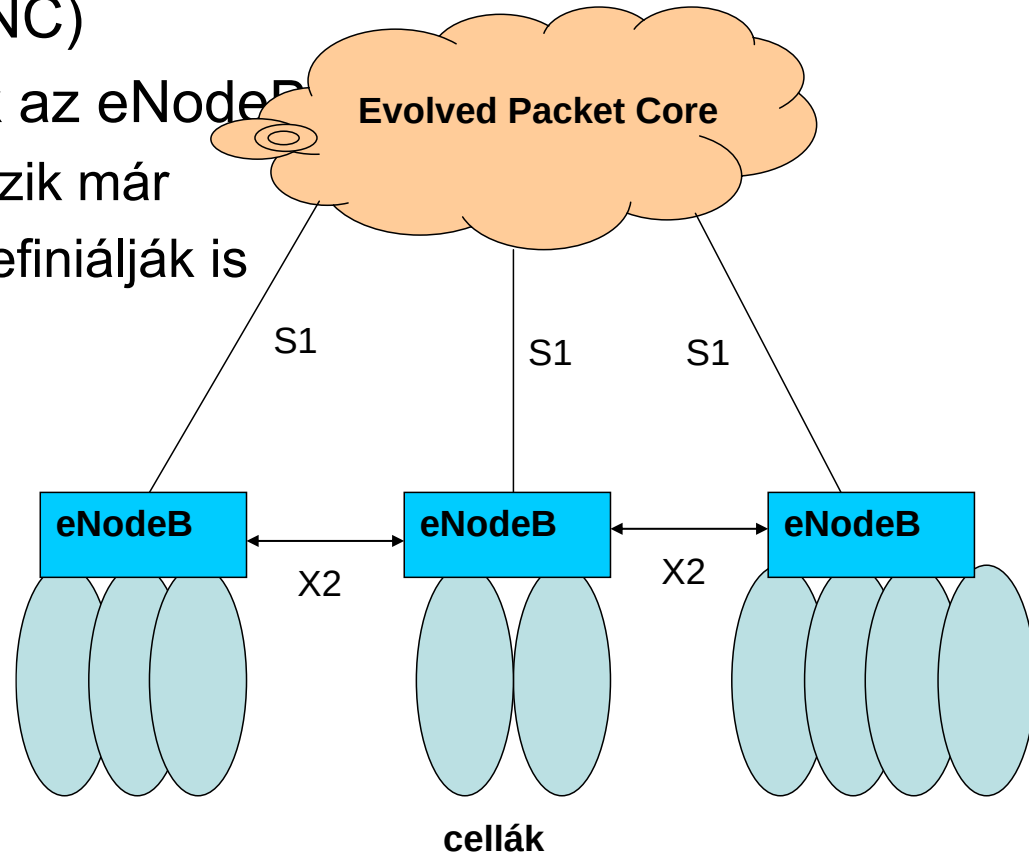
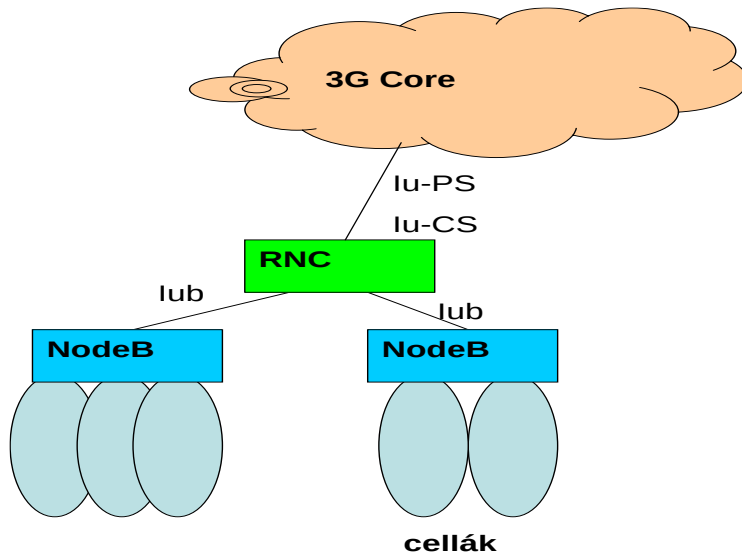
- számlázás
- előfizető menedzsment
- mobilitás menedzsment (a mobil helyzetének követése)
- hordozó szolgáltatások kezelése, szolgáltatási minőség kezelése
- előfizetők adatfolyamain végrehajtandó eljárások (policy) kezelése
- kapcsolódás külső hálózatokhoz
 - más szolgáltató LTE SAE
 - más hálózat (GSM, 3G, Internet)

■ E-UTRAN

- handover: adattovábbításon alapul
- állomások közti kommunikáció szükséges: rádiós erőforrás menedzsment, interferencia kontroll
- erre szolgál az X2 interfész
- felépítése hasonló a 3G Iur-hez (RNC-k közti interfész)
- topológiai vonatkozások

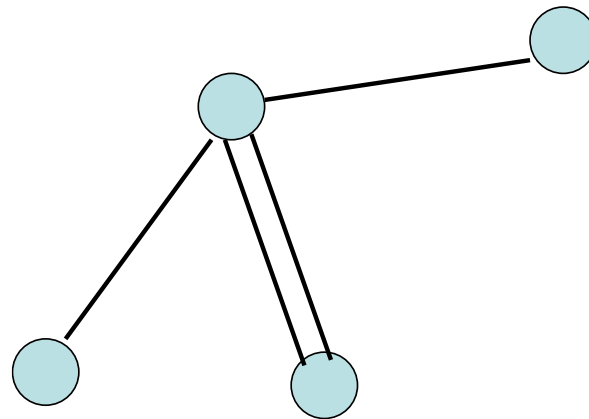
■ E-UTRAN architektúra változások

- nincs központi elem (RNC)
- a korábbi RNC funkciók az eNodeB-ben
 - ilyen 3G NodeB is létezik már
 - HSPA+ szabványok definiálják is
- biztonsági problémák

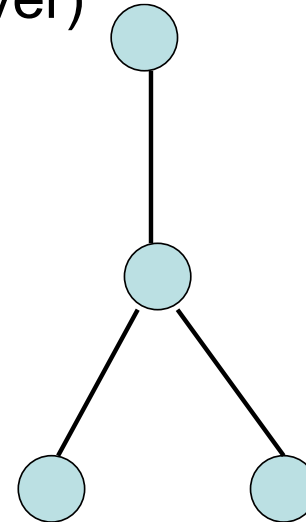


■ E-UTRAN architektúra változások

- nincs makro diverziti
 - megoldható lenne, de nem hoz annyi nyereséget, mint komplexitást
- nincs puha hívásátadás (soft handover)



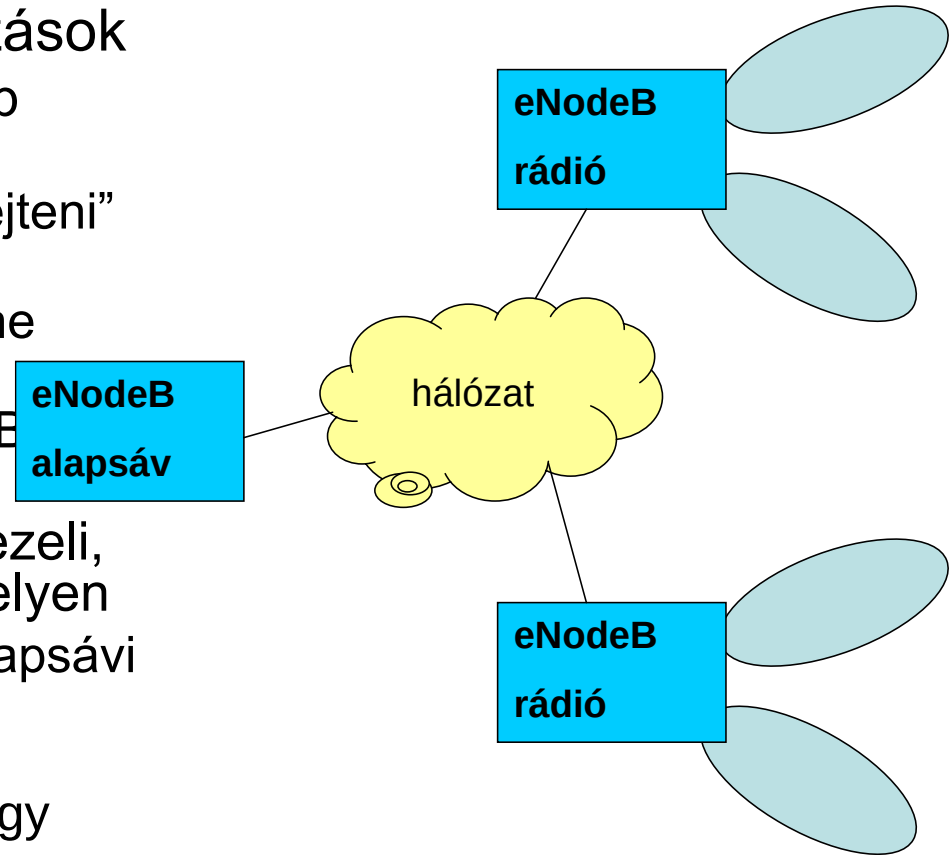
makrodiverziti központi
elem nélkül



makrodiverziti központi
elemmel

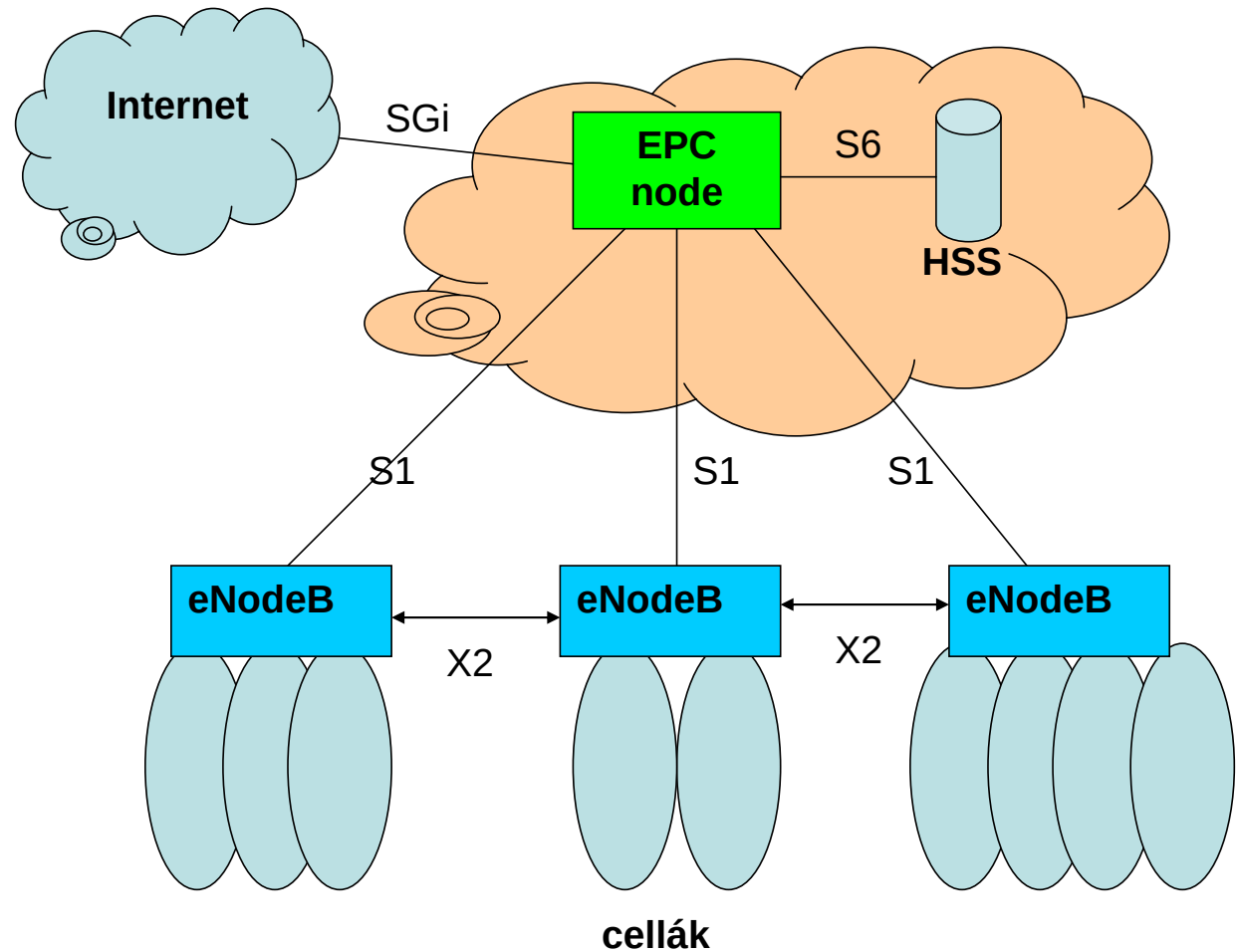
■ E-UTRAN architektúra változások

- mobilitás kezelése nehezebb központi elem nélkül:
 - cellaváltást lehetőleg „elrejteti” a maghálózat előtt
 - ugyanakkor adatvesztés ne történjen
 - csomagtovábbítás eNodeB között
- eNodeB: cellák csoportját kezeli, nem szükségszerűen egy helyen
 - gyártók: megosztják az alapsávi és a rádiós funkciókat az állomásokban
 - elvileg: cella (antenna) nagy távolságban is lehet a bázisállomástól
 - időzítési problémák



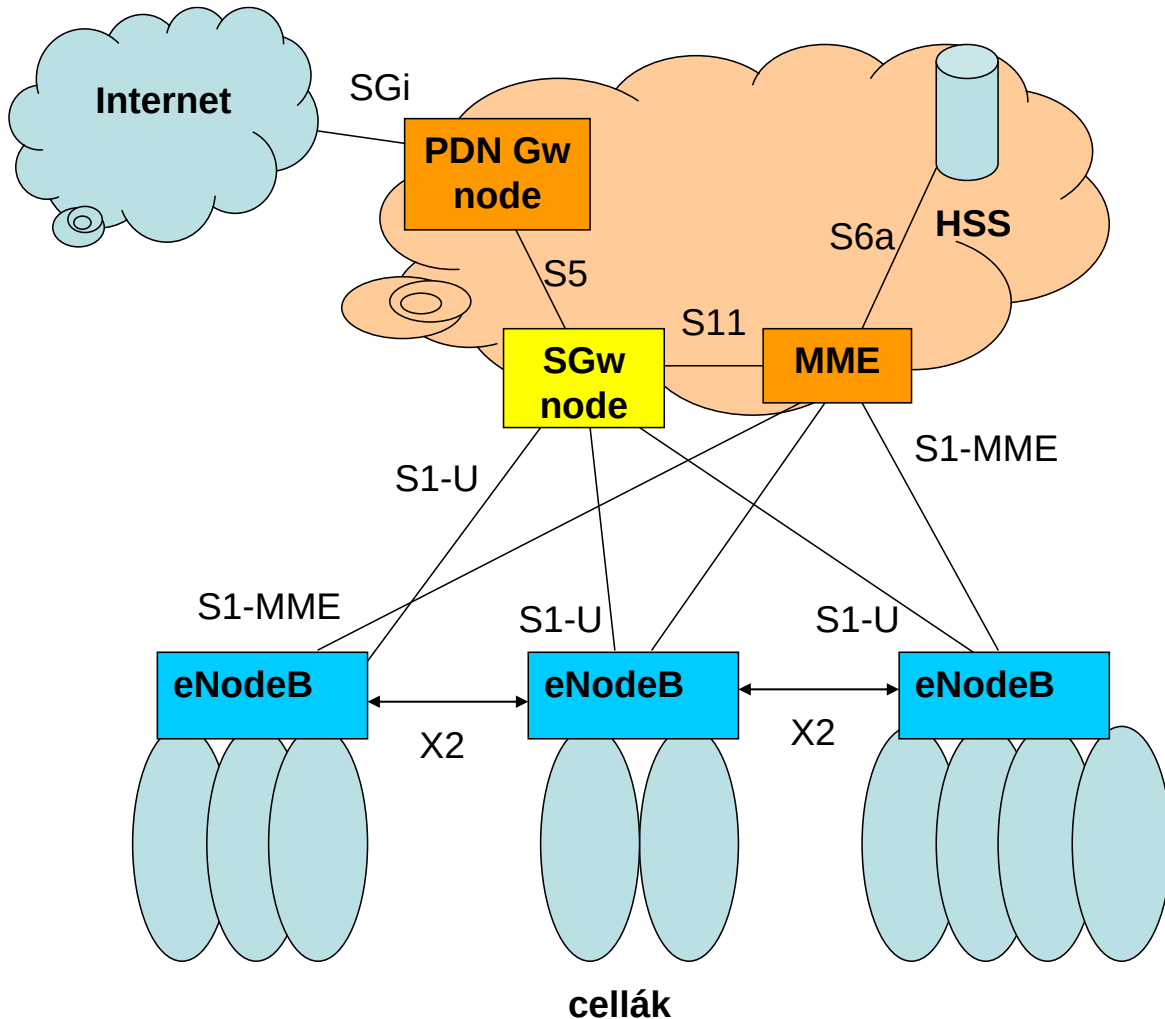
- Fejlett csomagkapcsolt maghálózat
- EPC Evolved packet Core
 - funkcionális architektúra: egy csomópont végez minden maghálózati funkciót
 - akár fizikailag is lehetne egy berendezés
 - gyakorlati szempontból nem megvalósítható
 - + HSS (=HLR+AuC) megmaradt a korábbi hálózatokból
 - EPC-HSS között S6
 - EPC-Internet között SGi

■ SAE architektúra



SAE EPC architektúra

- Funkcionális entitások az EPC-ben
- **Mobilitás kezelő** egység: Mobility Management Entity (MME)
- **Kiszolgáló átjáró** egység: Serving Gateway
- **Adathálózati átjáró** egység: Packet Data Network (PDN) Gateway



- Funkcionális entitások az EPC-ben
- **Mobility Management Entity (MME)**
 - a vezérlő sík megvalósítója az EPC-ben
 - mobilitás támogatás
 - előfizető helyének lekérdezése
 - paging megfelelő helyre küldése
 - útvonalválasztás az előfizető pozíciójának megfelelően
 - minden egyéb vezérlési feladat: hordozó felépítése, autentikáció, titkosítási kulcsok cseréje, stb.
 - kontroll sík az S1 interfészen: S1-MME
 - nagyon hasonló a 3G hálózat Iu-PS vezérlési síkjához

SAE EPC architektúra

- Funkcionális entitások az EPC-ben
- **Serving Gateway (SGw)**
 - az előfizetői adatok továbbítója az EPC és az eNodeB között
 - az S1-U nagyban hasonlít a 3G Iu-PS –hez
 - S1-U működése
 - felhasználó IP csomagjának továbbítása „alagúton” az eNodeB felé/től
 - alagút: új IP protokoll fejléc, új címmel, az előfizető helyének megfelelően
 - a cím meghatározza hova menjen a csomag

SAE EPC architektúra

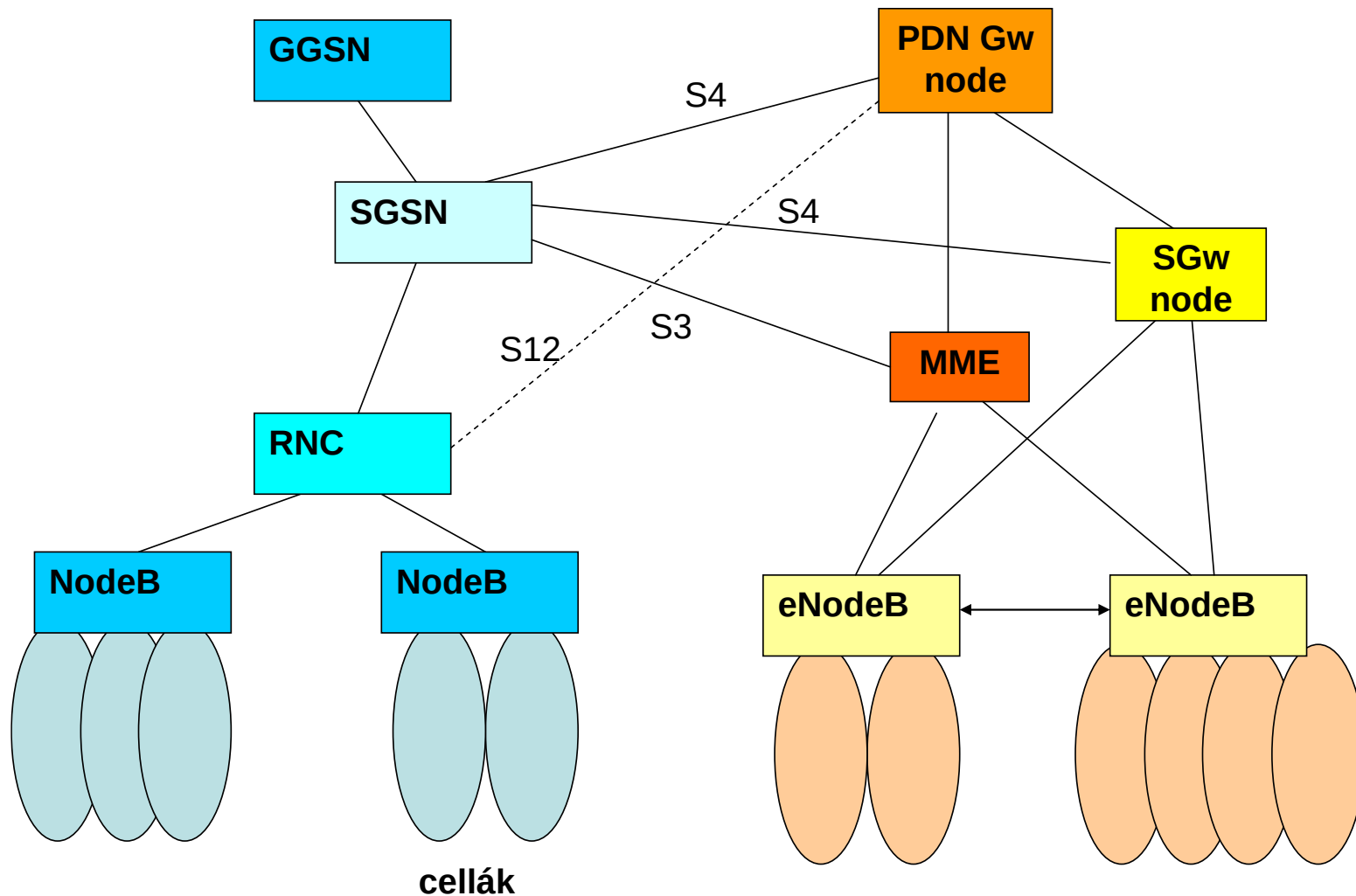
- Funkcionális entitások az EPC-ben
- **PDN Gateway** (PDN Gw)
 - az interfész a külső csomagkapcsolt hálózatok felé
 - Internet, más szolgáltató hálózata, nem LTE hálózat
 - az LTE mobilitás gyökere
 - egy kapcsolat alatt a külső hálózati forgalom egy PDN Gw berendezésen keresztül megy, akárhová mozog is az előfizető
 - azonban az SGw továbbítja az IP csomagokat a kiszolgáló eNodeB felé
 - a maghálózatban látszik a mobilitás
 - minden cellaváltásnál új „alagútban” megy a forgalom az eNodeB felé/től
 - ez nagy különbség a 3G-hez képest, ahol az RNC elfedte a lokális mobilitást (RNC-ig kellett az IP alagutat vezetni)

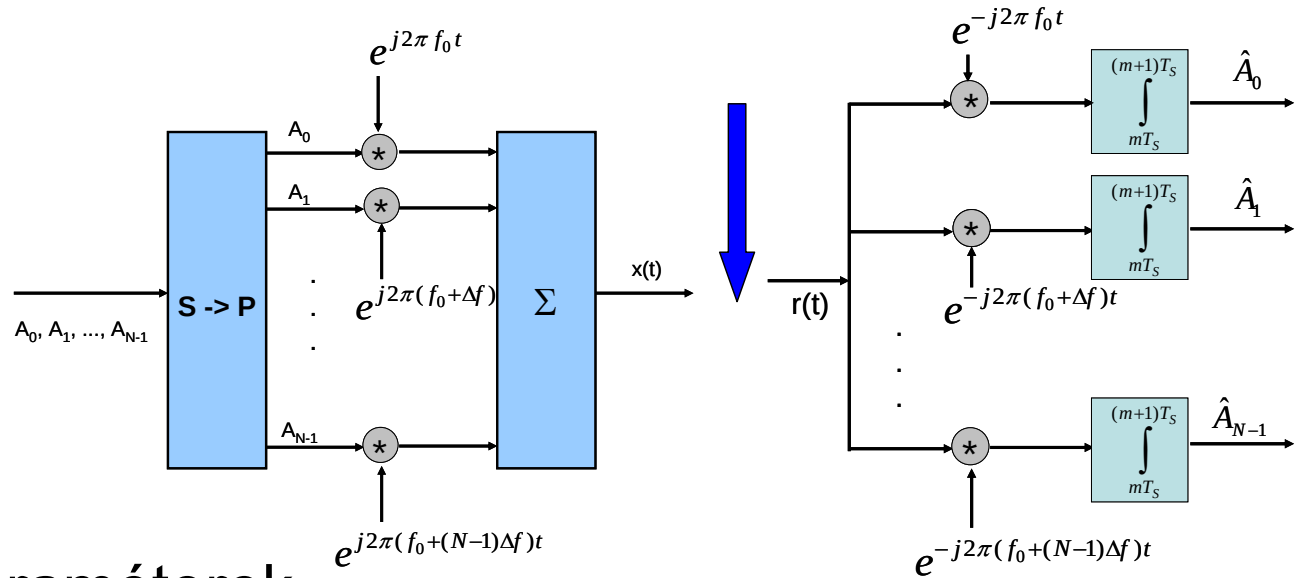
- Még egy entitás
- PCRF Policy and Charging Rules Function
 - az előfizetői kapcsolatokat érintő szabályok és eljárások
 - a számlázási szabályok
- Rugalmasság
- S1 flex
 - egy eNodeB csatlakozhat több S1 interfészen több Sgw-hez is
 - robusztusság, rugalmasság
 - hálózati infrastruktúra megosztása (közös eNodeB, saját EPC)

- Követelmény
- Hálózatok közti handover 3G és LTE között
 - előfizető nem tudja milyen hálózatban, milyen készülékekkel van
 - lokális LTE indulás
 - kétmódú készülékek kellenek

Megoldás

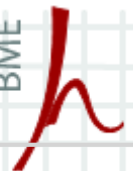
- az SGSN „bekötése” az EPC-be
- a PDN Gw viselkedik GGSN-ként
- vagy: S12 interfész a PDN Gw és az RNC között
 - GGSN nem szerepel az átvitelben





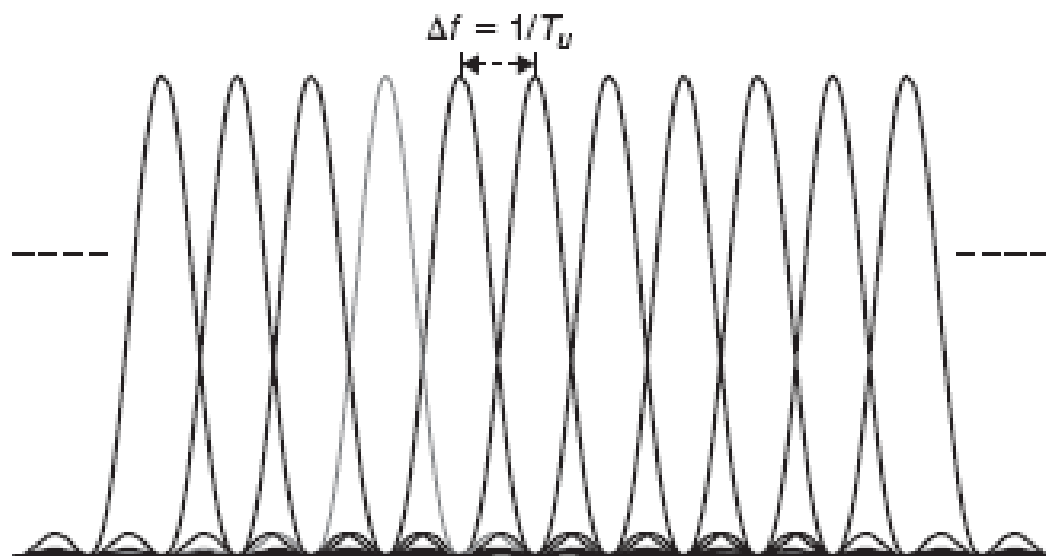
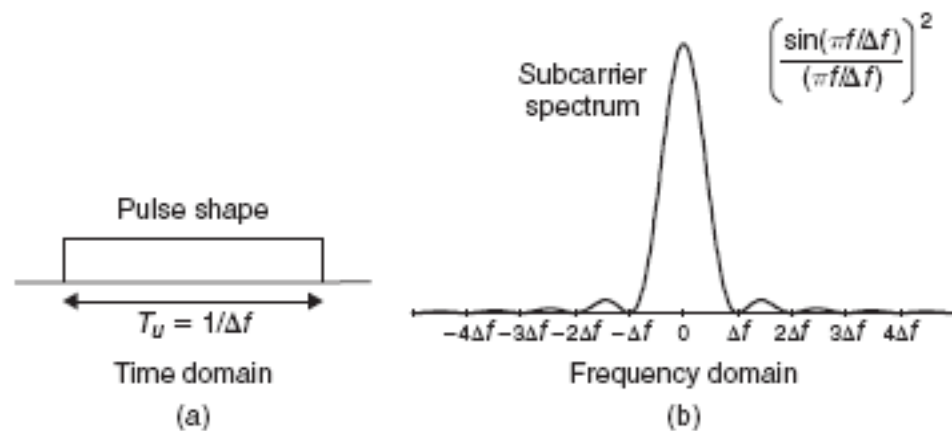
OFDM paraméterek

- segédvívők távolsága 15 kHz (Δf)
- ennek megfelelően a szimbólumidő 66.67 μs
- ciklikus prefix (~védőidő): 5.2 μs az időzés első szimbóluma előtt, 4.7 μs a többi szimbólum előtt (normál prefix), vagy 16.7 μs (bővített prefix)
- $\Delta f = 7.5$ kHz is definiált, multicast hálózatokhoz (műsorszórás az LTE hálózaton)



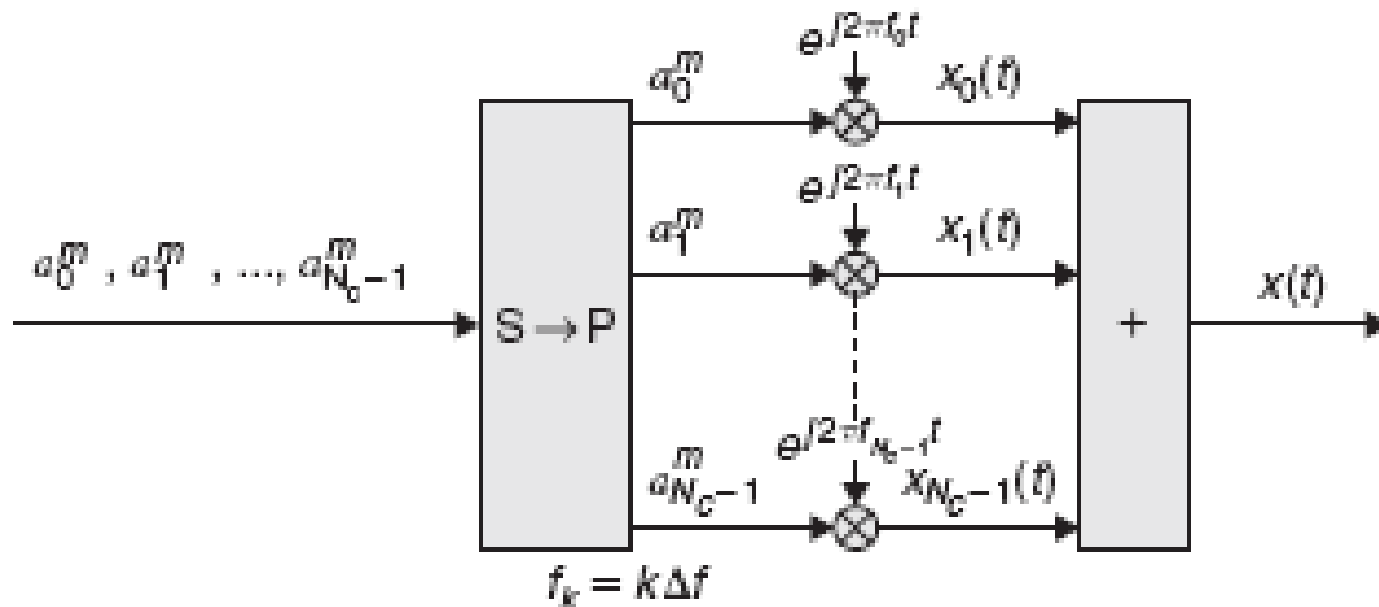
Új rádiós interfész

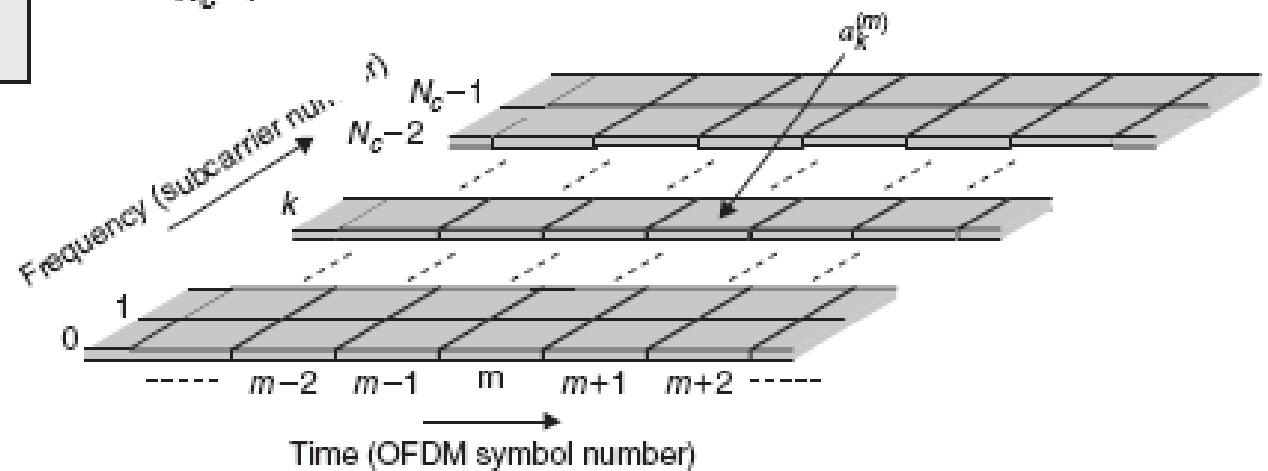
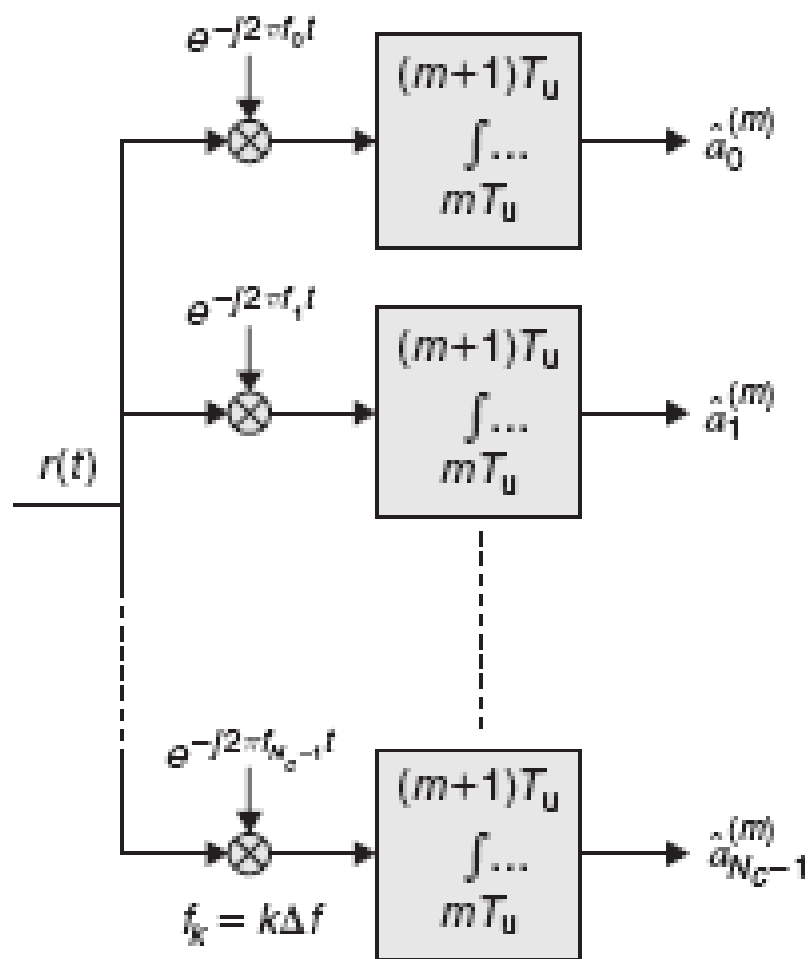
- OFDM



$$x(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} x_k(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(m)} e^{j2\pi k \Delta f t}$$

$$\int_{mT_u}^{(m+1)T_u} x_{k_1}(t) x_{k_2}^*(t) dt = \int_{mT_u}^{(m+1)T_u} a_{k_1} a_{k_2}^* e^{j2\pi k_1 \Delta f t} e^{-j2\pi k_2 \Delta f t} dt = 0 \quad \text{for } k_1 \neq k_2 \quad (4.2)$$



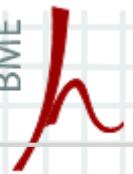


To confirm this, consider a time-discrete (sampled) OFDM signal where it is assumed that the sampling rate f_s is a multiple of the subcarrier spacing Δf , i.e. $f_s = 1/T_s = N \cdot \Delta f$. The parameter N should be chosen so that the sampling theorem [50] is sufficiently fulfilled.¹ As $N_c \cdot \Delta f$ can be seen as the nominal bandwidth of the OFDM signal, this implies that N should exceed N_c with a sufficient margin.

$$x_n = x(nT_s) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k e^{j2\pi k \Delta f n T_s} = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k e^{j2\pi kn/N} = \sum_{k=0}^{N-1} a'_k e^{j2\pi kn/N}$$

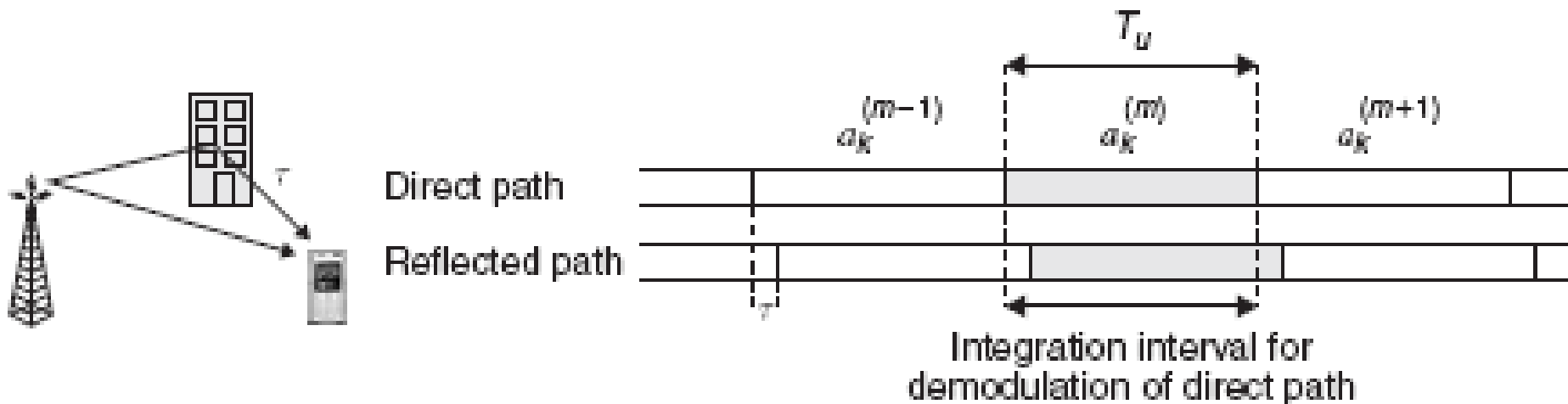
where

$$a'_k = \begin{cases} a_k & 0 \leq k < N_c \\ 0 & N_c \leq k < N \end{cases}$$



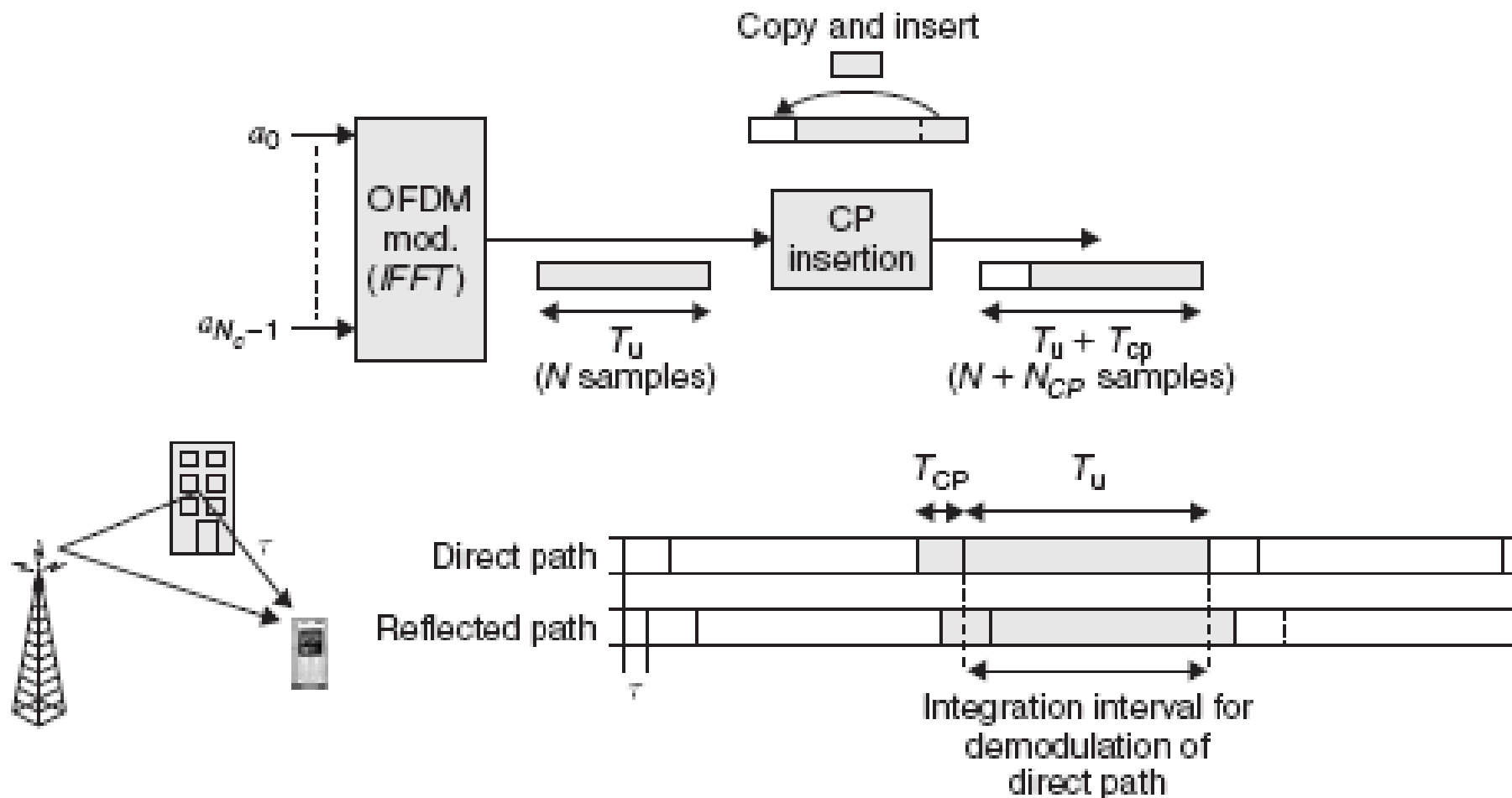
OFDM

- szimbólumközi áthallás: egy vivőn
- vivők között is! (az ortogonalitás elvesz: a szimbólumidőnyi integrálásban nem egész számú periódus lesz az egyik jelből)



OFDM

- megoldás: ciklikus prefix: szimbólum vége (minták) az elejére másolva, vivőtávolság marad!
- lassabb átvitel, teljesítmény pazarlása



If OFDM is to be used as the transmission scheme in a mobile-communication system, the following basic OFDM parameters need to be decided on:

- The subcarrier spacing Δf .
- The number of subcarriers N_c , which, together with the subcarrier spacing, determines the overall transmission bandwidth of the OFDM signal.
- The cyclic-prefix length T_{CP} . Together with the subcarrier spacing $\Delta f = 1/T_u$, the cyclic-prefix length determines the overall OFDM symbol time $T = T_{CP} + T_u$ or, equivalently, the OFDM symbol rate.

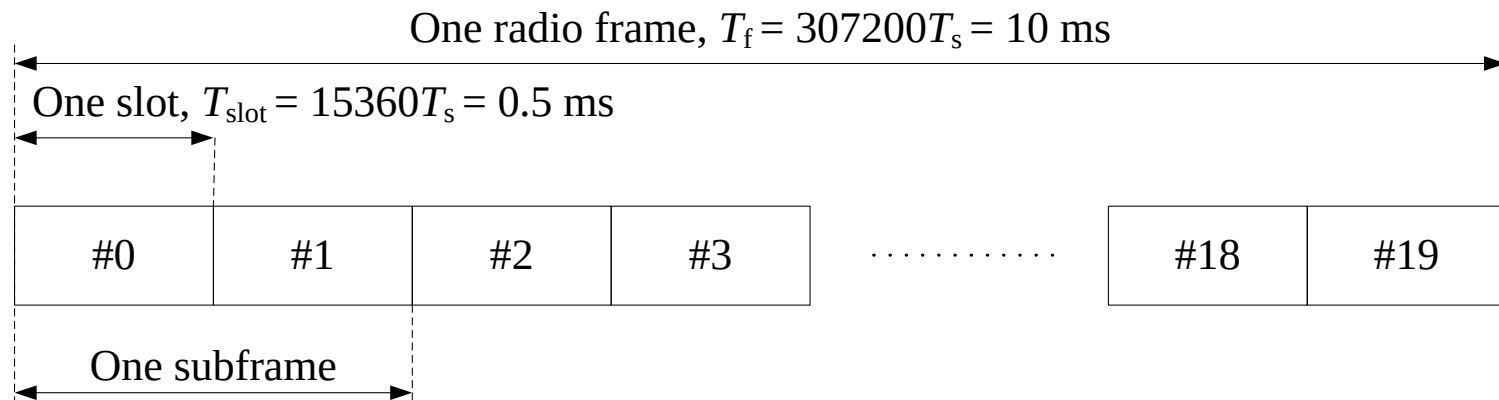
4.8.1 OFDM subcarrier spacing

There are two factors that constrain the selection of the OFDM subcarrier spacing:

- The OFDM subcarrier spacing should be as small as possible (T_u as large as possible) to minimize the relative cyclic-prefix overhead $T_{CP}/(T_u + T_{CP})$, see further Section 4.8.3.
- A too small subcarrier spacing increases the sensitivity of the OFDM transmission to Doppler spread and different kinds of frequency inaccuracies.

Alap időzítés

- alap időegység $T_s = 1/(15000 \times 2048)$ másodperc
 - mintavételi idő, órajel periódus alapja
 - minden ennek többszöröseként definiálva a szabványban
- Keretszerkezet FDD módban
- 10 ms keret, 10 db 1 ms alkeret, 20 db 0.5 ms időrés



OFDM szimbólumok

- a ciklikus prefix értékeiből és a szimbólumidőből, valamint az időrés idejéből származik az egy időrésben átvitt OFDM szimbólumok száma
- ez 6 (bővített prefix) vagy 7 (normál prefix)
- fizikai jelzési sebesség sebesség: 12 vagy 14 kszimbólum/sec

■ Moduláció

- QPSK, 16 QAM és 64 QAM (2, 4, 6 bit információ per szimbólum per segédvivő)
- fizikai kontroll információ QPSK

■ Hibavédő kódolás

- 1/3 arányú turbo kódolás (1 bit -> 3 bit), erős hibavédelem
- ha nincs szükség ilyen erősre: lyukasztás (~törölt bitek)
 - a csatorna minőségétől függően

■ Adaptív moduláció és kódolás

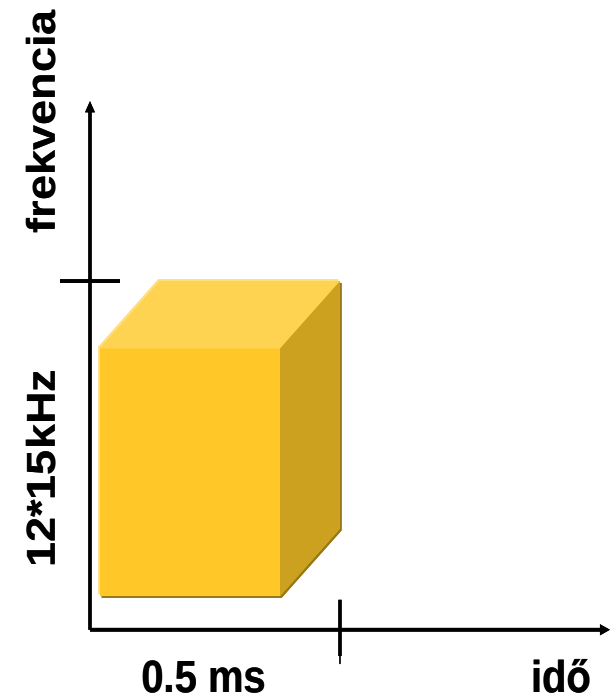
- jó csatorna -> nagy állapotszámú moduláció, gyenge hibavédelem (kevés redundancia) -> nagy hasznos átviteli sebesség
- rossz csatorna -> alacsony állapotszámú moduláció, erős hibavédelem (sok redundancia) -> alacsony hasznos átviteli sebesség
- csatornaméréseken (referenciajelek alapján) és csatornaállapot jelentéseken alapszik

■ Hibrid újraküldés

- növelt redundancia: az újraküldés erősebb hibavédő kódolással
- chase combining: az újraküldött és a sérült csomagot kombinálja

■ Fizikai szintű rádiós erőforrás

- fizikai erőforrás blokk (Physical Resource Block, PRB)
- 12 segédvivő ($12 \cdot 15 \text{ kHz} = 180 \text{ kHz}$)
- egy időrésben (0.5 ms)
- a legkisebb egység, ami egy előfizetőnek adható
- $12 \cdot 6 =$ vagy $12 \cdot 7$ szimbólum időrésenként
- kiosztás: egy előfizetőnek egy PRB egy alkeretben (2 időrés)
- összesen 144 vagy 168 szimbólum alkeretenként



- Fizikai szintű pillanatnyi átviteli sebességek egy PRB-vel

	rövid prefix	hosszú prefix
QPSK	336 kbps	288 kbps
16 QAM	672 kbps	576 kbps
64 QAM	1008 kbps	864 kbps

- Sávszélesség kérdése

- egy bázisállomásnak minimum 6 PRB-t kell tudni kezelni
 - ez védősávokkal, DC vivővel 1.4 MHz

Sávszélesség [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
PRB-k száma	6	15	25	50	75	100

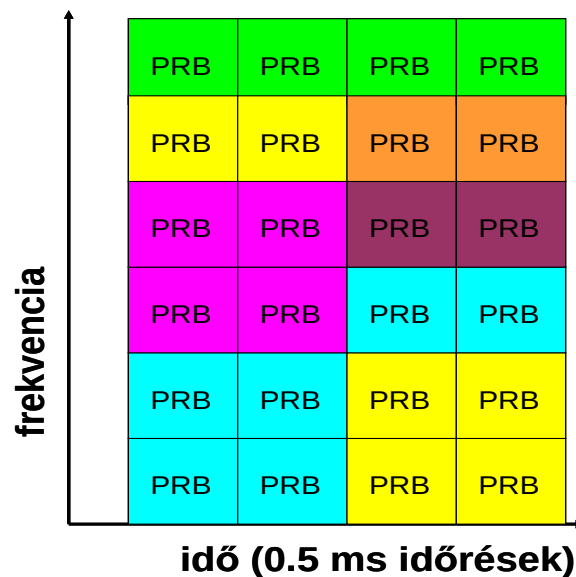
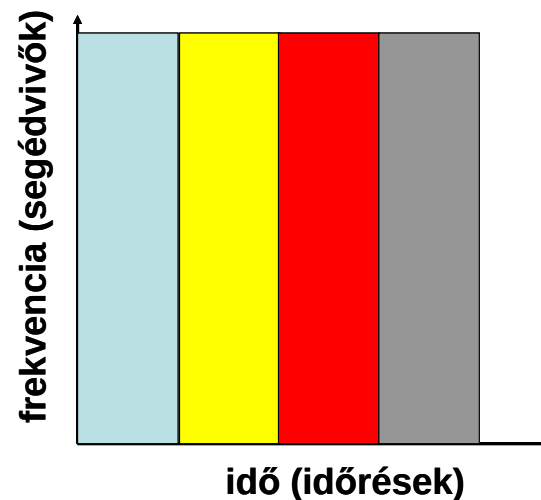
elvi maximális fizikai sebesség
100.8 Mbps

OFDM (WLAN, Wimax, DVB): minden segédvivő egy előfizető adatát viszi

- a csatorna időben van megosztva

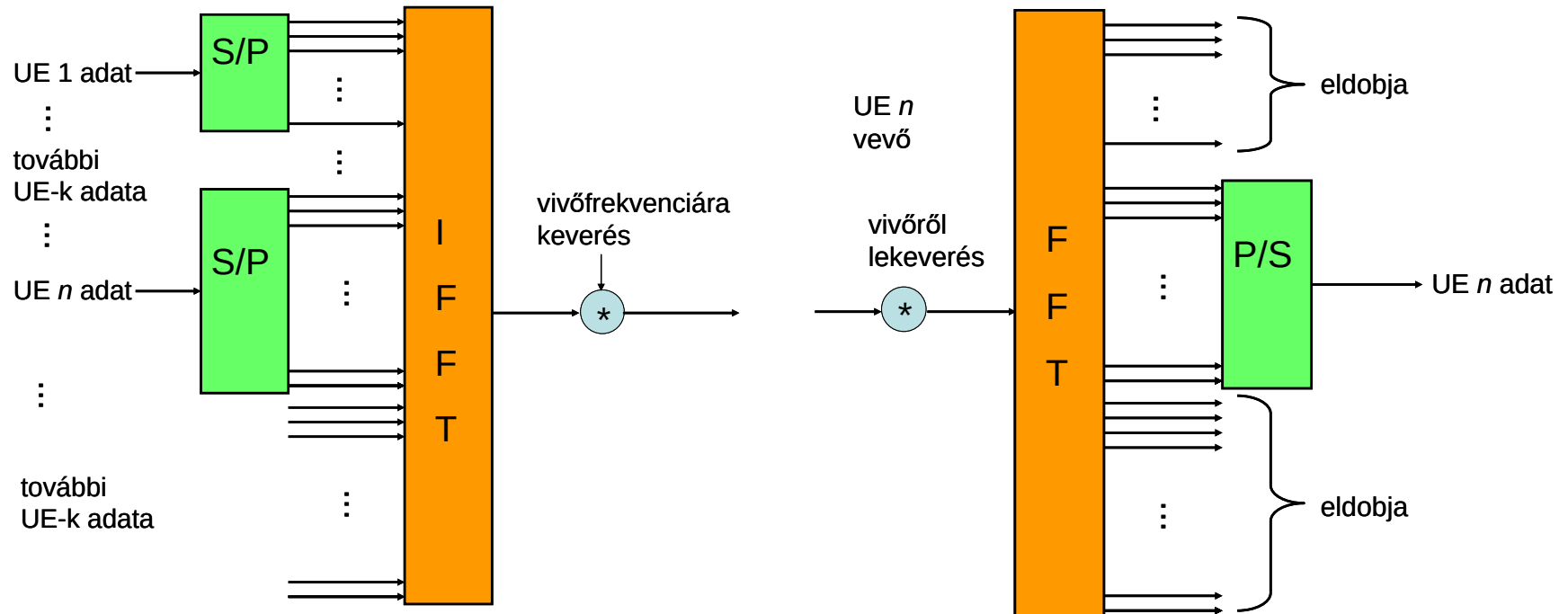
OFDMA (LTE, mobil Wimax): a segédvívők egy része (PRB-k egy része) juthat egy előfizetőnek

- a csatorna időben és frekvenciában megosztva



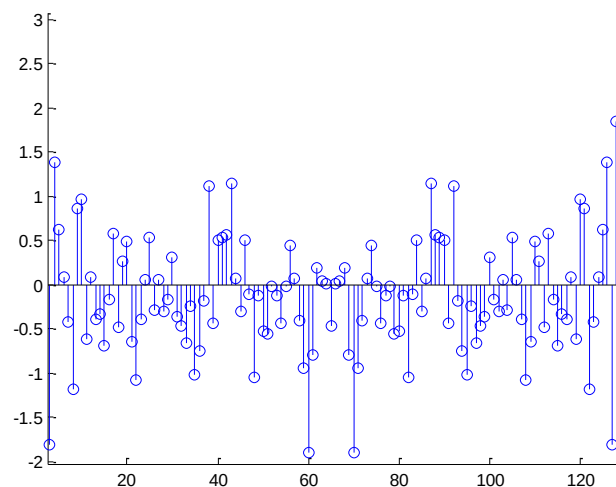
Megvalósítás a gyakorlatban

- UE sávszélesség: hány IFFT bemenet
- frekvenciában hol: melyik IFFT bemeneteken



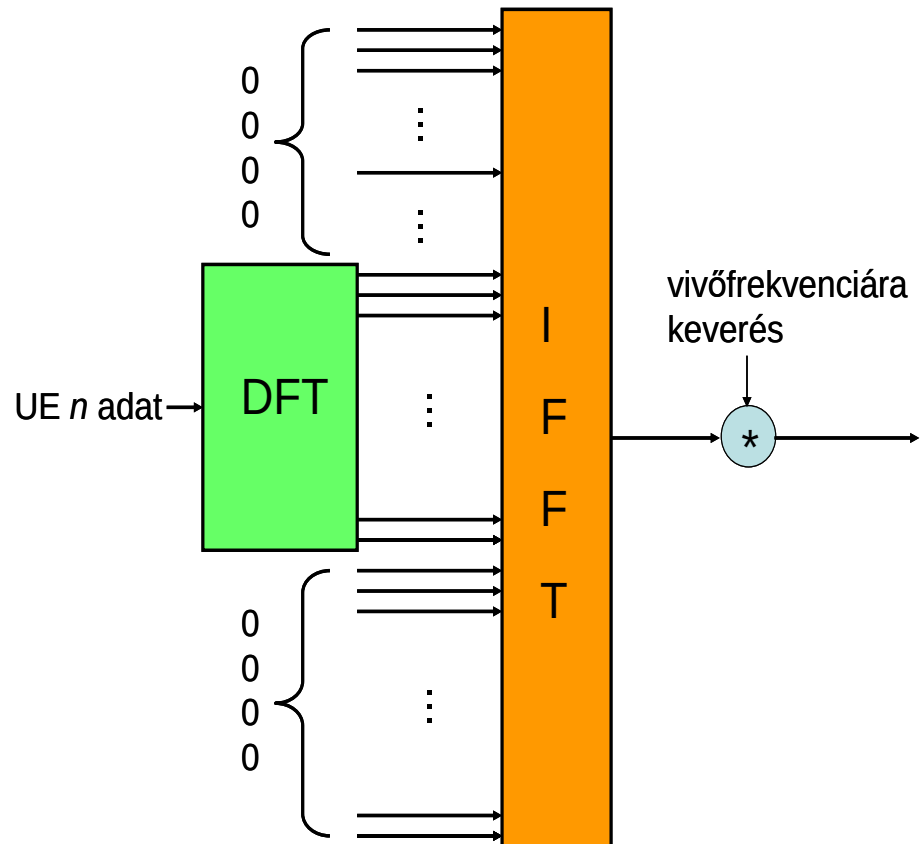
Megvalósítás a gyakorlatban

- jellemző: nagy dinamikatartomány (csúcs/átlag teljesítmény, PAPR nagy)
- rádiós végfoknál nem előnyös (rossz hatásfok)
- bázisállomás adójában OK (drágább lehet)
- UE adójában nem OK (olcsónak, egyszerűnek kell lennie)
- tulajdonképpen egy nagyon sok állapotú moduláció



Uplink megoldás

- **SC-FDMA** (Single Carrier Frequency Division Multiple Access)
- jó öreg FDMA? (pl. 1G NMT)
- nem: UE által használt sáv szélesség és sáv dinamikusan változhat, egy RF vivővel
- sáv szélesség, frekvenciában hol: IFFT bemeneteinek száma, helye
- csak szomszédos sávok megengedettek
- DFT->IFFT: a jel marad
- IFFT-n hol? -> sávon belül hol

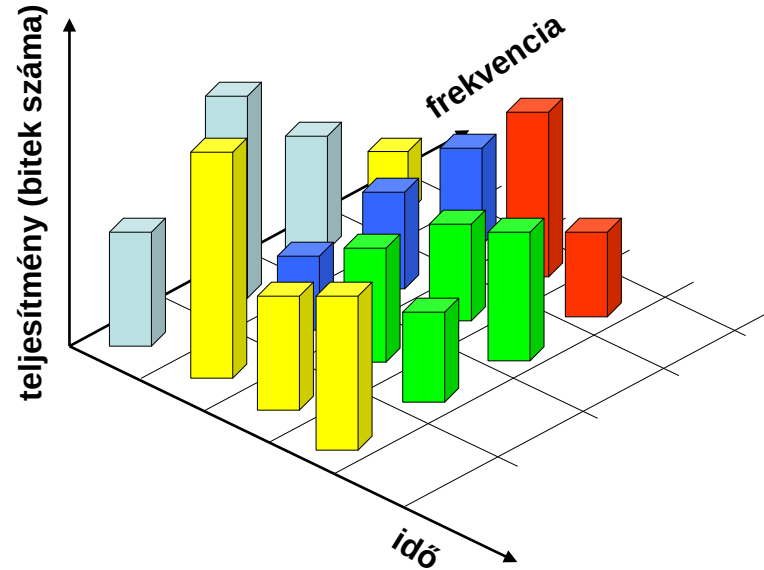


■ Osztott csatorna megközelí

- erőforrás rács: frekvencia
 - idő-frekvencia rács
- a bázisállomás ütemezője
- nem szabványos

■ Ütemezési feladat

- melyik PRB-t
- melyik időrésben
- mekkora adóteljesítmén
jel/zaj viszony $\rightarrow$ kisebb redundancia, magasabb állapotú moduláció $\rightarrow$ több hasznos bit/PRB)
- melyik előfizető részére
- összes adóteljesítmény, PRB-k száma, időrések száma korlátos

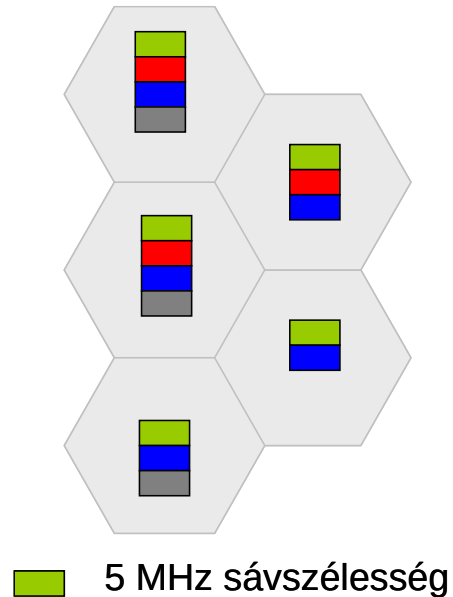


Hogyan legyenek a sávok kiosztva?

- különböző várható forgalom különböző sáv szélességeket igényel cellánként

Frekvenciatervezés?

- különféle szélességű sávok elhelyezése úgy, hogy ne zavarják egymást
- iparági igény, hogy ne kelljen
- várhatóan nem lesz akkora sáv szélesség hogy megoldható legyen
- tetszőleges sáv (tipikus 20 MHz) minden cellába (reuse 1)
- a rendszer oldja meg, hogy a szomszédos cellák azonos sávot használjanak, de ne legyen két azonos PRB egyszerre kiosztva két előfizetőnek, akik zavarnák egymást



A rendszer gondoskodjon az interferencia elkerüléséről!

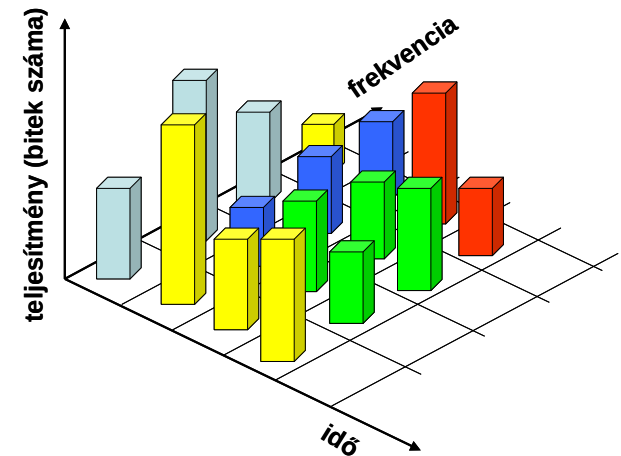
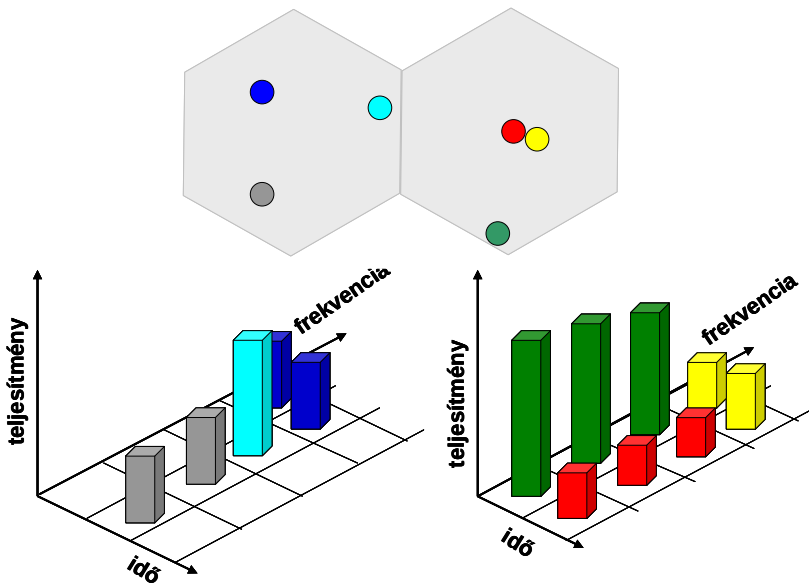
Elosztott ütemezés: ütemező az eNodeB-kben

- koordinált működés: a szomszédos cellák ne, vagy csak kis teljesítménnyel használják ugyanazt a PRB-t
- X2 interfész az eNodeB-k között
- szomszédnak okozott interferencia:
 - kisebb SINR -> kisebb adatsebesség/PRB
 - ütközések minimalizálása
 - igények kielégítése, fairness, QoS, átviteli sebesség és cellaátvitel maximalizálása

Elosztott ütemező: 3 dimenziós erőforrás kiosztása

- minden bázisállomás ugyanazt az erőforrás-rácsot használja

Közeli termináloknak kis teljesítménnyel azonos PRB kiosztható

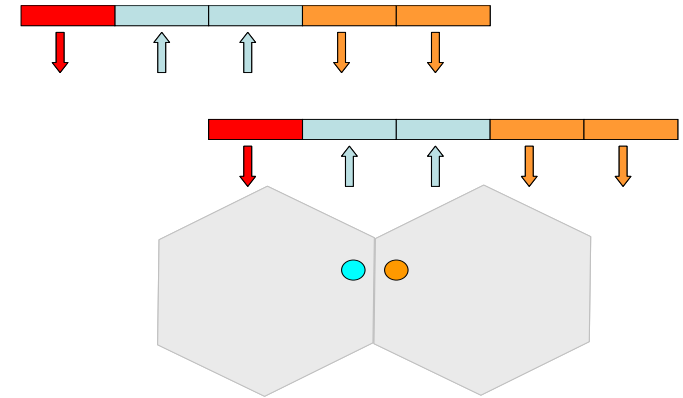


Általánosan: reuse 1 a közeli terminálok számára
reuse n a távoliaknak

Nehézség: TDD működés esetén

- nem szinkronizált eNodeB-k
- egy terminál UL adása zavarhatja a szomszéd cellában lévő terminál DL vételét

közös, koordinált UL/DL ütemezés szükséges



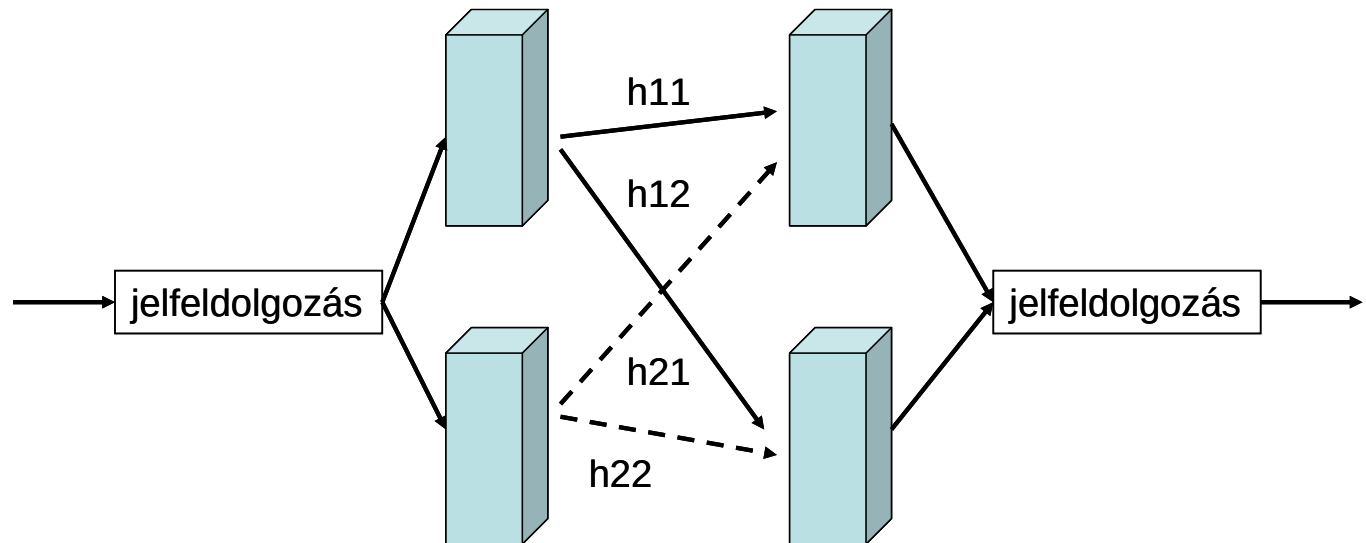
Követelmények a csatornakiosztással szemben:

- **adaptálódik** a pillanatnyi forgalmi igényekhez (több PRB használata ott ahol nagyobb a forgalom)
- a bázisállomások **koordinált** módon együttesen kezelik az erőforrás rácsot

Nem szabványos és kulcsfontosságú. Az egyes gyártók hálózatainak teljesítőképességét nagyban befolyásolja.

■ MIMO – Multiple Input Multiple Output

- több adóantenna (2 vagy 4), több vevőantenna (2 vagy 4)
- többféle célra használható megfelelő adás előtti/vétel utáni jelfeldolgozással



■ MIMO – Multiple Input Multiple Output

- antennák elhelyezése: „elég messze”, terminálon bajos lehet (pl. laptop 4 sarka)
- használati lehetőségek:
 - **nyalábformálás**: adott irányban nagyobb az antenna „erősítése” -> jobb lefedettség az irányban
 - adóoldali/vevőoldali **diverziti**: a több antennán adott/vett jelek megfelelő kombinálásával: jobb jel-zaj viszony
 - **interferencia törlés**: több vevő antennával bizonyos irányból jövő jelek törlése (kb. a nyalábformálás fordítottja)
 - **térbeli multiplexálás**: több adóantennán párhuzamosan több csomag küldése, azonos időben és frekvenciákon -> adatsebesség többszörözés
 - **többfelhasználós MIMO**: mint a térbeli multiplexálás, de több előfizetőnek szóló csomagok

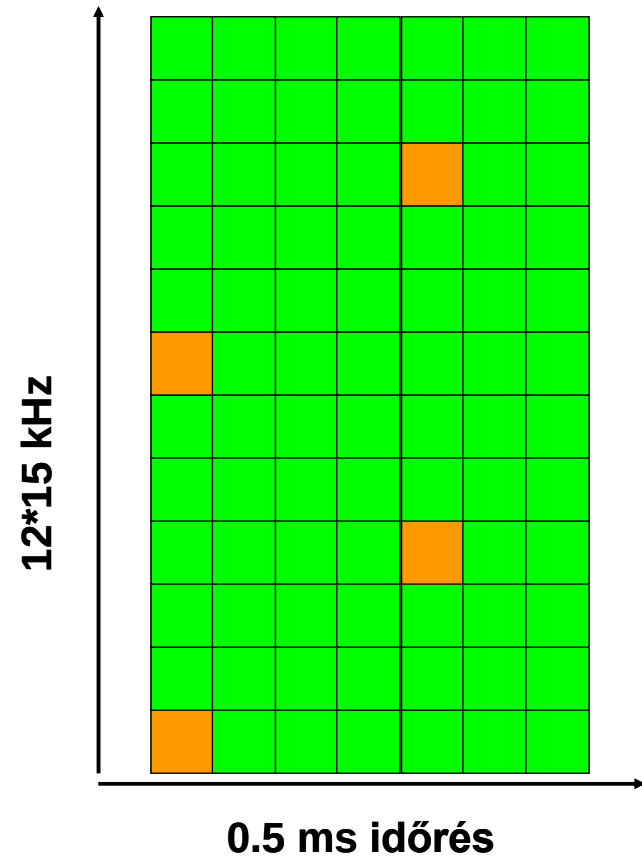
■ MIMO – Multiple Input Multiple Output

- térbeli multiplexálás lehetősége
- nagy jel-zaj viszonynál
- 2x2-es eset egyszerűen magyarázva: 2 ismeretlen, 2 egyenlet
$$y_1 = h_{11} \cdot x_1 + h_{21} \cdot x_2$$
$$y_2 = h_{12} \cdot x_1 + h_{22} \cdot x_2$$
- referencia jeleken végzett mérésekkel becsülhető csatornaparaméterek
- y_1 , y_2 meghatározható ha az antennapárok közti csatornák függetlenek
- nagy jel-zaj viszony, többutas terjedésű csatorna: sűrű beépítettség, beltér esetén használható effektíven
 - duplázza az átviteli sebességet

■ MIMO az LTE -ben

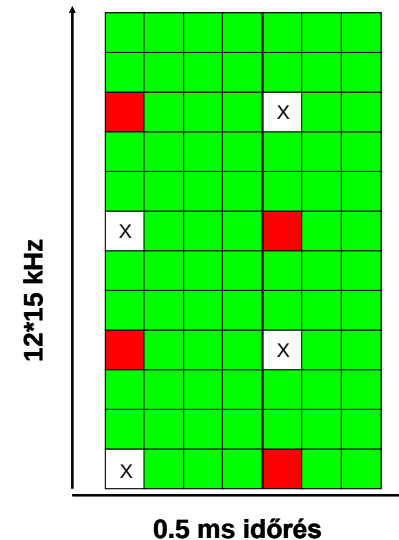
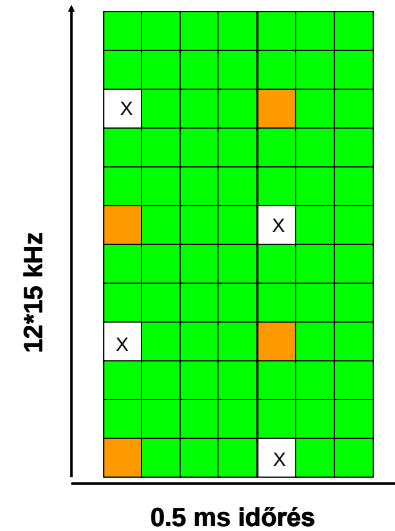
- 2 vagy 4 antenna mindkét oldalon
- rétegek: jelek előfeldolgozása
 - pl. 1 réteg – 1 adóantenna
 - 1 réteg – 2 adóantenna
- antennára kerülés előtt: előkódolás
- térbeli multiplexálás: egyidejűleg maximum két csomag adása/vétele (4 antenna esetén is)
 - sebesség duplázása lehetséges

- Ismert referencia jel szükséges
 - demodulációnál
 - szinkronizációhoz
 - csatorna minőség méréséhez
 - időben is, frekvenciában is változhat
 - DL irányban egyúttal cella azonosító is
 - egy PRB-ben 4 referencia szimbólum, az első és hátulról a harmadik szimbólumban, hat segédvivő távolságban
 - 4 elem a 84-ből nem visz adatot -
> elvi max fizikai sebesség 96 Mbps



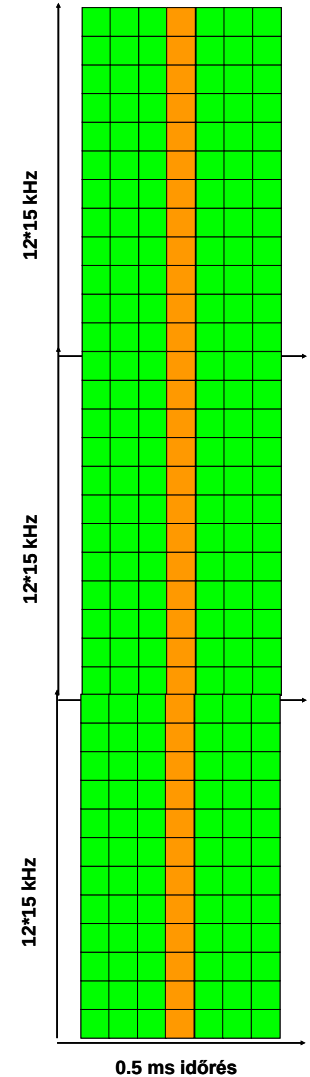
■ Többantennás eset

- az antennaelemek közti csatornabecsléshez fontos a referencia jel zavartalansága
- több antennán való adás esetén: különböző antennákon máshol vannak a referencia szimbólumok
- másik antennán adat sem küldhető ott -> a csatornamérést ne zavarja semmi
- némi veszteség az adatátvitelben
 - 2x2 antennánál 8 elem a 84-ből - > elvi max fizikai sebesség nem duplázódik, hanem 182.4 Mbps
 - 4 antennánál: két antenna jelén csak 2 referencia szimbólum, PRB-ként csak 72/84 határfok



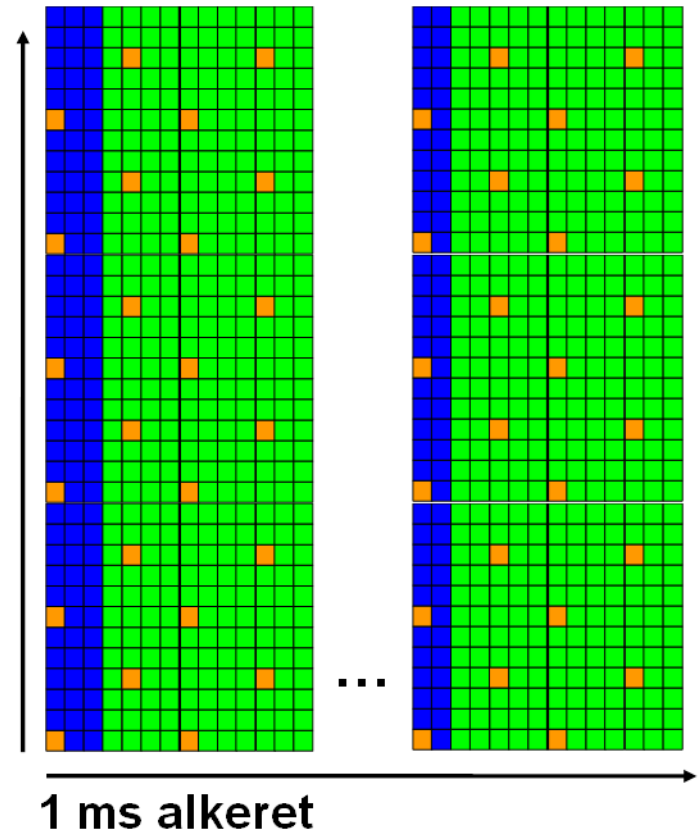
■ Uplink referencia jelek

- uplink csatornaminőség becsléséhez, illetve koherens vételhez itt is szükség van referencia jelre
- frekvenciában multiplexálni az adattal nehézkes lenne (a DFT-IFFT miatt)
- időben van multiplexálva az adattal: minden időrészben a negyedik OFDM szimbólum, a teljes UE által használt sáv szélességben (6/7-es kihasználtság)
- megfelelő jelek definiálva, szomszédos cellák UE-jei ne zavarják egymást
- csatornamérés: teljes sáv szélességben kellene ismerni
 - időnként UE a teljes sávra kiterjedő referencia jelet ad (channel sounding)



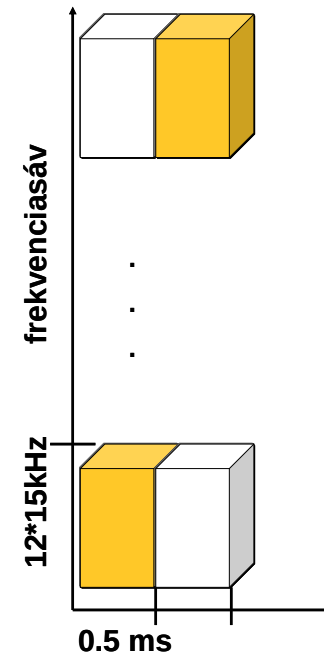
■ Letöltési irányú vezérlőinformációk

- melyik UE mikor, milyen transzport formátumban, melyik erőforrás blokkokon fog kapni
- melyik UE mikor, milyen transzport formátumban, melyik erőforrás blokkokon adhat
- fizikailag: az alkeret első maximum három OFDM szimbóluma
- QPSK, erős hibavédő kódolás
- további overhead
- fizikai letöltési irányú kontroll csatorna (PDCCH)



■ Feltöltési irányú vezérlőinformációk

- pozitív és negatív nyugták
- UE által mért csatornaminőség jellemzője periodikusan (CQI, Channel Quality Indicator)
- adási kérelmek
- transzport formátumot nem kell jelezni
- akkor is kell adni, ha adatforgalom nincs
- együtt az adattal (DFT-IFFT előtt időben összefésülve)
- ha nincs adat: a sáv két szélső PRB-jében, időreseként váltakozva
 - következő PRB-k, ha szükséges
- PUCCH

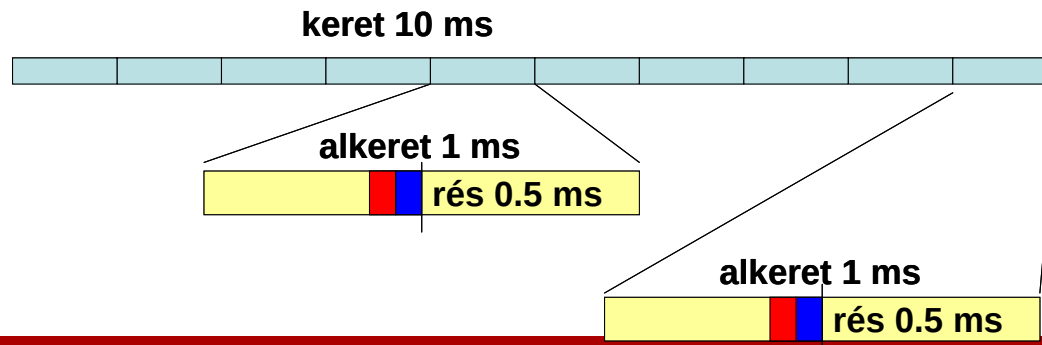


■ Kommunikáció előtt

- hálózatot kell találni
- szinkronizálódni kell a cellában alkalmazott keretszerkezethez

■ Szinkronizációs jel

- elsődleges és másodlagos szinkronizációs jel
- az első és hatodik alkeret első időrészében az utolsó két szimbólumban
- frekvenciában: a sáv közepén 6 PRB

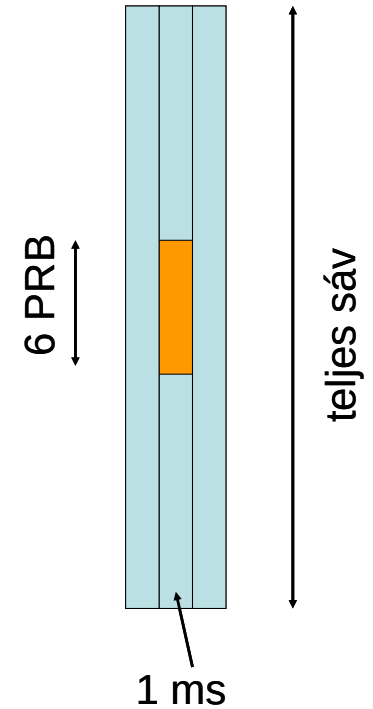


■ Cellakeresés

- háromféle elsődleges szinkronizációs jel van
- a mobil ezekre illesztett szűrővel keresi
- hol keresi (milyen frekvenciasávban): a készülékbe táplált lehetséges vivőkön, illetve korábbi tapasztalatok alapján
- ha megvan: 5 ms (fél keret) szinkronba kerül
 - továbbá: a cellaazonosító csoporton belül (3 féle) megvan a cellaazonosító jel
- ezután: másodlagos szinkronizációs jel párokat keres (s_1 , s_2 a két félkeretben)
 - ha ez megvan, akkor a keretszinkron is
 - továbbá: a másodlagos szinkron jel egyértelműen azonosítja a cellaazonosító csoportot

▪1. A mobil véletlen hozzáférési előtagot (preamble) küld

- egy kijelölt alkeretben (1 ms) a sáv közepén, 6 PRB-ben
- nagy forgalom esetén több is kijelölhető -> frekvenciában is és időben is
- nem ismert uplink időzítés miatt 0.9 ms hosszú üzenet küldése
- adássiettetés (timing advance) problémája miatt
- ez maximum 15 km távolság az állomástól
 - maximum 0.05 „fényms” távolság
- nagyobb cellák esetén a véletlen hozzáférési alkeret után sem szabad hasznos információ számára lefoglalni



- Release 10 és utána
 - Elérhető az 1 Gbps (eredeti ITU 4G definíció)
 - Vivőaggregáció
 - Több, egyenként is széles vivő használata (maximum 5 x 20 MHz)
 - Lehet folytonos, egymás melletti vivőkkel, nem folytonos, de frekvenciában egymáshoz közeli vivőkkel, de akár több sáv tartomány is (Pl.: 800 MHz, 1800 MHz, 2600 MHz)
 - Többfelhasználós MIMO (Multi-user MIMO)
 - Több egyszerre küldött adatstream több felhasználónak
 - Nem növeli egy adott felhasználó átviteli sebességét, de a teljes cella elérhető forgalmát igen
 - 256QAM moduláció

- Példa:
 - 20 MHz LTE 2x2 MIMO: 150 Mbps a rádiós stack tetején (~nettó sebesség)
 - 3 vivővel: 450 Mbps
 - 256QAM, 4x4 MIMO, 2 vivő: ~1200 Mbps
- Meddig lehet elmenni?
 - Amíg van sáv, lehet növelni az aggregált vivők számát
 - Release 13-ban 32 vivő aggregációja lehetséges
 - De senkinek sincs ennyi sávja