

Az IEEE 802.11 szabványcsalád



Dr. Fazekas Péter

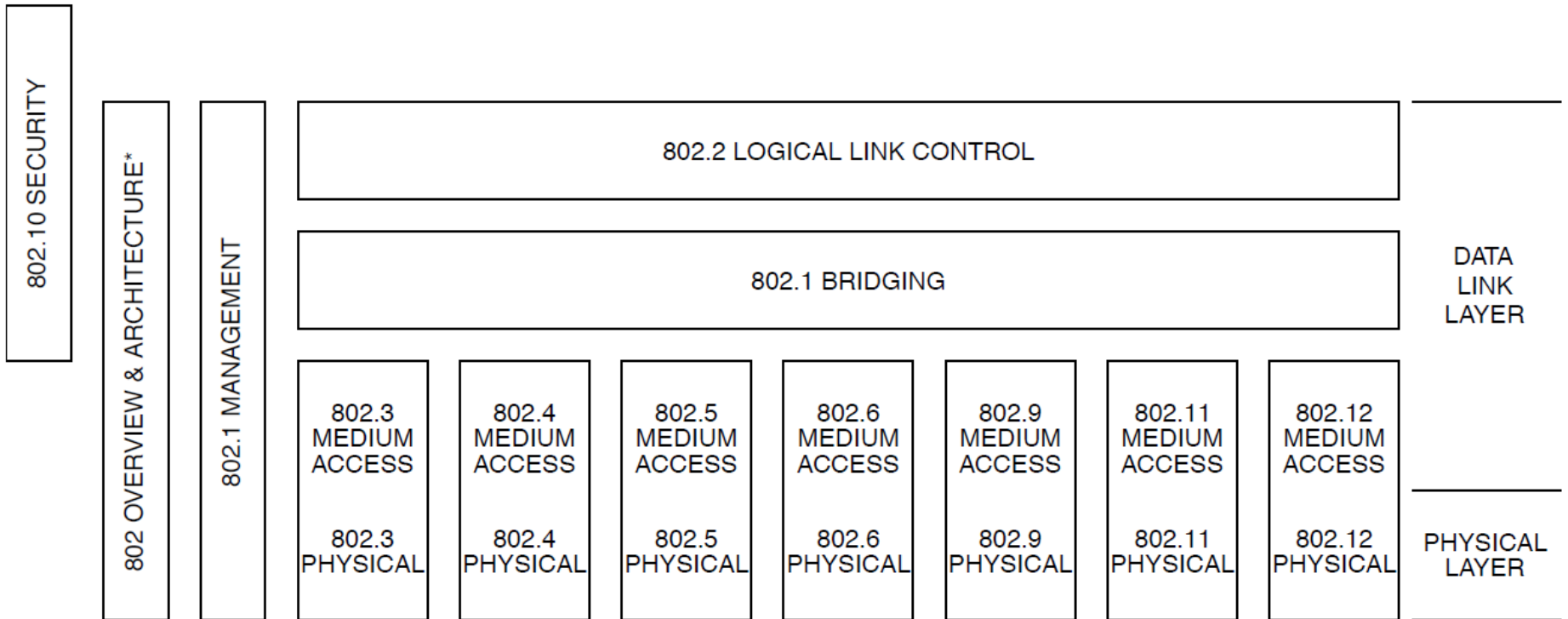
Balogh András

BME-HIT

Elnevezések, fogalmak

- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
- 802. elnevezésű szabványok: LAN, MAN, PAN
 - Jelentős létező:
 - 802.3 Ethernet
 - 802.11 vezeték nélküli
 - 802.15 vezeték nélküli, kis hatótávolságú
 - 802.16 Wimax, vezeték nélküli MAN
 - Jelentős megszűnt
 - 802.2 LLC
 - 802.5 Token Ring
 - 802.6 DQDB
- Ábrák forrása: IEEE szabvány, vagy külön jelölve

Elnevezések, fogalmak



Elnevezések, fogalmak

- Wi-Fi – Wireless Fidelity
- Wi-Fi Alliance
 - A korai 802.11 termékek nem tudtak együttműködni
 - A szabványban nincs tesztelési módszer leírva
 - 802.11b 1999:
 - Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA)
 - Interoperabilitási tesztek elvégzése
 - Innentől van Wi-Fi elnevezés
 - 2002-től Wi-Fi alliance
 - A „Wi-Fi certified” logót adják ki, ha egy termék sikeresen végigment az interoperabilitási teszteken
 - Amin nincs logó, az még működhet, csak nincs a Wi-Fi alliance által tesztelve
 - Drága

Elnevezések, fogalmak

- **Kompatibilitás:**
 - Az eszköz más, tanúsítvánnyal rendelkező eszközökkel való együttműködési teszteken átment
- **Konformancia tesztelés:**
 - A protokoll megfelelően működik
- **Teljesítőkéesség:**
 - A WiFi alliance szerinti elvárt minőséggel működik
- **Wireless Ethernet**
- **Wireless LAN (WLAN)**

A 802.11 szabványcsalád

- **802.11-1997 (802.11 legacy)**
 - Az eredeti szabvány, 2.4 GHz-es sáv, három fizikai átvitel
 - 1 vagy 2 Mbps sebesség
- **802.11a-1999**
 - 5GHz sáv, OFDM jelalak, max. 54 Mbps sebesség
- **802.11b-1999**
 - Ez hozta meg az áttörést
 - A 802.11 egyszerű kiterjesztése, 11 Mbps átvitel
- **802.11g-2003**
 - A 2.4 GHz-es sávban, de a 802.11a–nak megfelelő OFDM hullámformával működik, 54 Mbps
- **802.11-2007**
 - Az addigi kiegészítésekkel együtt egybegyűrt szabvány

A 802.11 szabványcsalád

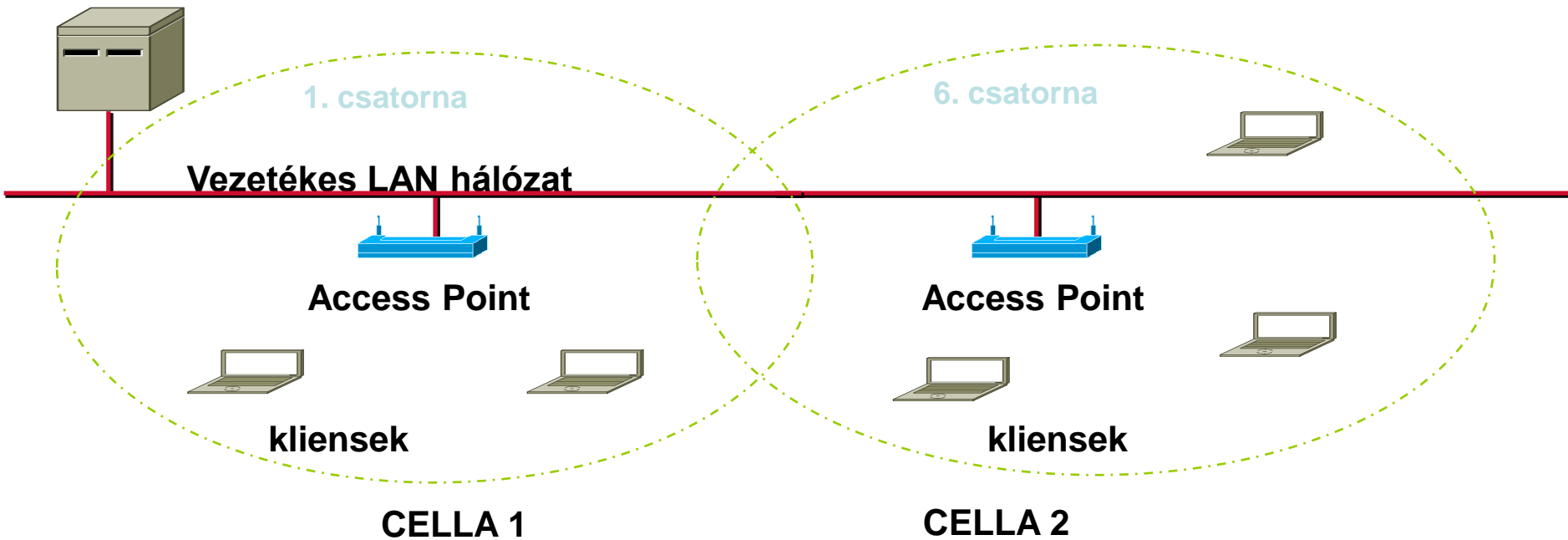
- **802.11n-2009**
 - 5 és 2.4 Gh-zen is működik, OFDM, többantennás átvitel, szélesebb sáv, akár 600 Mbps elvi sebesség.
 - A gyártók már hamarabb, 2007-es draft alapján kijöttek termékekkel
- **802.11-2012**
 - Egységesítés
- **802.11ac-2013**
 - A 802.11n továbbfejlesztése, OFDM, 5GHz sáv, nagyobb sáv szélesség, MIMO, nagyobb állapotszámú moduláció, elvi sebesség 6 Gbps fölött 802.11ad
- **802.11ad-2012**
 - WiGig alliance kezdett el kidolgozni egy, a 60 GHz-es sávban működő, kis lefedettséget biztosító multi-Gbps rádiós szabványt. IEEE kompatibilis lett, többféle hullámforma, akár 7 Gbps sebesség
- **802.11af-2014**
 - Ez a „Super-WiFi”. A nem használt TV sávokban működik, kognitív rádiós megoldás. 802.11ac alapú, keskenyebb sávokon, akár 400 Mbps
- **802.11ah-2016**
 - 1 GHz alatti ISM sávokon, nagy hatótávolság, kisebb sebesség.

A 802.11 szabványcsalád

- **802.11e -2005**
 - Az eredeti MAC protokoll kiterjesztése, QoS támogatással, illetve hatékonyság növelése céljából. WMM (Wireless MultiMedia), WME (Wireless Multimedia Extension) néven fut, korábban is kiadtak ilyen tanúsítványt
- **802.11i -2004**
 - Új biztonsági protokoll, a WPA (WiFi Protected Access) tanúsítvány
- **802.11p -2010**
 - Kiegészítés, a járművek közti kommunikáció, illetve az intelligens közlekedési rendszerek számára. IEEE 1609 WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment) alkalmazási protokoll hordozója
- **802.11r-2008**
 - Gyors handover, VoIP kapcsolatok számára
- **802.11k-2008**
 - Rádiós erőforrás menedzsment, mérés/riportolás, gyors AP választás
- **802.11v-2011**
 - Hálózatmenedzsment
- **802.11s**
 - Szövevényes (mesh) hálózat kialakítása
- **802.11h-2003**
 - Spektrum és teljesítmény allokációs kiegészítések

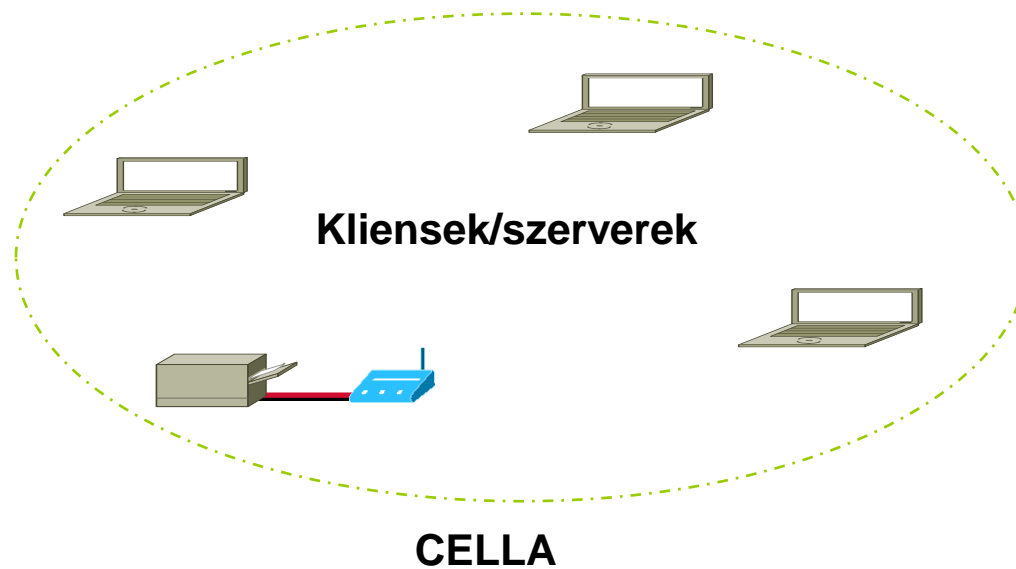
Mi az a Wireless LAN?

- A vezetékes LAN hálózat vezeték nélküli meghosszabbítása.



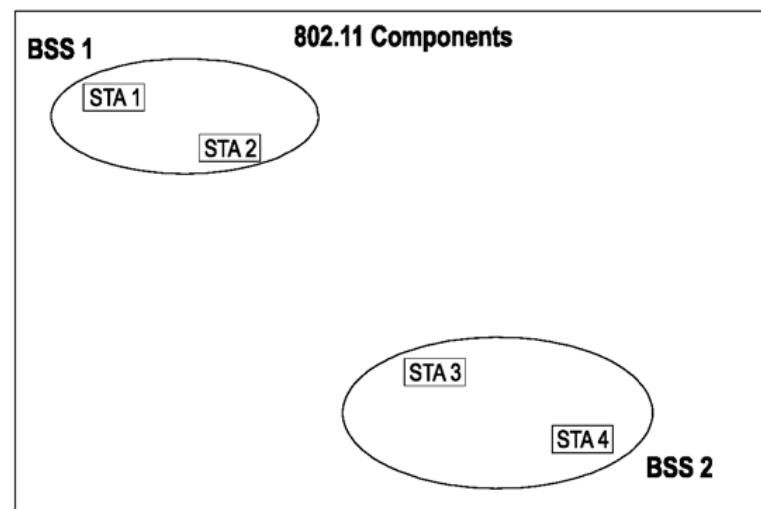
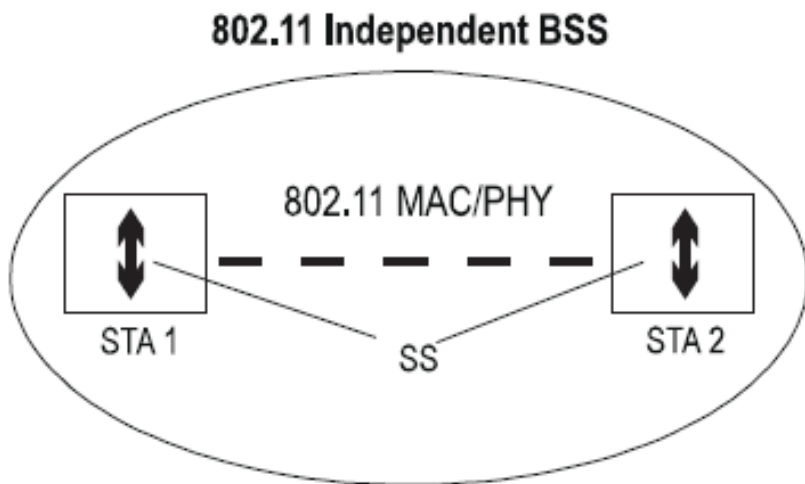
Mi az a Wireless LAN?

- A vezetékes LAN hálózat vezeték nélküli meghosszabbítása.
- Vezeték nélkül megvalósított számítógép hálózat.



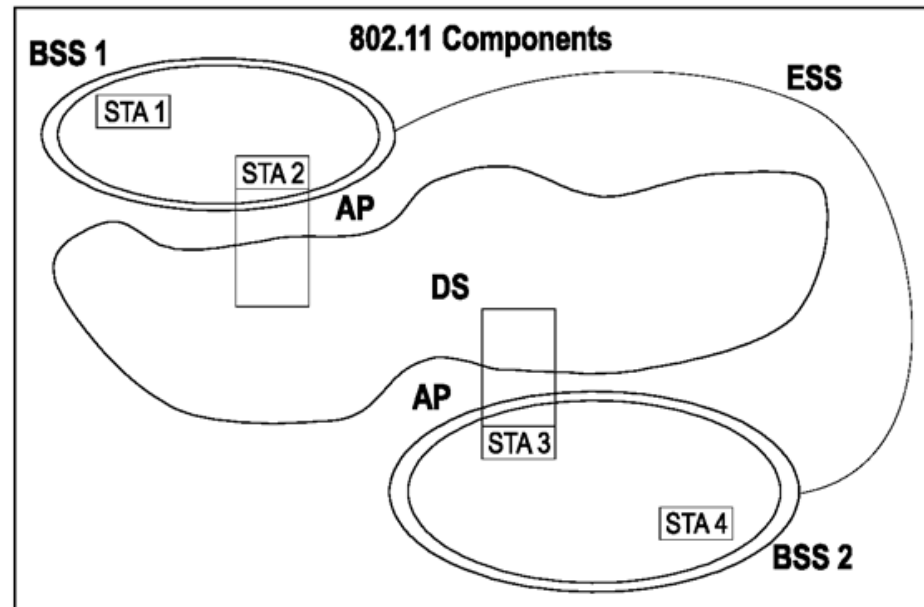
802.11 hálózatok felépítése

- **Basic Service Set (BSS)**
 - Egy cella a 802.11 terminológiában
 - **IBSS** (Independent BSS), ha nem csatlakozik sehová
- **Station (STA)**
 - A vezeték nélküli állomás, amely képes a 802.11 rádiós protokollal kommunikálni
 - Ha STA-k kommunikálnak egy IBSS-ben: ad-hoc mód



802.11 hálózatok felépítése

- **Access Point (AP)**
 - Amin keresztül egy hálózathoz a STA hozzáfér
- **Distribution System (DS)**
 - Az AP-eket egy elosztó hálózat köti össze
- **Extended Service Set (ESS)**
 - Egy 802.11 hálózat a felsőbb OSI rétegek számára:
 - BSS
 - +AP
 - +DS



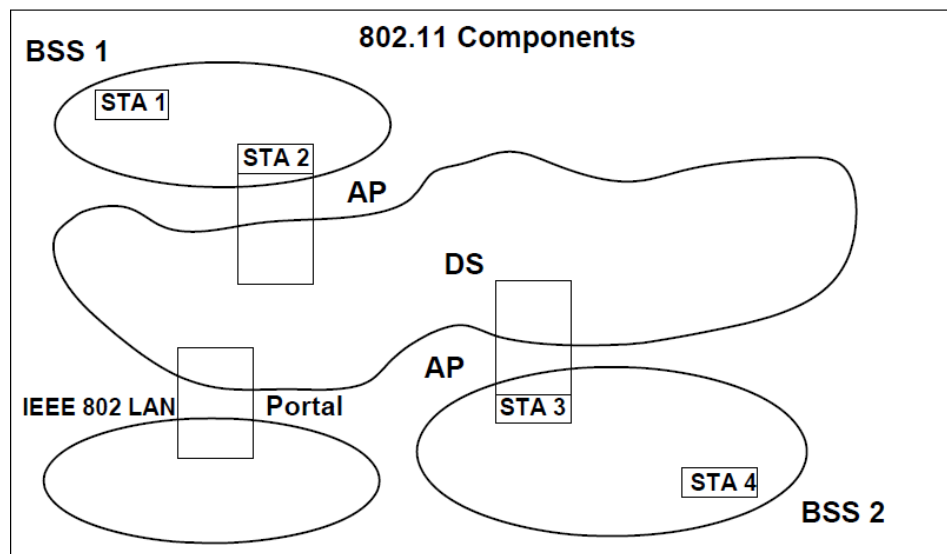
802.11 hálózatok felépítése

- **Portal**

- A 802.11 és egy másik 802 LAN összekapcsolására szolgáló eszköz
- Gyakorlatban: az AP tartalmazza, így ez „híd” (bridge) az Ethernet háló felé

- Mindezt „**Infrastruktúra mód**”-nak hívjuk

- Létezik **ad-hoc** mód:
 - Nincs Infrastruktúra
 - Nincs AP

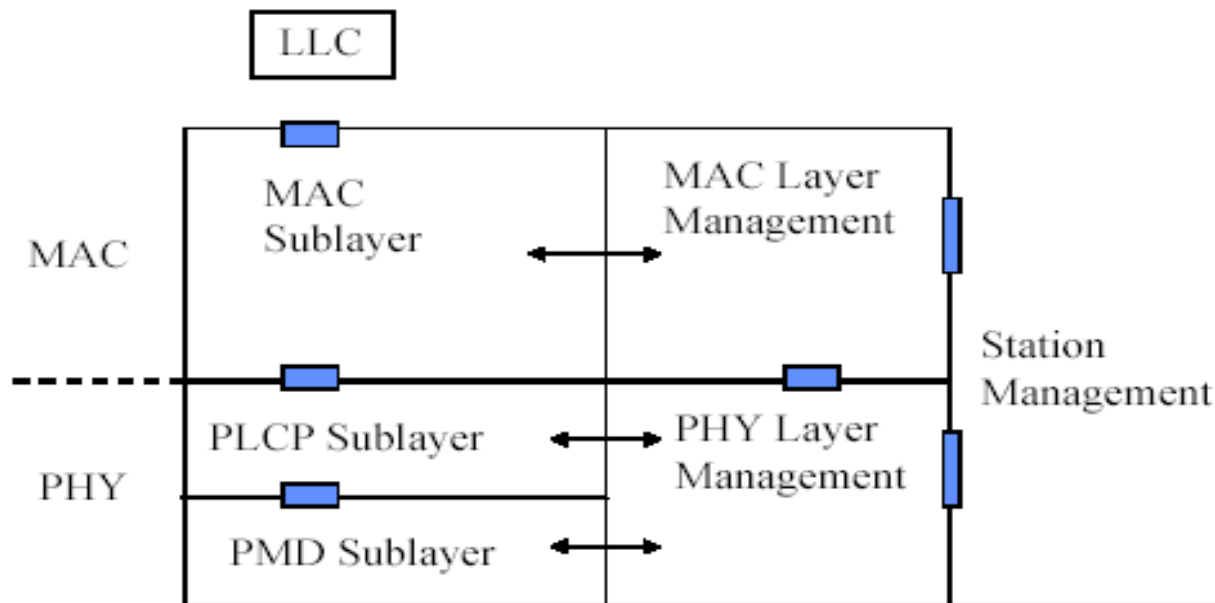


802.11 hálózatok felépítése

- **Az elosztó rendszer...**
 - ...konkrét megvalósítását a szabvány nem definiálja, csak az általa nyújtott szolgáltatásokat
 - ...kiterjesztett hálózati szolgáltatásokat nyújt a hozzákapcsolódó BSS és LAN integrációkon keresztül
 - ...tetszőleges bonyolultságú vezeték nélküli hálózat kialakítását lehetővé teszi
 - ...függetlenül definiálható bármelyik fizikai megvalósítás jellegzetességeitől, ezért a közeghozzáférést szabályzó réteg fölött elhelyezkedő réteg számára úgy tűnik, mintha a különálló BSS-ek egyetlen független BSS-et alkotnának

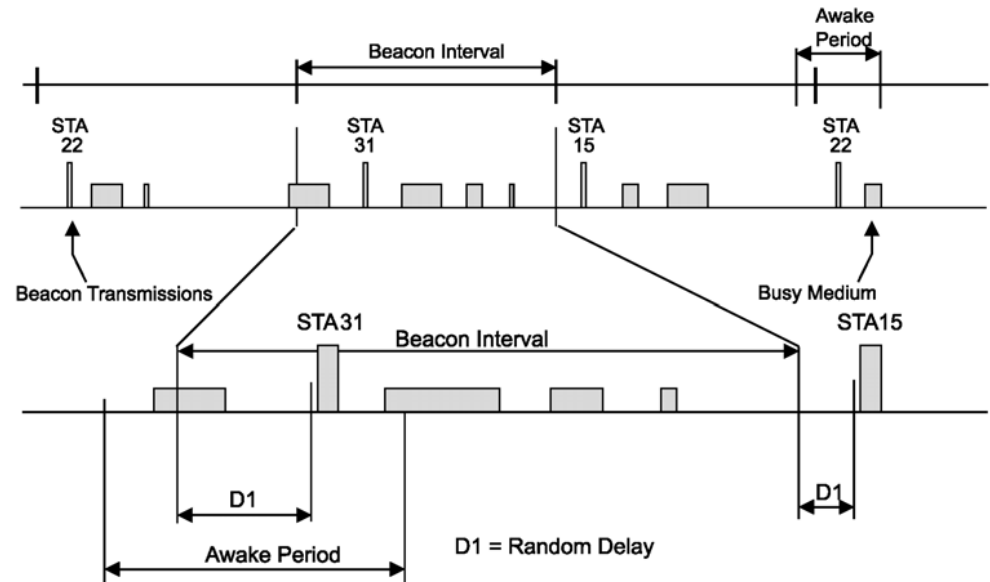
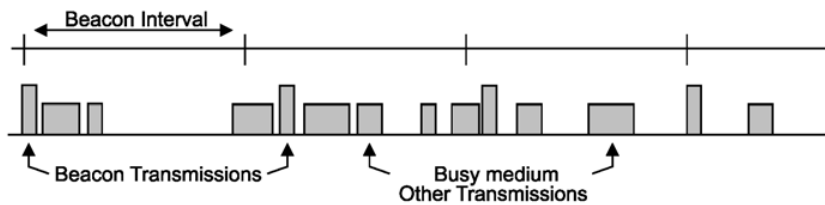
Protokoll rétegek

- A 802.11 protokoll a MAC és a Fizikai réteget definiálja
 - Mint minden 802.x protokoll
- 802.2 LLC (Logical Link Control) alatt



- **MAC Entitás**
 - Aszinkron adatátviteli szolgáltatás az LLC felé
 - Pont-pont és Broadcast / multicast címzés és átvitel
 - Alapvető: osztott médium, nincs előre allokáció, minden STA veszi a fizikai/MAC keretet, amelyről a cím mezők alapján dönti el, ha neki szól
 - Közeghozzáférés-vezérlés
 - 802.11e QoS kiegészítéssel
 - Fragmentáció / összefűzés
 - Nagyobb LLC csomagok esetén
 - Sorrendhelyesség megtartása / sorrendcsere
 - Hitelesítés / titkosítás
- **A MAC rétegek által ellátott tipikus szabványos funkciókon túl a 802.11 MAC további funkciókat is ellát, melyeket tipikusan felsőbb rétegek szoktak:**
 - pl. fragmentáció, csomag újraadás, nyugtázás.

- MAC Layer Management Entity (MLME)
 - Szinkronizálás
 - Egy BSS-ben minden STA közös órához való szinkronizálása ún. beacon keretekkel
 - Ha van AP, akkor az AP órájához
 - Ha nincs: elosztott módszer
 - Külön módszer definiálva mesh hálózatra



- **MAC Layer Management Entity (MLME)**
 - Szinkronizálás
 - Egy BSS-ben minden STA közös órához való szinkronizálása ún. beacon keretekkel
 - Ha van AP, akkor az AP órájához
 - Ha nincs: elosztott módszer
 - Külön módszer definiálva mesh hálózatra
 - Teljesítmény menedzsment
 - STA-k alvó állapota, keveset fogyaszt
 - Roaming (cellaváltás)
 - MAC MIB (Management Information Base) fenntartás

Protokoll rétegek

- **Physical Layer Convergence Protocol (PLCP)**
 - PHY-specifikus, közös PHY SAP-ot biztosít:
 - MAC kereteket (MPDU) fizikai keretekké alakítja
 - Clear Channel Assessment jelet biztosít (vivőérzékelés)
- **Physical Medium Dependent Sublayer (PMD)**
 - moduláció és kódolás
 - hullámforma
- **PHY Layer Management**
 - csatorna hangolás – link adaptáció, átviteli sebesség adaptáció
 - PHY MIB fenntartás
- **Station Management**
 - a MAC és a PHY menedzsmenttel működik együtt, illetve az együttműködésüket hangolja össze

Közeghozzáférési eljárás

- **Elosztott: Distributed Coordination Function (DCF)**
 - Ahol a STA-k ugyanazt az egyszerű szabályt alkalmazzák a rádiócsatorna megszerzésére, mindenféle központi „döntőbíró” nélkül
 - Vivőérzékeléses eljárás: a STA méri, hogy üres-e a csatorna, mielőtt hozzáfér
- **Központosított: Point Coordination Function (PCF)**
 - Ahol az AP vezérli, hogy melyik terminál mikor fér a csatornához
 - Lekérdezésen (polling) alapul
- **Versengéses időszak: Contention Period (CP), DCF**
- **Versenymentes: Contention-free Period (CFP), PCF**
- **Versengéses és versenymentes időszakok követik egymást**
 - Gyakorlat: Mivel a PCF működés opcionális a szabványban, a gyártók nem nagyon valósítják meg.

Közeghozzáférési eljárás

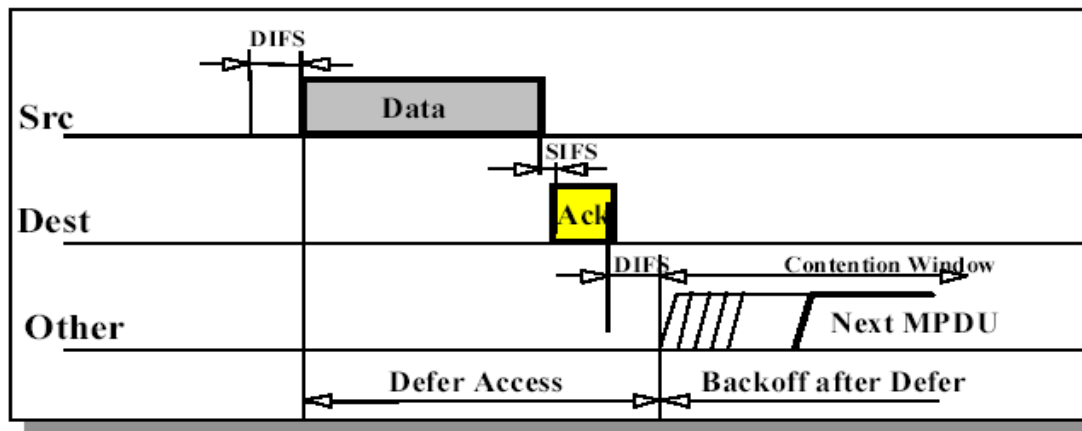
- Az alap közeghozzáférési módszer a DCF
 - Carrier Sense Multiple Access megoldásra épül,
 - Collision Avoidance mechanizmussal kiegészítve (CSMA/CA)
 - Eredeti Ethernet MAC: CSMA/CD (Collision Detection) alapú, ütközés érzékelés
- Amikor keret létrejön, akkor az adni kívánó állomás figyeli a közeget: méri, hogy van-e forgalom
 - CCA: Clear Channel Assessment jel
 - Hogyan méri: általában egyszerű energia-detekció: vett minták négyzetes összege nagyobb egy küszöbnél
- Ha a közeg foglalt, akkor egy másik állomás éppen ad, így elhalasztja az adását egy későbbi időpontra
- Akkor hatékony, ha a közeg nem túl terhelt, ilyenkor minimális késleltetéssel adhatnak
- Előfordulhat, hogy több állomás egyidejűleg szabadnak érzékeli a közeget és egyszerre kezd adni: ütközés

Közeghozzáférési eljárás

- Az ütközési helyzeteket fel kell tudni ismerni és így a MAC réteg újraadhatja a csomagot és nem a felsőbb rétegeknek kell ezzel foglalkozni, ami jelentős késleltetést okozna
 - Ethernet (CSMA/CD) esetén az ütközést az adó állomás ismeri fel és ezután egy ún. újraadási fázisba megy át
 - Adó detektálja, hogy egyidejűleg más adás is van a közegen, abbahagyja a forgalmazást
- **CD-t WLAN-oknál nem lenne egyszerű alkalmazni**
 - Adás közben figyelni, hogy más is ad-e: Full Duplex rádiós képesség -> dupla rádiós hardver
 - Saját adás elnyomja a másik, ütközést okozó jelet
- **Az adni kívánó STA érzékeli a közeget (CCA), ha foglalt, akkor elhalasztja az adását: backoff mechanizmus**
 - Ha üres a médium, akkor egy előre definiált időig várnia kell
 - Ez a DCF keretek közti idő (DIFS, DCF Inter Frame Space)
 - A DIFS idő letelte után szintén a backoff mechanizmus által meghatározott számú üres időrésnek kell következnie a csatornán

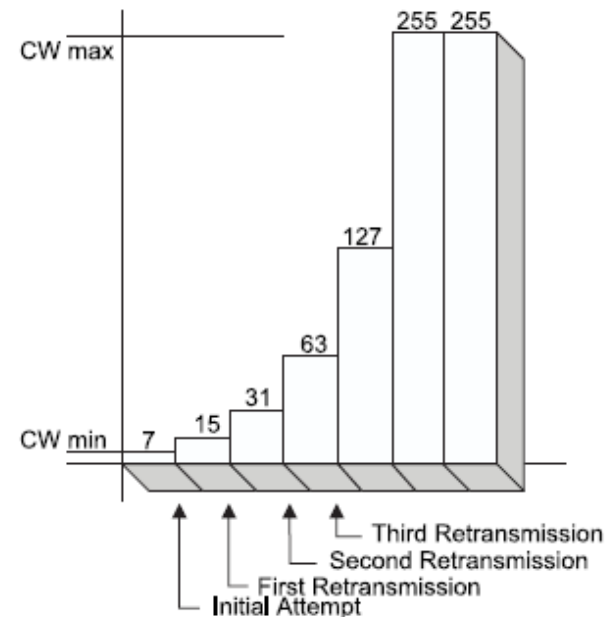
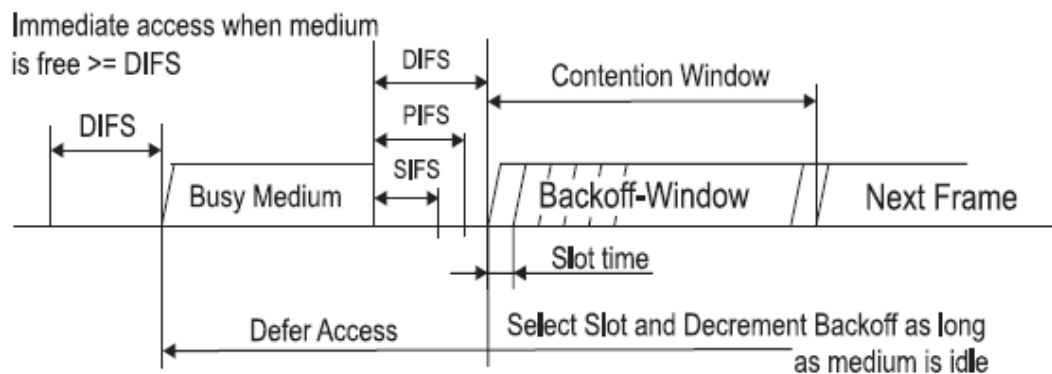
Közeghozzáférési eljárás

- Ha a médium végig üres marad, akkor leadja a MAC keretet
- A vevő állomás ellenőrzi a vett csomag CRC-jét, nyugtát (ACK) küld
 - SIFS (Short Interframe Space) idő után
 - A SIFS kisebb, mint a DIFS, hogy a harmadik állomás ne kezdhesse el adni a nyugta elküldése előtt
 - Multicast/broadcast címre küldött keretekre nincs nyugta
- A nyugta vétele jelzi az adónak, hogy nem történt ütközés.
 - Ha az adó nem kapott nyugtát újra küldi a csomagot amíg nyugtát nem kap vagy el nem dobja adott számú próbálkozás után.



Közeghozzáférési eljárás

- **Várakozási idő (backoff):**
 - Minden állomás magának sorsolja
 - Véletlen szám 0 és CW (Contention Window) között
 - Időrészek számában kifejezve ennyit kell majd várakozni
 - Ez a BC, backoff counter
 - CW értéke attól függ, hogy hányadszorra próbálja leadni az adott keretet
- **Exponenciális backoff: kettő hatványai szerint nő a CW a próbálkozások számával**



Közeghozzáférési eljárás

- **Mikor van Backoff (véletlen idejű várakozás)?**
 - Foglaltnak érzékelt csatorna esetén
 - Ütközés esetén (nem jön ACK)
 - A próbálkozások számával nő a CW
 - Sikeres átvitel esetén is
 - Így lesz fair
 - CW visszaáll CW_min-re (7)
 - Mindig kell várni legalább 0...7 között sorsolt darabszámú időrést
- **Mi számít várakozásnak?**
 - Várakozás közben előfordulhat, hogy más adás bukkan fel a csatornán: ennek a végét meg kell várni
 - Utána DIFS ideig üres a csatorna
 - Utána minden üres időrésben csökkenthető eggyel a BC
 - Amikor BC=0 (lejárt a várakozás), akkor mehet az adás

Közeghozzáférési eljárás

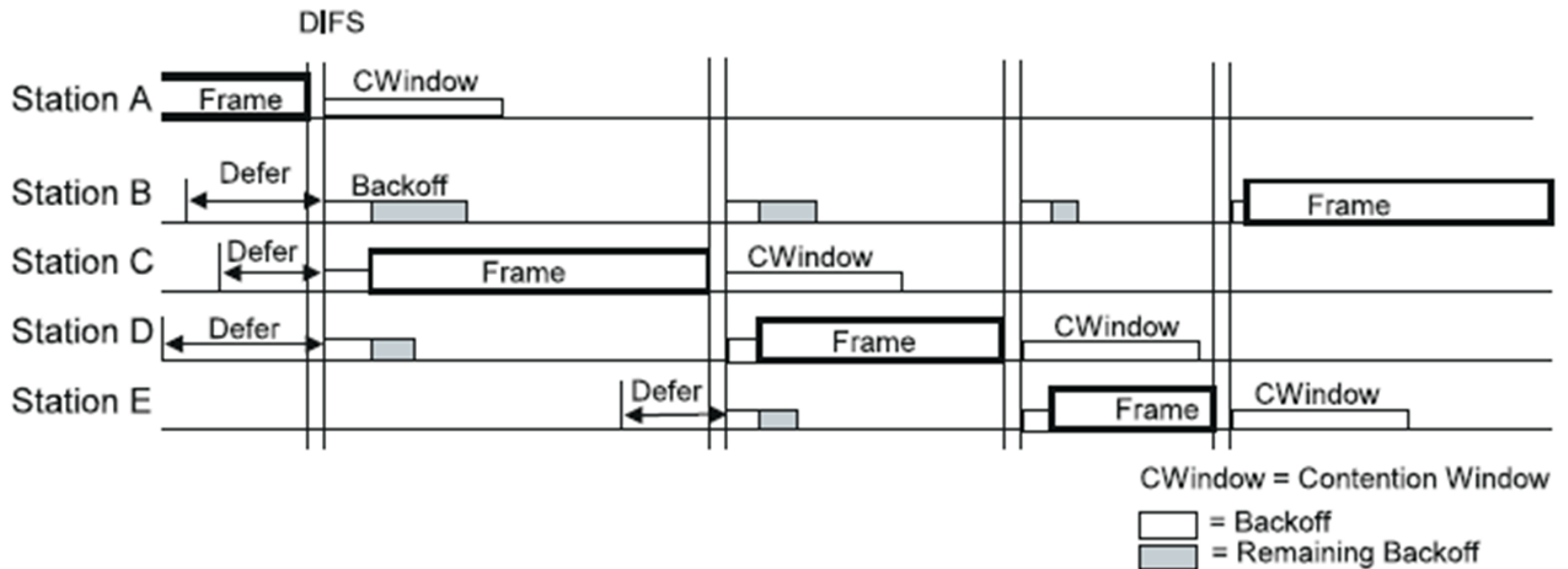
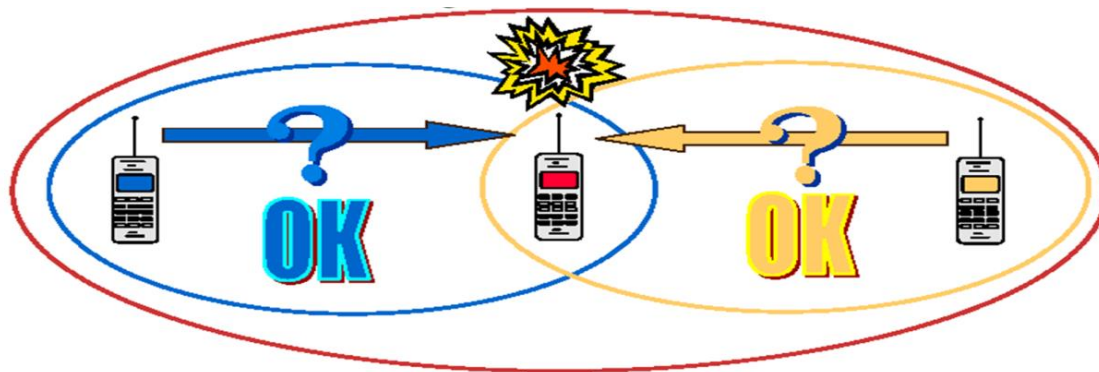


Figure 52—Backoff procedure

Közeghozzáférési eljárás

- Virtuális közeghozzáférés
 - Ne kelljen végig figyelni a csatornát
 - Vételt végző áramkörök addig standby módba mehetnek, energiaspórolás
 - A MAC keret fejléce tartalmazza, hogy milyen hosszú lesz az adás a befejező ACK-kal együtt, us-ban kifejezve
 - Aki ezt olvassa, az beállítja a NAV (Network Allocation Value) értéket: eddig nem is kell figyelnie a csatornát
 - Továbbá: rejtett terminál probléma
 - A ad B-nek, C nem hallja, ad B-nek -> B-nél ütközés

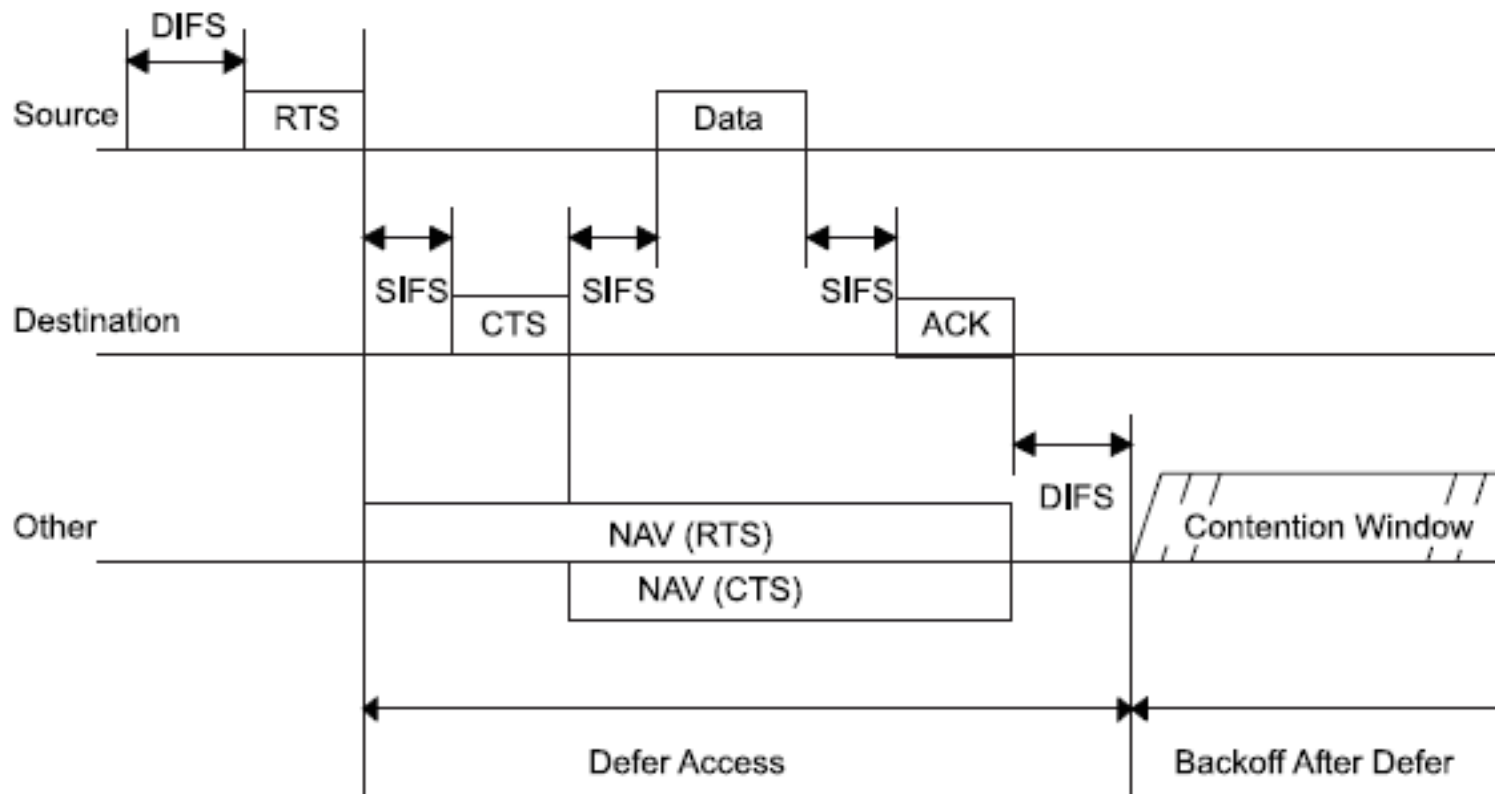


Közeghozzáférési eljárás

- Virtuális közeghozzáférés
 - Adás előtt RTS (Request to Send)
 - Benne a címzett, akinek majd a MAC keret szól
 - Benne az időtartam, ami az RTS-re elvárt válasz
 - SIFS után címzett válaszol: Clear to Send (CTS)
 - mindkettőben benne van a (majdani) adás hossza (ACK-kal együtt)
 - minden terminál, aki az RTS-t, CTS-t hallja, megjegyzi és beállítja a NAV-t, és addig nem próbálkozik
- RTS Threshold változó
 - Csak az ennél hosszabb csomagokra alkalmazható az RTS/CTS eljárás (rövidnél nem érdemes)
- Nagy sebességű fizikai réteg: RTS egy slot, MAC keret is egy slot

Közeghozzáférési eljárás

- Virtuális közeghozzáférés

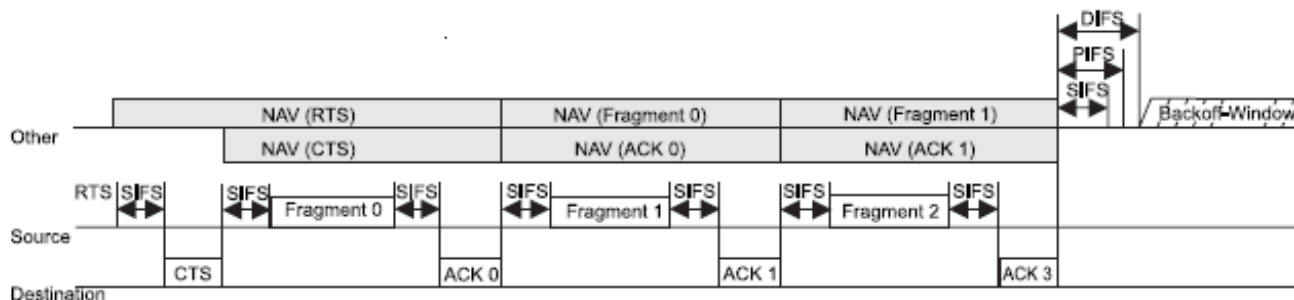


Közeghozzáférési eljárás

- Szegmentálás

- Feldarabolt felsőbb csomagok esetén

- MAC keretek egymás után, SIFS időnként leadandók
- Ha bármelyik elvész (nincs ACK): normál működéssel versenyzés az újraadásáért
- Ha sikerül megszerezni a csatornát, a maradék szegmensek megint egymás után küldhetők

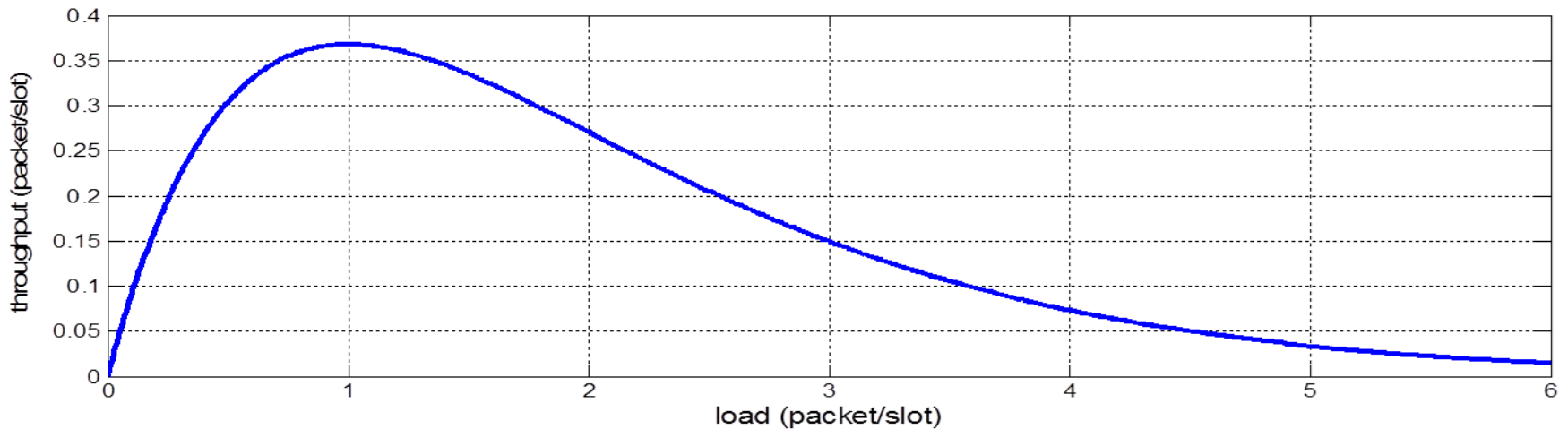


Közeghozzáférési eljárás

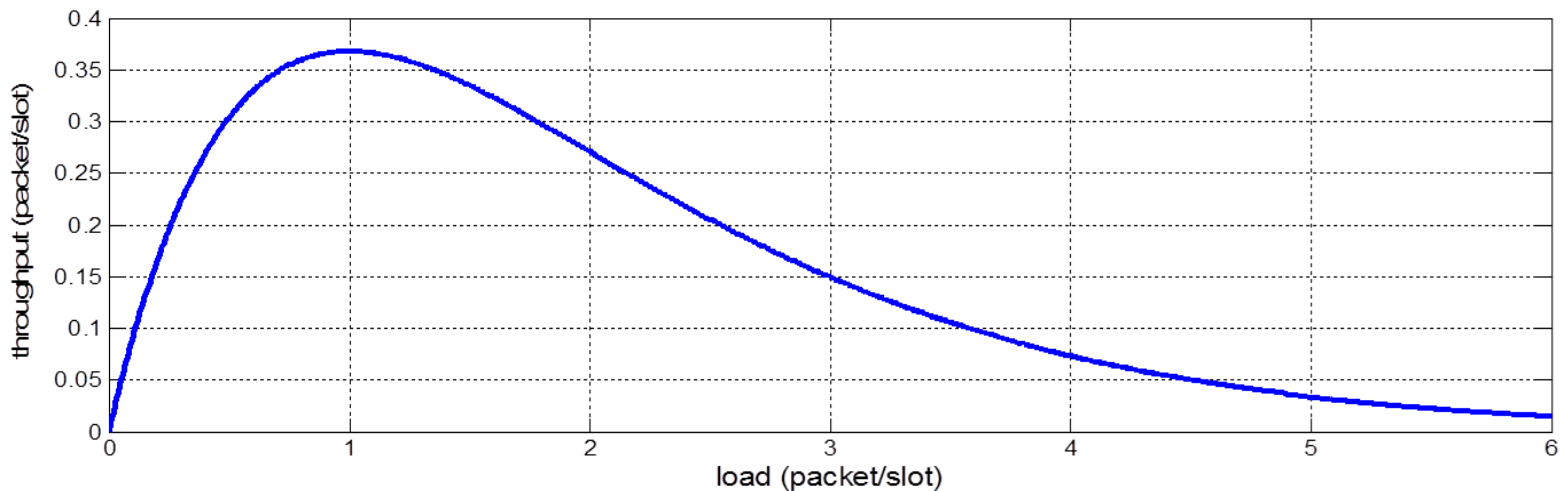
- **Szegmentálás**
 - Feldarabolt felsőbb csomagok esetén
 - MAC keretek egymás után, SIFS időnként leadandók
 - Ha bármelyik elvész (nincs ACK): normál működéssel versenyzés az újraadásáért
 - Ha sikerül megszerezni a csatornát, a maradék szegmensek megint egymás után küldhetők
 - Virtuális vivőérzékelés
 - Általában a következő keret végére mutat az időtartam mező
 - Ha elvész egy ACK akkor néhányan tévesen hihetik, hogy foglalt a médium
 - Tipikus az 1500 bytes keret (-> Ethernet örökség)
 - Nagysebességű fizikai rétegnél már inkább a multiplexálás a cél
 - Kevés ideig tart egységnyi adat átvitele
 - Nagysebességű verziókban ez a fő irány

Közeghozzáférési eljárás

- A CSMA alapú protokollok teljesítőképességéről
 - ALOHA protokollon alapulnak
 - Adok, ha nem sikerül, véletlen ideig várok
- A működés alapján intuitív: nagy forgalom -> sok átvinni kívánt csomag -> sokszor foglalt csatorna -> nagy backoff ablakok -> effektív rendszerátvitel csökkenhet, sok üresjárat lehet a backoffok miatt
- Levezethető terhelés vs. átvitel görbe



Közeghozzáférési eljárás



- Ez a jelleg minden véletlen hozzáférésű (versengéses) csatornát jellemez
 - A protokoll konkrét részleteivel a csúcstól „feljebb” lehet tolni, valamint a görbe csökkenését „laposabbá” tenni
- Mit is okoz a görbe alakja?
 - A görbe „felszálló ágán” lévő load-nál: ütközés -> újraküldés -> nagyobb load -> nagyobb throughput -> sikeres újraküldés -> load visszaáll
 - A görbe leszálló ágán: ütközés -> újraküldés -> nagyobb load -> kisebb throughput -> kevesebb csomag fér át -> sikertelen újraküldés -> load tovább nő -> throughput a nullához, load a végtelenhez tart
 - Egy adott terhelés fölött „elszáll” a rendszer

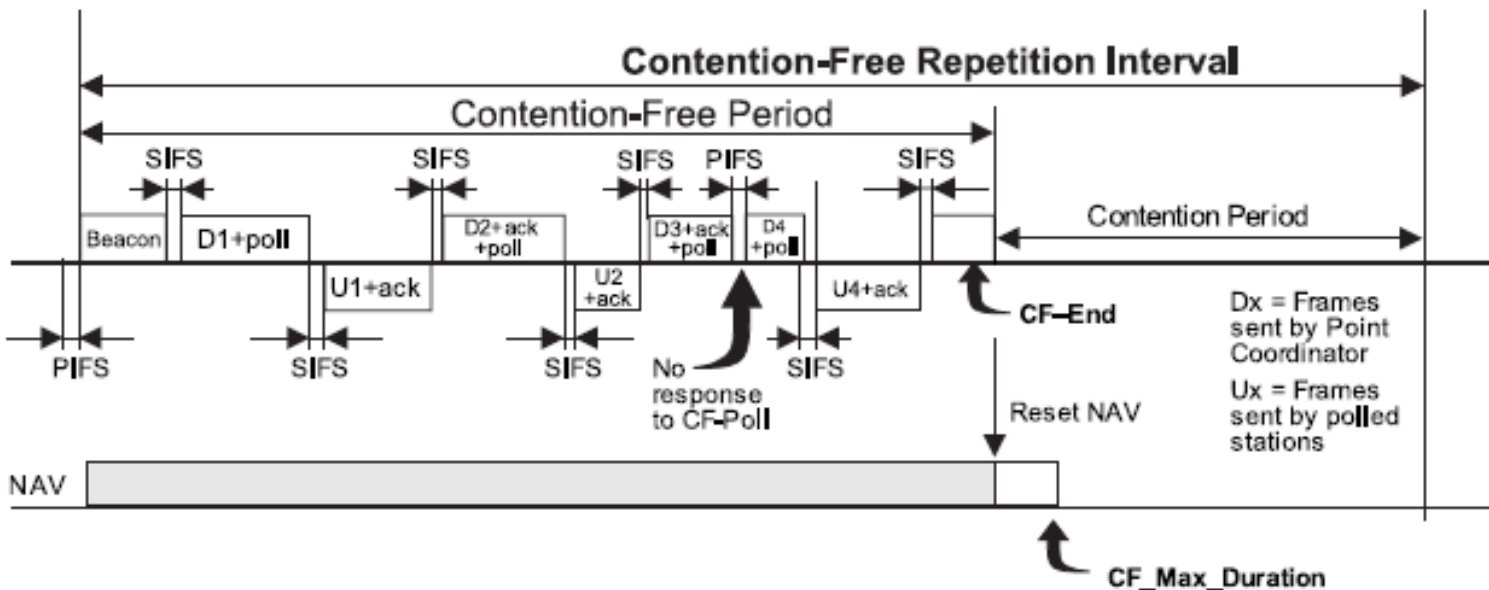
Közeghozzáférési eljárás

- A DCF-ről összességében
 - Nem determinisztikus működésű
 - Random backoff
 - Rosszul skálázódik a terheléssel
 - Más WiFi cellák, vagy más rendszerek jele is foglalja a csatornát
 - Nehéz Wi-Fi alapon QoS-t és szolgáltatás rendelkezésre állást biztosítani
 - Időkorlátos szolgáltatások, pl. video vagy beszédátvitel magasabb prioritást igényelnek, mint a sima adatátvitel
 - De...olcsó

Közeghozzáférési eljárás

- PCF mód

- AP lekérdezi a terminálokat és ezekre a terminálok válaszolnak
 - PIFS – CF IFS, az AP használja a többi állomás előtti közeghez való hozzáférésre
 - Értéke a SIFS plusz egy Slot Time
 - Illetve PIFS-t vár a következő poll előtt, ha nem kap választ



Közeghozzáférési eljárás

- PCF mód
 - AP lekérdezi a terminálokat és ezekre a terminálok válaszolnak
 - PIFS – CF IFS, az AP használja a többi állomás előtti közeghez való hozzáférésre
 - Értéke a SIFS plusz egy Slot Time
 - Illetve PIFS-t vár a következő poll előtt, ha nem kap választ
 - Lekérdezésre válasz SIFS idő múlva, ACK is, lekérdezés is mehet hasznos csomaghoz csatolva, nem kell neki külön megszerezni a csatornát
 - PCF időtartam alatt a DCF-ben részt vevők nem figyelik a csatornát (NAV-ot PCF végének idejére állítják)
 - A biztonság kedvéért PCF idején a kereteket SIFS időnként adják, így az alap terminálok soha nem csökkentik várakozási idejüket

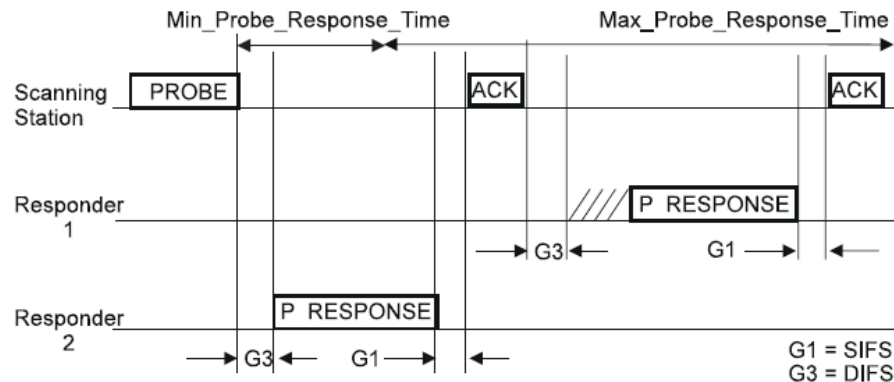
Közeghozzáférési eljárás

- **Miért nincs működő PCF implementáció?**
 - Nincs mechanizmus a terminálok igényeinek explicit jelzésére (van-e adnivalója)
 - Illetve nehézkes megoldani, az AP-hez való csatlakozás során adandó meg, hogy a STA akar-e a lekérdezendők listáján lenni
 - Tehát mindenki megadja, hogy akar, majd ha nincs adata, a lekérdezésre null választ ad
 - Így lehet sok felesleges lekérdezés, a csatornaidő elvesztegetése
 - Regionális frekvenciahozzáférési szabályok megkövetel(het)ik a „listen before talk” elvet
 - Illetve csatornafoglalási idő százalékban előírva
 - Ebbe még beleférne a PCF
 - Más rendszerek is működhetnek azonos sávban, ezeket nem illik aránytalanul zavarni

- Egy állomás egy létező BSS-hez akar kapcsolódni
 - Passzív pásztázás
 - Egy ún. Beacon Frame-t (jeladó, irányjelző) vár az AP-tól
 - A beacon keretet az AP periodikusan küldi, benne
 - Időbélyeg, szinkronizációs információ
 - SSID (hálózatazonosító)
 - Fizikai paraméterek, verziók
 - Alvó állapotban lévő STA-k számára értesítések
 - A véletlen hozzáférés miatt a beacon sem pontosan érkezik feltétlenül
 - Ha adott ideig nem talál ilyet, akkor másik frekvenciacsatornán folytatja

Menedzsment folyamatok

- Egy állomás egy létező BSS-hez akar kapcsolódni
 - Aktív pásztázás (Active Scanning):
 - Az állomás megpróbál egy AP-t találni
 - Probe Request Frame-t küld mindenkinek szóló broadcast címre (csupa 1-es cím)
 - Ezután Probe Response-t vár, amit erre van egy maximum idő a szabványban
 - Ebben kb. a beaconnak megfelelő információ
 - Több is jöhet, ezekre a STA ACK-ot küld
 - Probe responsok alapján választ egy AP-t, amihez majd csatlakozik



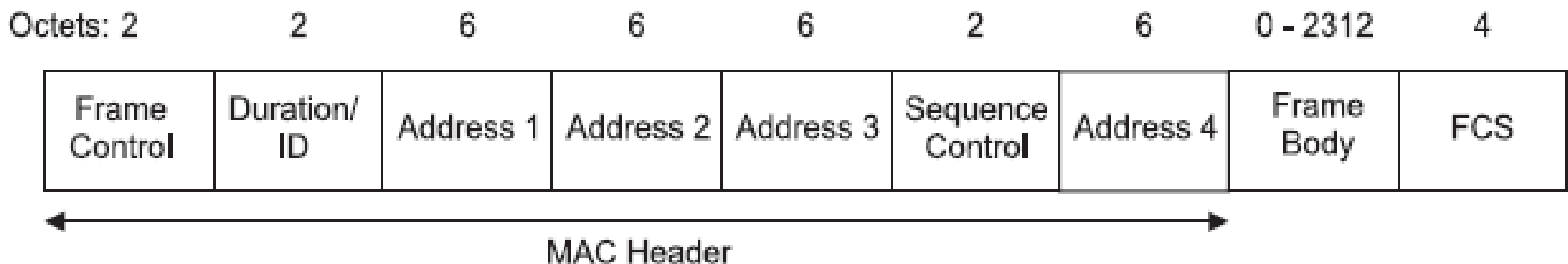
Menedzsment folyamatok

- **Hitelesítési eljárás:**
 - Hitelesítési üzenetváltás
 - Létezik a null hitelesítés (-> nyílt WiFi)
- **Csatlakozási eljárás:**
 - Sikeres hitelesítés után, információcsere a terminál és AP képességeiről, valamint néhány AP-s környezetben meglesz a mobil helye
- **Szinkronizáció megtartása:**
 - Az AP által küldött beacon keretek segítségével, periodikusan (CSMA miatt némi késés lehet)
- **Handover:**
 - A mobil dönt, új AP passzív vagy aktív kiválasztása, a legjobbhoz csatlakozási kérelem, ez a hálózaton keresztül értesíti a régi AP-t

- **Energiatakarékos üzemmód:**
 - Mobilok alvó állapota, nem hallgatják a csatornát
 - Az AP nyilvántartja hogy melyik STA-k alszanak, tárolja a nekik szóló csomagokat
 - A mobilok csak a beacon kereteket figyelik (periodikusan felébredve), ebben jelzi az AP, ha van adat
 - A beaconben megadva azon alvó mobilok listája, akik számára adás van
 - A mobilnak normál üzemmódba kell lépnie és lekérdeznie az AP-től a neki szóló adatot
 - PS-Poll üzenetet küld a STA
 - Erre válaszként az AP ACK-ot, vagy magát a csomagot
 - IBSS (ad-hoc mód)
 - Itt nincs központi AP, de hasonló: ATIM (Adhoc Traffic Indication Message) jelzi, ezt olyankor küldik, amikor az alvó felébred

Keret típusok

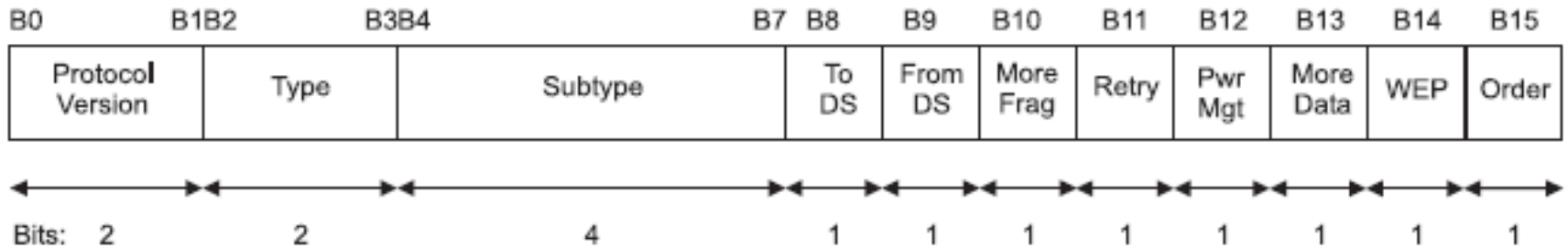
- **Data Frame-k**
 - Adatátvitel céljaira
- **Control Frame-k:**
 - A közeghozzáférés vezérlés céljaira:
 - pl. RTS, CTS, és ACK
- **Menedzsment Frame-k:**
 - Az adat keretekkel megegyező módon küldik őket a menedzsment információk cseréje végett
 - Nem továbbítják őket a felsőbb rétegekhez (pl. authentication, probe request, stb.)



- **Data Frame-k**
 - Data + [CF-ACK + [CF-Poll]]
 - Null Function
 - CF-ACK, CF-Poll (nodata)
- **Control Frame-k:**
 - RTS, CTS, ACK
 - PS-Poll, CF-End, CF-End ACK
- **Menedzsment Frame-k:**
 - Beacon, Probe Request & Response
 - Authentication, Deauthentication
 - Association Request & Response
 - Reassociation Request & Response
 - Disassociation
 - Announcement Traffic Indication Message (ATIM)

802.11 MAC keretek

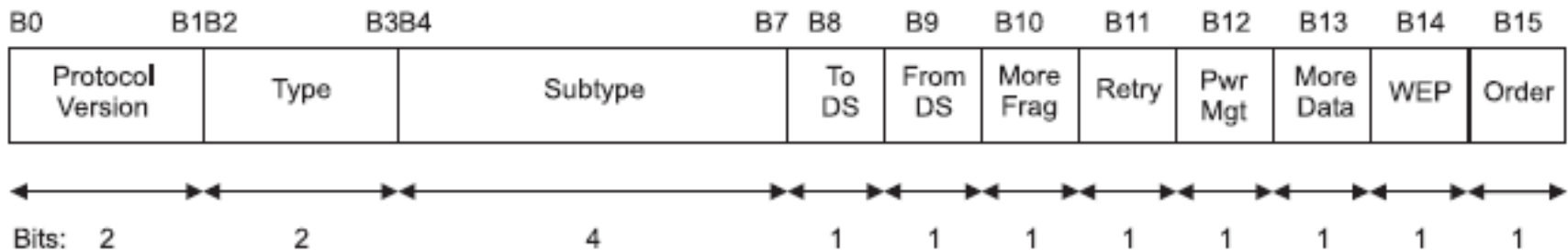
- MAC Frame Control:



- Protocol Version, Type and Subtype:
 - Pl. RTS, CTS, ACK, poll, authentication, stb.
- ToDS, FromDS
 - Hálózatba/ból a keret (tehát 0 pl. RTS, CTS),
- More Fragments
 - A MAC keret egy nagyobb felső keret-darabja
- Retry
 - Újraadott keret-darabot jelöl

802.11 MAC keretek

- MAC Frame Control:



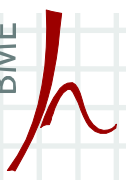
- Power Management
 - Jelzi, hogy ezen keret átvitele után az állomása Power Management üzemmódba megy át
 - Azok az állomások használják, melyek Power Save állapotból Active állapotba lépnek vagy fordítva
- More Data
 - Jelzi, a Power Management-nek az AP révén, hogy további tárolt keretek vannak az állomás részére
- WEP
 - Jelzi, hogy a keret törzsét a WEP-nek megfelelően titkosították

802.11 MAC keretek

- A MAC keret további mezői
 - Duration/ID:
 - Power-Save Poll üzenetekben a Station ID, egyébként a NAV számításhoz időtartam
 - Address Fields max. 4 címet tartalmazhat a ToDS-től és a FromDS bitektől függően:
 - Address-1: mindig a címzett
 - Address-2: mindig a küldő
 - Address-3:
 - Ad-hoc esetén: BSSID
 - To/From DS esetén: címzett/küldő (a DS ben/ből)
 - Address-4: Wireless Distribution System alkalmazásánál
 - AP <-> AP linkek a DS
 - Az éppen adás alatt levő keretet egyik AP-től a másiknak küldi
 - Ilyen esetben ToDS=1 és FromDS=1, Address-3 és Address-4 a fogadó és küldő

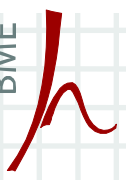
802.11 MAC keretek

- A MAC keret további mezői
 - Sequence Control
 - A Sequence Control Field mutatja az egyazon kerethez tartozó különböző fragmentek sorrendjét és segít a csomagduplikációk felismerésében
 - Két almezőt tartalmaz, Fragment Number és Sequence Number, melyek megadják a keret és a fragment sorszámát a keretben.
 - FCS (Frame Check Sum) = CRC
 - A CRC 32 bites mező 32-bites Cyclic Redundancy Check-t (CRC) tartalmaz.



802.11e-2005 – Quality of Service

- Korai verzióktól kezdve felmerült az igény a QoS támogatásra
 - Konkrétan: VoIP és videóátvitel
- Késleltetés-érzékeny applikációk számára garanciát nyújtani
- Probléma: Az elosztott közeghozzáférés nem determinisztikus
- Probléma: A központosított, polling alapú megoldás korábban említett okok miatt nem terjedt el
- Prioritást kellene biztosítani a késleltetés-érzékeny forgalmaknak
 - Ez még mindig nem feltétlenül garancia
- A 802.11e a MAC működését és funkcionalitását módosítja, az ezekhez szükséges fizikai módosításokkal
 - Bevezeti a QoS képes terminál és AP fogalmát
 - Bevezeti a QBSS-t
 - QoS keretformátum
 - Prioritás megállapítására mechanizmus
 - QoS biztosításának másik lehetősége:
 - Terhelés alatti QoS: a fizikai átviteli sebesség az igények előtt járjon
 - + protokoll időzítések kézbentartása

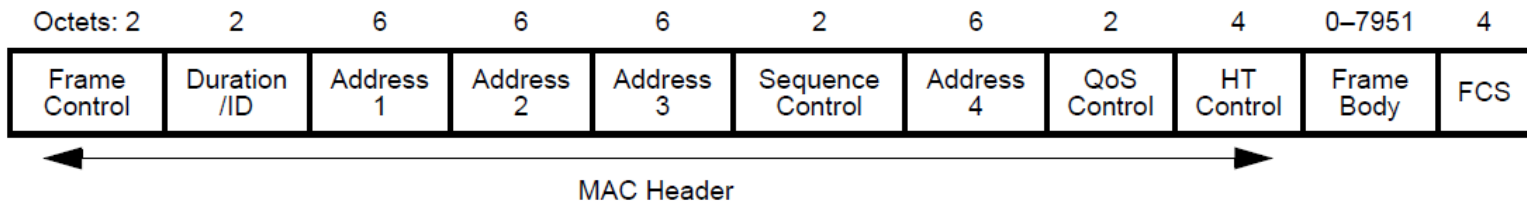
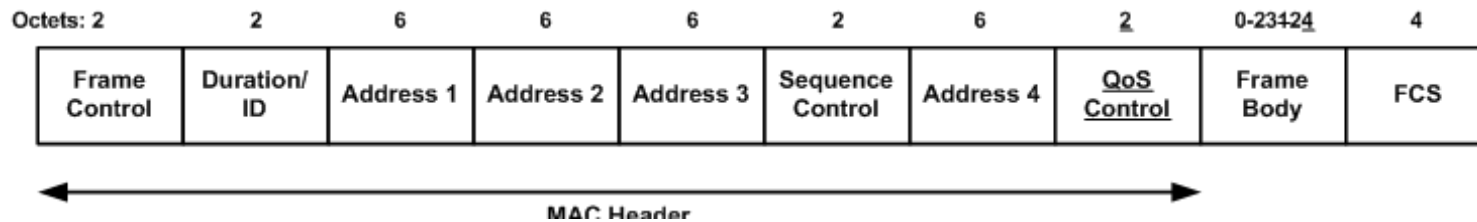


802.11e-2005 – Quality of Service

- Itt lett definiálva a tömbösített nyugtázás (block ACK), valamint az aggregált keretek előzménye, a TXOP
 - Az eszközök TXOP (adási lehetőség)-t szereznek
 - Ebben több keret is küldhető
 - Tömbösített nyugtával a TXOP egy nyugtával igazolható
 - A tömbösített nyugtázási mechanizmusnak két verziója definiálva
 - Késeltetett
 - Azonnali
- No ACK: a STA jelezheti, ha nem kér nyugtát
- Új teljesítmény-menedzsment
 - Hagyományos
 - AP beaconben jelzi, ha alvó mobil számára adat jön
 - Új: ütemezett módon
 - Elsősorban VoIP-hoz találták ki

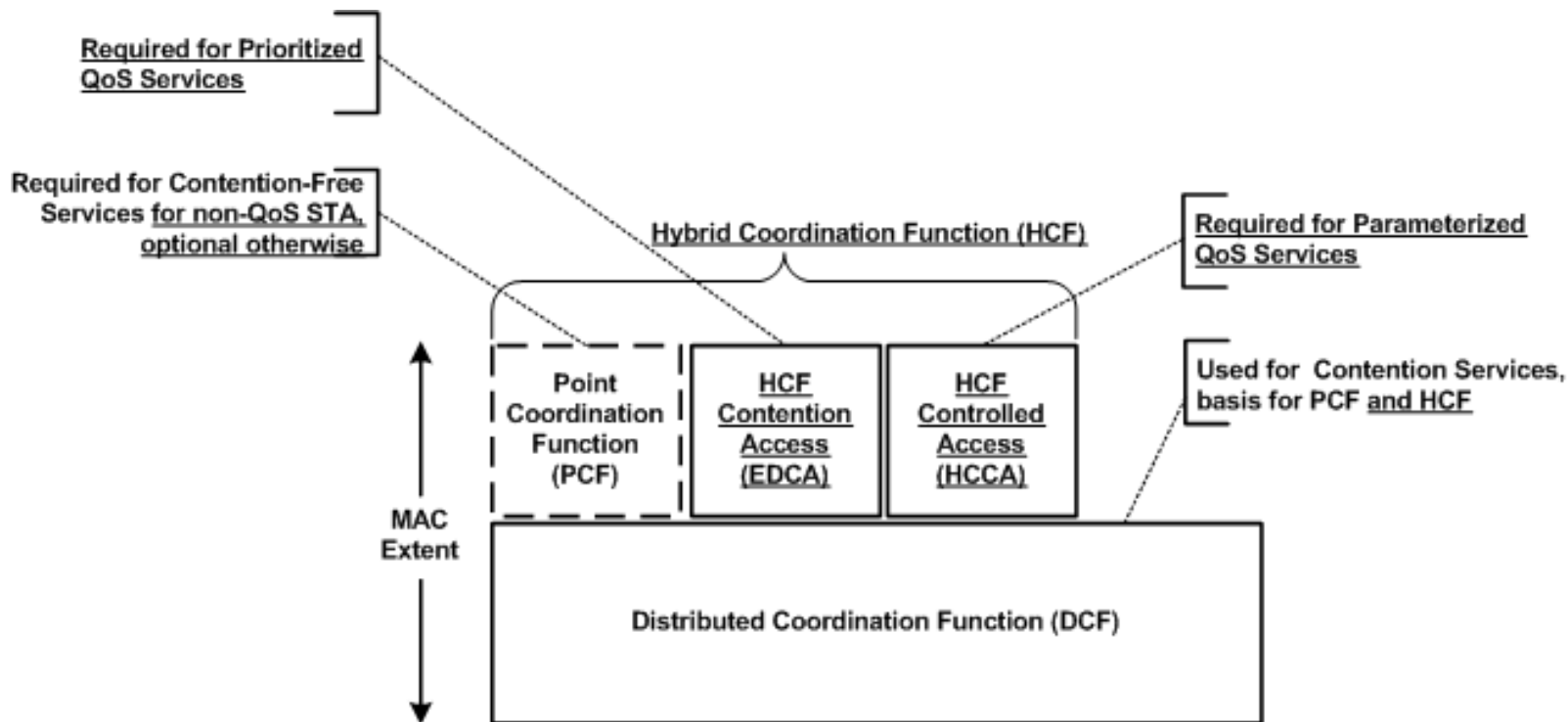
802.11e-2005 – Quality of Service

- Adatfolyam bevezetése és kezelése (traffic stream)
 - Tulajdonképpen összeköttetések felépítése, lebontása
 - Explicite, vagy időzítők alapján
- Új keretformátum a QoS ügyek vezérlése érdekében



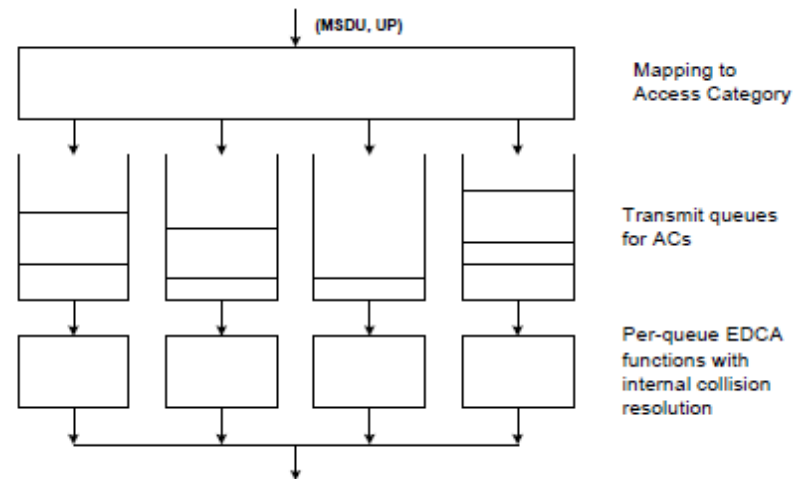
802.11e-2005 – Quality of Service

- Közeghozzáférési módszerek kiegészítése
 - Hybrid Coordination Function (HCF)

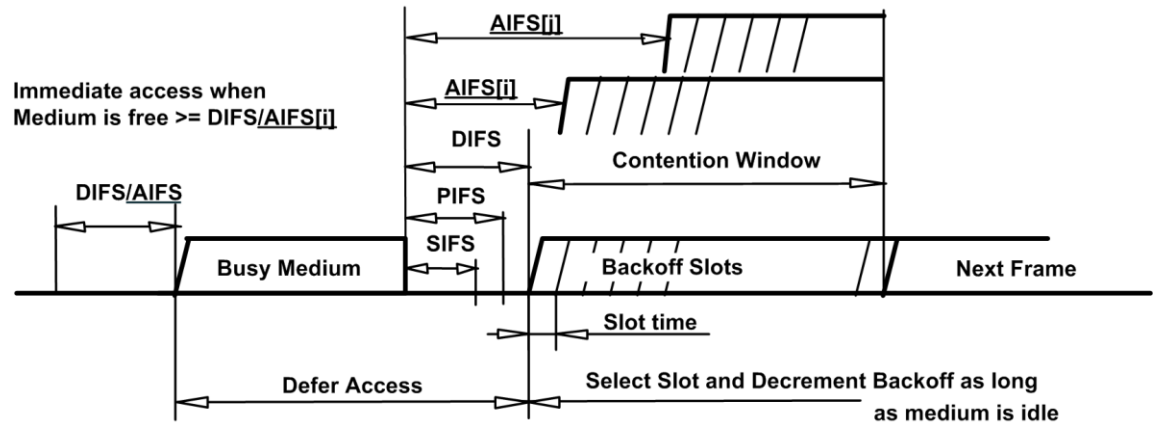


802.11e-2005 – Quality of Service

- **Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)**
 - A forgalom továbbítása prioritások figyelembevételével
 - A prioritások alapján a forgalmak megkülönböztetése
- **A prioritások biztosításának módja**
 - A csatornafigyelési idő és az adás, vagy backoff mechanizmus előtt megkövetelt üres idők különböznek (xIFS)
 - A backoff időtartam (CW) hosszak különböznek
 - Amennyi ideig az adás engedélyezett, ha a STA megszerezte a csatornát
- **Négyféle prioritás (Access Category):**
 - Voice (legmagasabb)
 - Video
 - Best-Effort
 - Background (legalacsonyabb)
- **Forgalmi kategóriánként adási sorok**
- **A STA maga oldja meg a belső ütközést**
 - Azaz, hogy melyik sorból akar adni



802.11e-2005 – Quality of Service

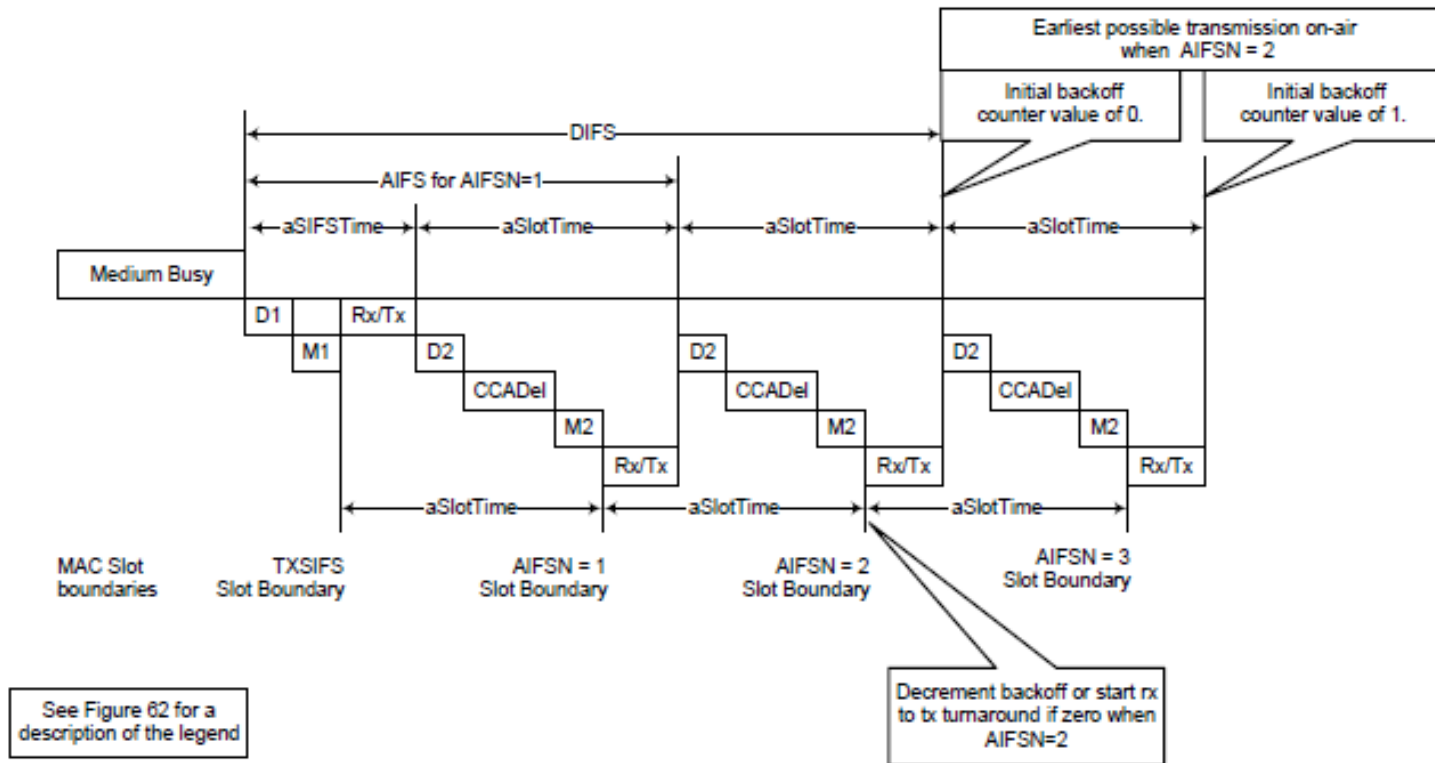


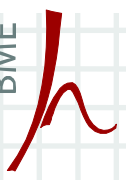
- **EDCA működéssel:**
 - Nagyobb prioritású kevesebbet vár
 - Rövidebb backoff ablakból sorsol magának várakozási időt
- **AP használhat AIFSN=1-et, a többi csak nagyobb AIFS-t**
 - Eddig az AP-nek nem volt prioritása

AC	CW _{min}	CW _{max}	AIFSN	TXOP limit		
				For PHYs defined in Clause 15 and Clause 18	For PHYs defined in Clause 17 and Clause 19	Other PHYs
AC_BK	aCW _{min}	aCW _{max}	7	0	0	0
AC_BE	aCW _{min}	aCW _{max}	3	0	0	0
AC_VI	$(aCW_{min}+1)/2 - 1$	aCW _{min}	2	6.016 ms	3.008 ms	0
AC_VO	$(aCW_{min}+1)/4 - 1$	$(aCW_{min}+1)/2 - 1$	2	3.264 ms	1.504 ms	0

802.11e-2005 – Quality of Service

- $DIFS = aSIFSTime + 2 * aSlotTime$
- $AIFS[AC] = AIFSN[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime$.
- Video, voice esetén tehát $DIFS = AIFS$
 - Ilyen értelemben a hagyományos forgalom azonos/magas prioritású
 - De a várakozási ablak nagyobb





802.11e-2005 – Quality of Service

- A koordinált hozzáférés is definiált: HCCA
- TXOP-okat lehet foglalni
- A terminál TXOP-okat kér az AP-től, a saját adása és/vagy az AP->terminál adás számára
- Az AP-ben hozzáférés-vezérlés (admission control mechanizmus) alapján eldől, hogy teljesíthető-e
- Az AP rövid, csak az állomásnak szóló pollokkal küldhet/fogadhat TXOP-t

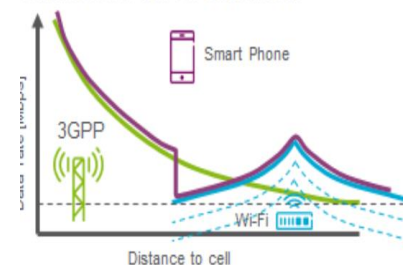
LTE-WiFi együttműködés

- Forró téma: WiFi offload
- A rádiós hálózat tehermentesítése, az ISM sáv kihasználása
- De mobilhálózati előnyök a felhasználó/szolgáltató számára
 - SIM alapú hitelesítés
 - Számlázás
 - Maghálózathoz csatlakozó WiFi hozzáférési hálózat
 - Elvárható minőség az előfizető részéről
- **Nehéz:**
 - Handover
- **Tapasztalat:**
 - WiFi offload nem (nagyon) történik meg, új forgalmat szed fel

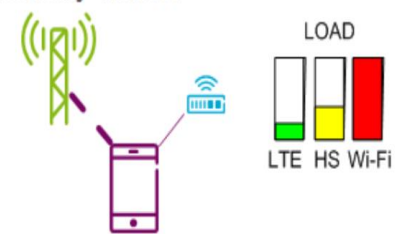
LTE-WiFi együttműködés

- Együttműködés a maghálózatban: nincs rádióhálózati kontroll
 - Szabványos interfészek és mechanizmusok kidolgozva a megbízható (~operátor által üzemeltetett) és nem megbízható WiFi AP-k bekötésére
- A terminál kiválasztja, hogy melyik hálózathoz csatlakozik
 - Ez nem túl optimális
 - Mindig a WiFi-t választja
- Ezért: rádiós hálózatbeli megoldásokon dolgoznak
 - Hálózat segíti a választást
 - Hálózat vezérli, terhelés-elosztás

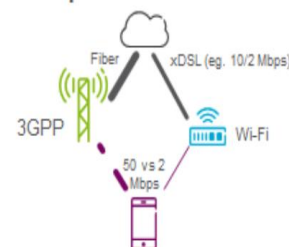
Premature Wi-Fi Selection



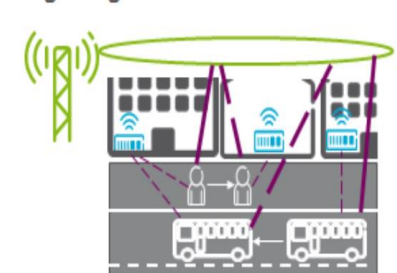
Unhealthy Choices



Lower capabilities



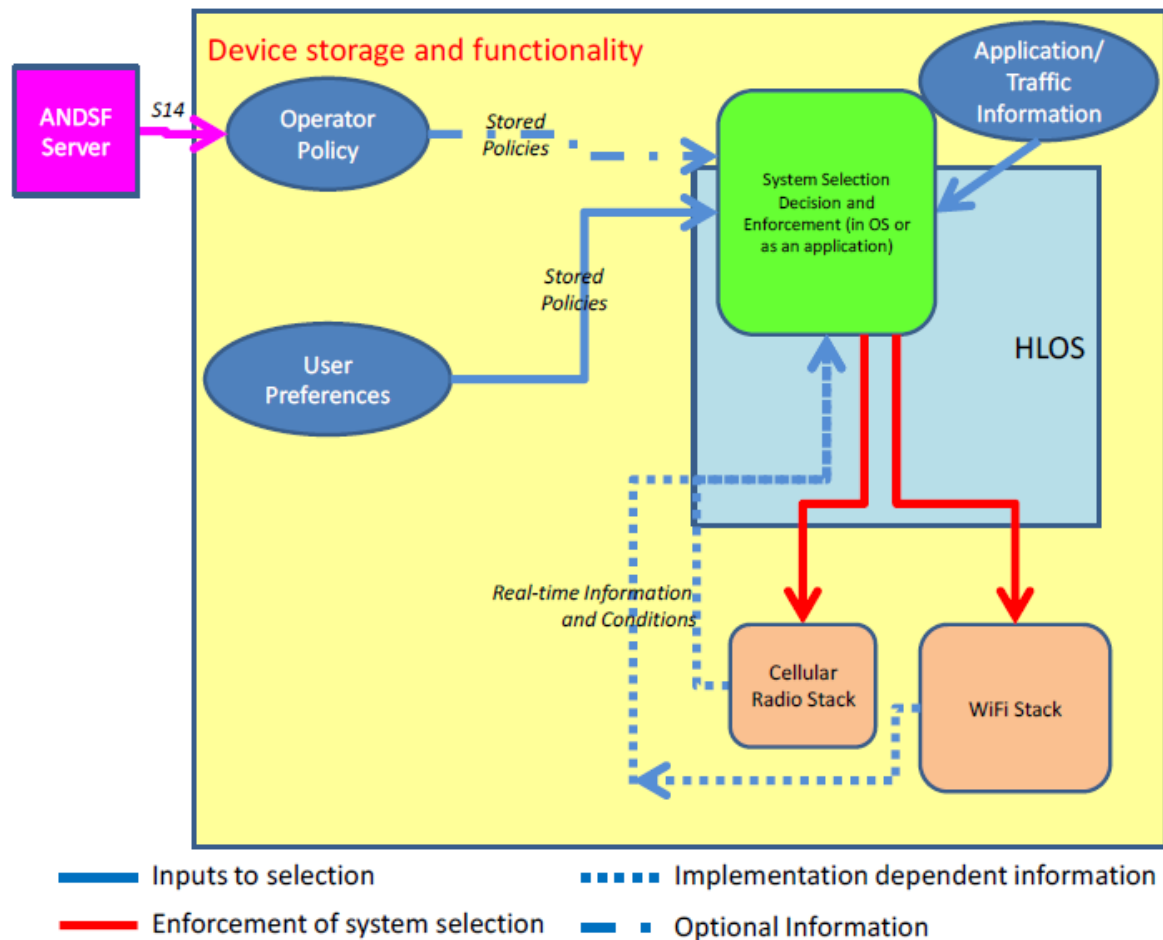
Ping-Pong



A kép forrása: 4G Americas whitepaper, Integration of Cellular and WiFi networks

LTE-WiFi együttműködés

- ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function)
 - Nem csak LTE-WiFi kontextusban



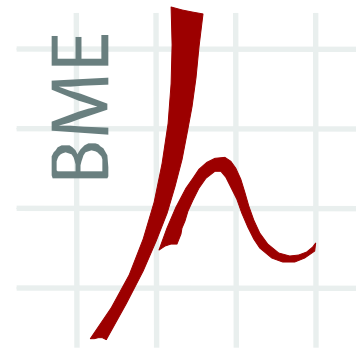


LTE-WiFi együttműködés

- **LTE-WiFi vivőegyesítés (carrier aggregation)**
 - Elsődleges LTE, másodlagos WiFi vivő
 - Kihasználni az ISM sávot, nyilván
 - Meglévő hardverek terminál/állomás oldalon egyaránt
 - 2015-ben voltak bemutatók
 - UE egyidejűleg mindkét interfészt használja
 - Már vannak olyanok, amelyek képesek erre
 - Szabványosítás: PDCP rétegben (LTE rádiós stack teteje) egyesíteni
 - innen „felfelé” nincs különbség
- **A WiFi a szolgáltatói hálózat része így**
- **Mobilitás támogatva**
- **Hálózat kontrollálja a forgalmat**
- **Site szinten ugyanott lehet a WiFi és az LTE**

LTE-WiFi együttműködés

- LTE-WiFi aggregáció történik 4G –ben
 - 5G hatás
 - 60 GHz 802.11ad aggregációja
 - 5 GHz 802.11 ac aggregációja
 - Lesz Gbps kiscellás/beltéri rádió, ráadásul ingyenes sávban
 - Nem feltétlenül kell saját mm sáv, illetve új 5G rádiós hullámforma
 - Nagyfokú szeparáció miatt nem olyan nagy baj
 - Kivéve, ha minden szolgáltató + userek telepítenek ugyanott ...
- LTE az 5GHz –es sávban: LAA Licenced Assisted Access
- Érdekes: egy kizárólagos, kontrollált sávhasználatot feltételező szabvány átalakítása egy nem engedélyköteles tartományra
 - Tetszőlegesen ki/bekapcsolt AP-k
 - Nem jósolható/kontrollálható forgalom van jelen
 - max kisugárzott teljesítményre, max. adáshosszra van korlát az EU-ban, valamint kötelező a vivőérzékeléses mechanizmus használata (LBT: listen before talk)
 - Nem zavarhatja a WiFi-t jobban, mint egy másik WiFi

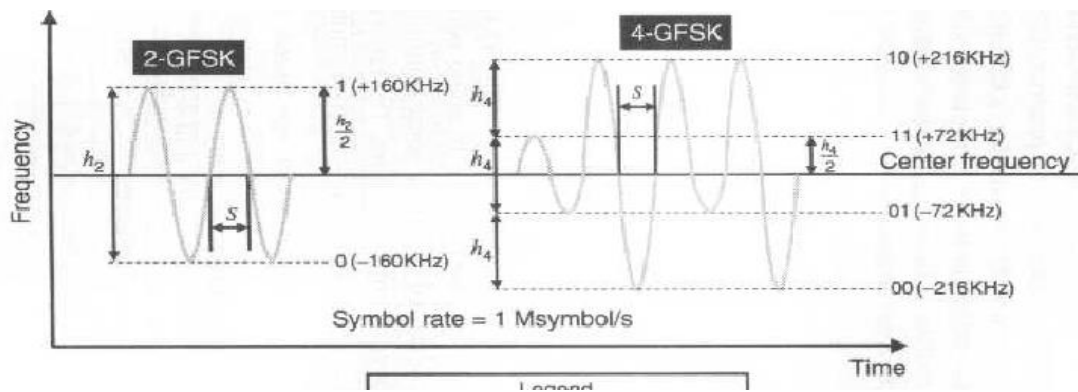
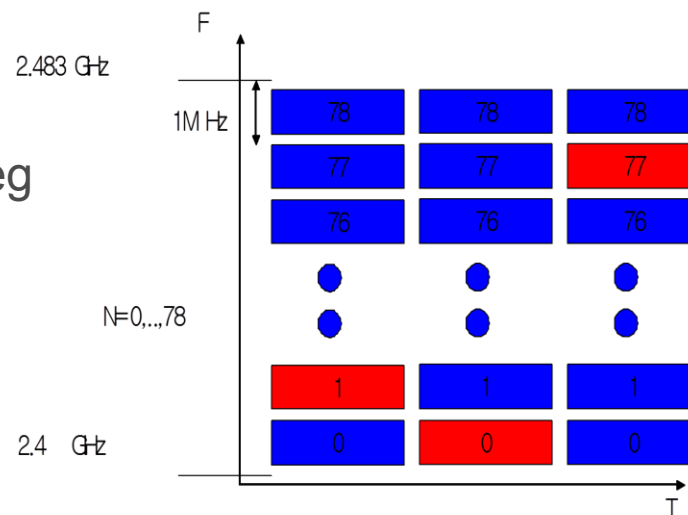


A különböző 802.11 verziók működési alapjai

802.11 Fizikai réteg

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

- 79 egymást nem átfedő csatorna
- 1MHz osztással
- 26 átfedő hálózat üzemelhető egyidejűleg
 - Függően az ugratási sorozatoktól
- 2- vagy 4GFSK (Gaussian FSK)
 - 1 Mbps (2 frekvenciaszint)
 - 2 Mbps (4 frekvenciaszint)
 - Konstans burkoló
 - Keskeny spektrum
 - Kis interferencia
- Nem terjedt el



802.11 Fizikai réteg

- **DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)**

- Preamble+Header 1 Mbps-mal
 - Adat lehet 1 vagy 2 Mbps
 - Signal: Adatsebesség
 - Service: RFU
- DBPSK (1 Mbps)
 - Differenciális BPSK
- DQPSK (2 Mbps)
- 1 us szimbólumidő
- 20 us időrés

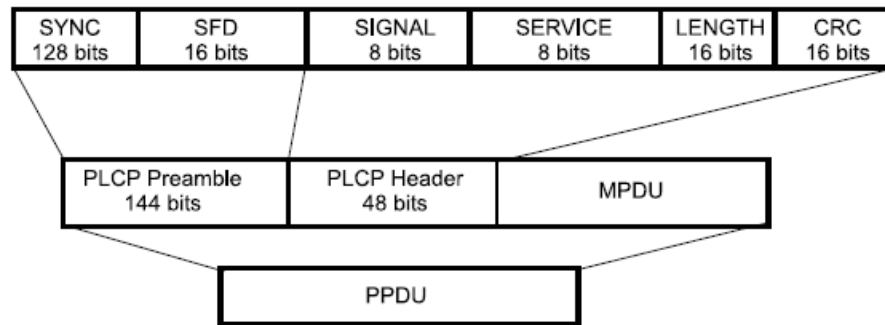


Table 65—1 Mbit/s DBPSK encoding table

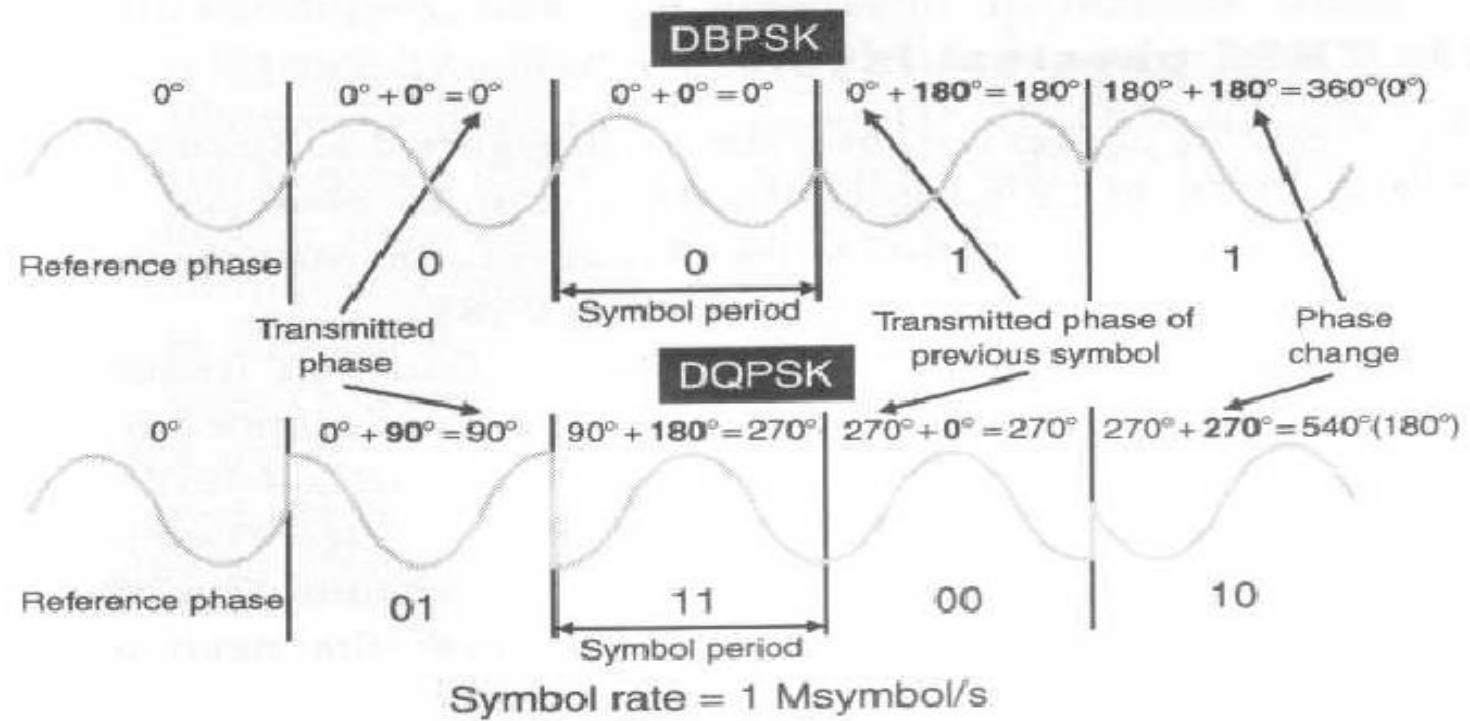
Bit input	Phase change (+j ω)
0	0
1	π

Table 66—2 Mbit/s DQPSK encoding table

Dibit pattern (d0,d1) d0 is first in time	Phase change (+j ω)
00	0
01	$\pi/2$
11	π
10	$3\pi/2$ ($-\pi/2$)

802.11 Fizikai réteg

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)



802.11 Fizikai réteg

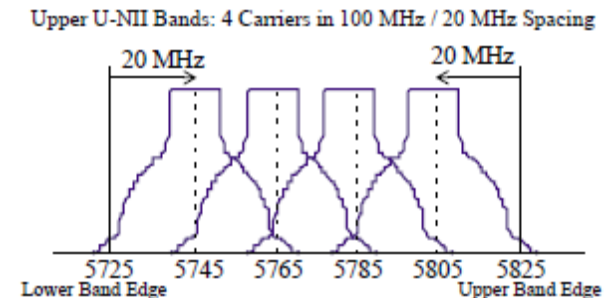
- **DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)**
 - 22 MHz széles sáv
 - 14 csatorna
 - Fizikai jelzési sebesség: 11 Mcps
 - 11 chip hosszú Barker kód szórja a spektrumot
 - +1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1
 - Adó: a Barker + vagy - előjellel viszi át (1 v 0 bit esetén)
 - Vevő: szorozza a Barkerrel -> +1+1+1+1 ... Vagy -1-1-1-1... Jön ki
 - Ha szinkronban van!
 - Szomszédos, zavaró cella, egyéb jel: nincs szinkronban
 - Álvéletlen +-1 sorozat jön ki, könnyen kiszűrhető
 - Tehát zavarvédelmet jelent úgy is, hogy a spektrumban zavarás van
 - Intuitív magyarázat: 11-szeres jelenergia van a hasznos jel számára

802.11b Fizikai réteg

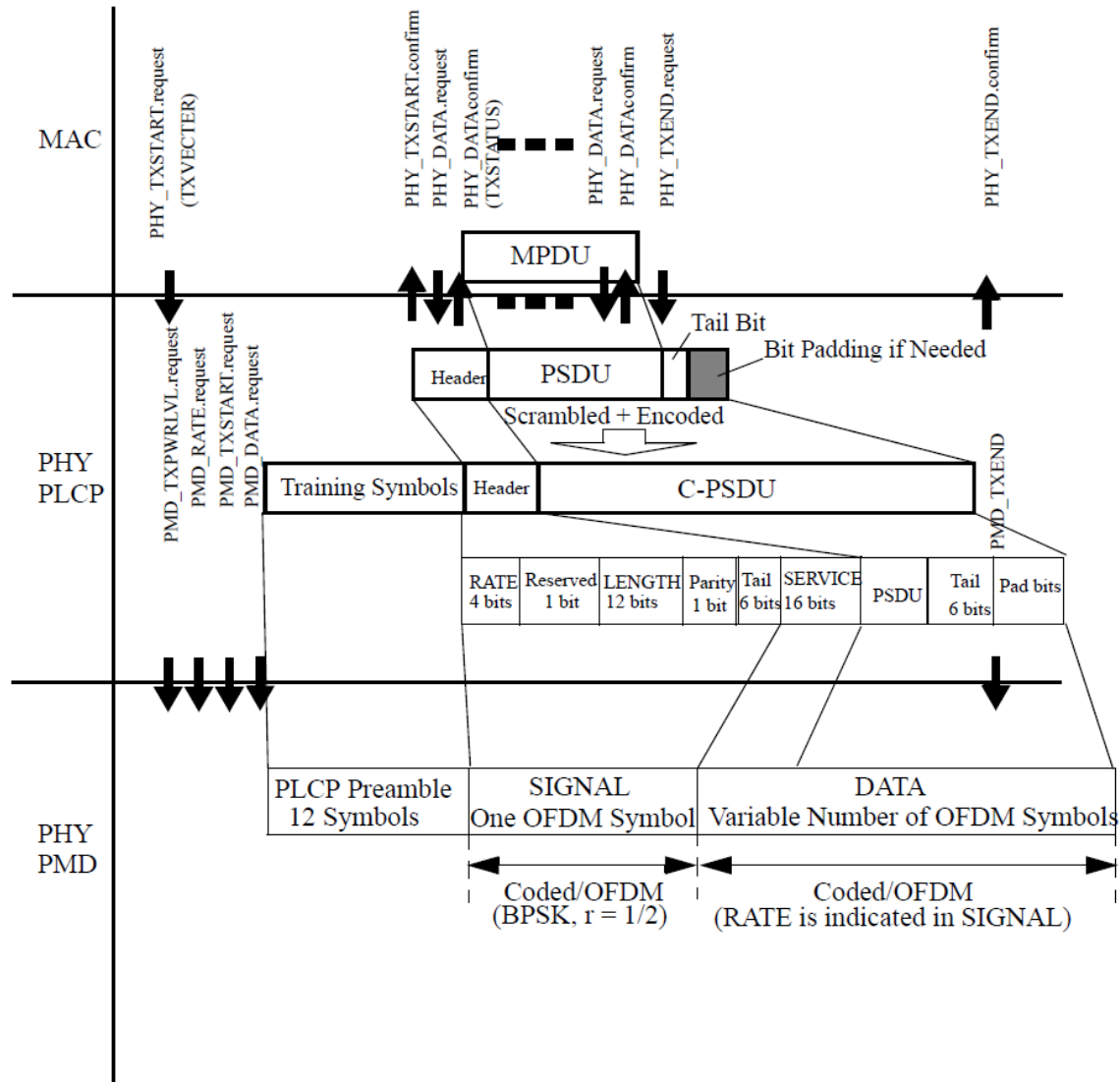
- High Rate DSSS
 - 11 Mcps áll rendelkezésre
 - Tetszőleges ± 1 sorozat 11 M szimbólum/s-mal (DBPSK)
 - DQPSK esetén 2 párhuzamos ± 1 sorozat
 - CCK (Complementary Code Keying)
 - 8 hosszú komplex kódok: $11/8x$ sebességnövekedés
 - 5.5 Mbps: 8 hosszú kód 4 bitet kódol ($11/8 \cdot 4$)
 - 2 bit: Melyik kód a lehetséges 4 közül
 - 2 bit: DQPSK-ban mennyi fázisfordítás a chipeken
 - 11 Mbps: 8 hosszú kód 4 bitet kódol ($11/8 \cdot 8$)
 - 6 bit: Melyik kód a lehetséges 64 közül
 - 2 bit: DQPSK szerinti fázisváltozás
 - Ez már sokkal kevésbé zavarvédett
 - 3 darab nem átlapoló sáv lehet a 2.4 GHz-es tartományban
 - Átlapolódás esetén romlik a jelminőség
 - Innen jött az igény a dinamikus frekvenciaválasztásra

802.11a Fizikai réteg

- OFDM alapú specifikáció, 1999-ben
- Definiálja az 5GHz ISM sávok használatát
- Bevezeti az adaptív csatornakódolást és modulációt
- A nagyobb funkcionalitás miatt bonyolultabbá válik
- A jó vételhez jól kell ismerni a csatorna állapotát és fejlett fizikai eljárásokat kell futtatni
 - Emiatt kellene a beállítósorozatok (training symbols)
 - Adaptív erősítés (AGC)
 - Pontos szimbólum-időzítés
 - Diverzitás-kiválasztás
 - Frekvencia-elcsúszás becslése és korrekciója
 - Linearizáció, csúcstényező csökkentése, stb.
- Teljesen új rádiós interfész
- Nem kellett igazodni a 802.11b-hez, teljesen új
 - Meglévő eszközök nem tudtak benne működni
 - Nehézkesebben terjedt el
 - AP-k akkoriban: a, b, g



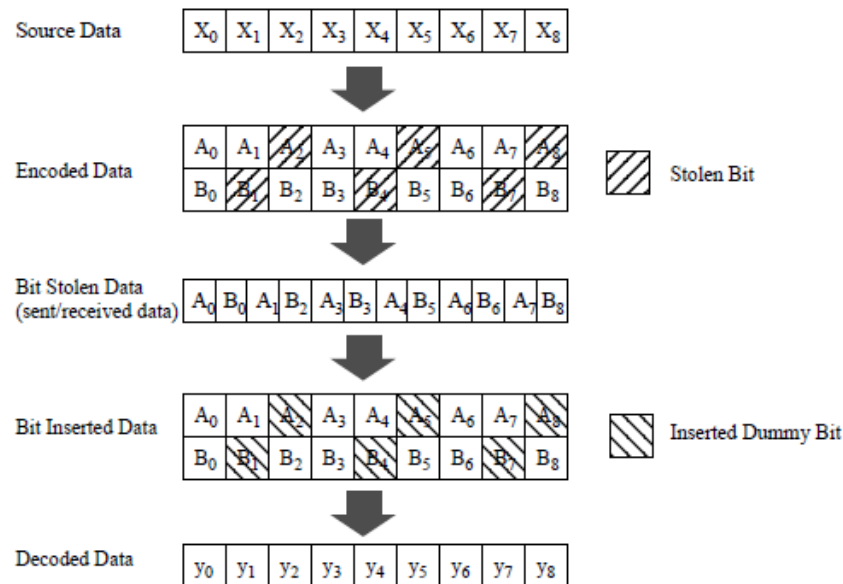
802.11a Fizikai réteg



802.11a Fizikai réteg

- 20 MHz-es sávok az 5GHz-es tartományban
- 64 pontos FFT:
 - $20/64=0.3125$ MHz segédvívök közti távolság (vs LTE: 15 kHz)
 - 3.2 us szimbólumidő (LTE 66.67 us)
 - 0.8 us guard interval (LTE-ben: ciklikus prefix)
 - 48 segédvívő + 4 pilot segédvívő
 - Többféle moduláció minden segédvívőn
 - BPSK, 4-, 16-, 64-QAM
 - $\frac{1}{2}$ konvolúciós kódolás
 - Lyukasztással
- Átfűzés (Interleaving)
- Bitkeverés (Scrambling, Whitening)

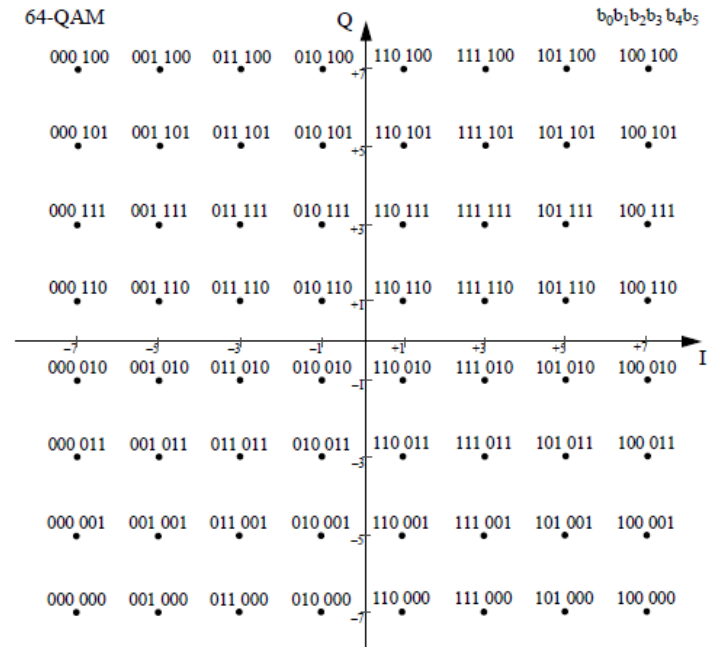
Punctured Coding ($r = 3/4$)



802.11a Fizikai réteg

- 64 QAM zavarmentes esetben 6 bit / segédvívő
- 216 bit/4 us = 54 Mbps (Coding Rate = 3/4)
- Azokban a pillanatokban, amikor adat megy

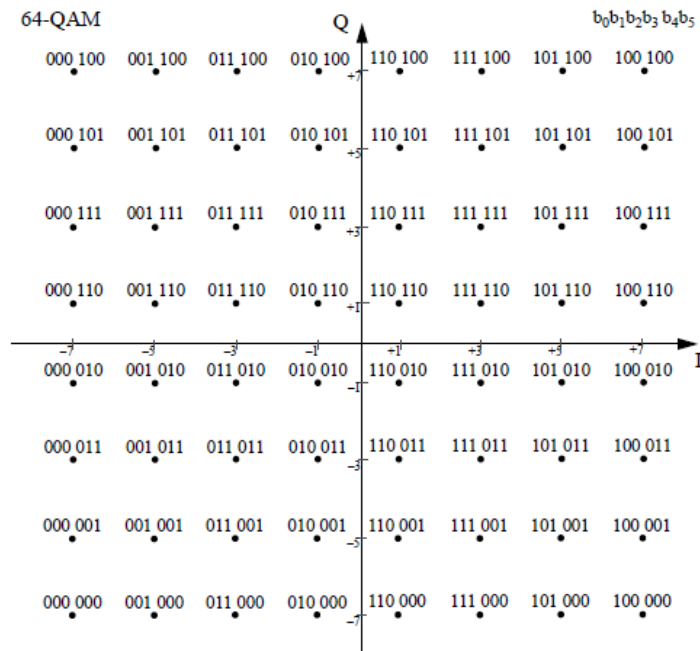
Data rate (Mbits/s)	Modulation	Coding rate (R)	Coded bits per subcarrier (N_{BPSC})	Coded bits per OFDM symbol (N_{CBPS})	Data bits per OFDM symbol (N_{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216



802.11a Fizikai réteg

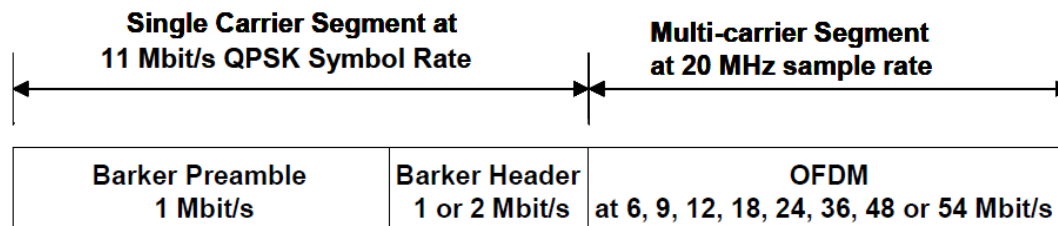
- 64 QAM zavarmentes esetben 6 bit / segédvivő
- 216 bit/4 us = 54 Mbps (Coding Rate = 3/4)
 - Azokban a pillanatokban, amikor adat megy (!)
 - Legkevésbé hibátűrő
 - Mac+PLCP fejlécek + backoff intervallumok miatt kb. 35 Mbps

Data rate (Mbits/s)	Modulation	Coding rate (R)	Coded bits per subcarrier (N_{BPSK})	Coded bits per OFDM symbol (N_{CBPS})	Data bits per OFDM symbol (N_{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216



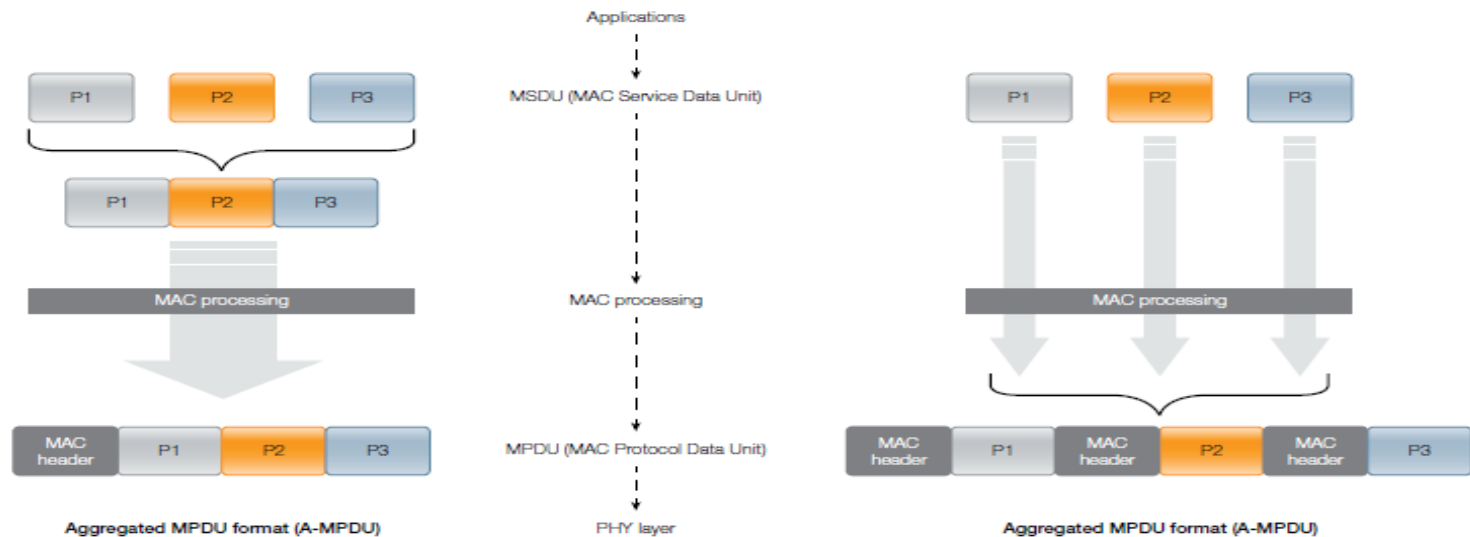
802.11g Fizikai réteg

- Felmerült az igény a 2.4 GHz sávban való OFDM működésre
 - Lassan terjedtek a korábbi verziók
- További igény: visszafelé kompatibilis legyen
 - Azaz „Extended Rate” működés
 - Fizikai fejlécek megegyezzenek a 802.11b –val
 - Utána az adat rész lehessen 802.11a, vagy b kompatibilis
- Ezeket valósítja meg a 802.11g szabvány
 - DSSS-OFDM fizikai réteg
- Ennek ára a nagyobb fizikai réteg overhead
 - Viszont legacy 802.11 és 802.11b tud együttműködni
- Többféle verzió együttélése esetén:
 - A rendszer össz átvitelét rontják a korábbi verzióval működő eszközök
 - Hiszen időt foglalnak, de kevés adatot visznek át



802.11n rendszerek

- **Cél: Nagyobb átviteli sebesség**
 - Keret aggregáció: több MAC keret összevonása és együttes elküldése
 - RIFS : csökkentett keretek-közti időtartam
 - Szélesebb csatorna: 40 MHz
 - MIMO: többantennás technikák alkalmazása
 - Korábbi eszközökön is volt több antenna, de általában csak antenna diverzitás megvalósítására



Forrás: Designed for Speed: Network Infrastructure in an 802.11n World, white paper, ARUBA

802.11n rendszerek

- **A keret aggregáció két módja**
 - Több MAC keret egy „szuper” keretben: A-MPDU
 - Több LLC keret összemultiplexelve egy MAC keretté: A-MSDU
- **A maximális kerethossz megnövelve 65535 byte-ra (korábban 4095)**
- **Csoportos nyugtázás**
 - Az adó kérhet csoportos nyugtát, azaz több kerethez egy nyugtát
 - Ilyenkor egy nyugta több keretet, egy keret-sorozaton belül mindegyiket nyugtázza
 - Amelyiket nem, azt kell újraküldeni
 - Bizonyos alkalmazásoknál nem jó, mert extra késleltetést jelenthet a szelektív újraadás
- **2 us redukált keretközi idő RIFS**
 - A normál SIFS 16 us hosszú ebben az esetben
 - Csak akkor alkalmazható, ha az ún. zöldmezős módban megy a hálózat
 - Azaz csak 802.11n képes készülékek, és mind tudja a RIFS-et
 - Ez korlátozza az elterjedést, bár megvalósítani egyszerű

802.11n rendszerek

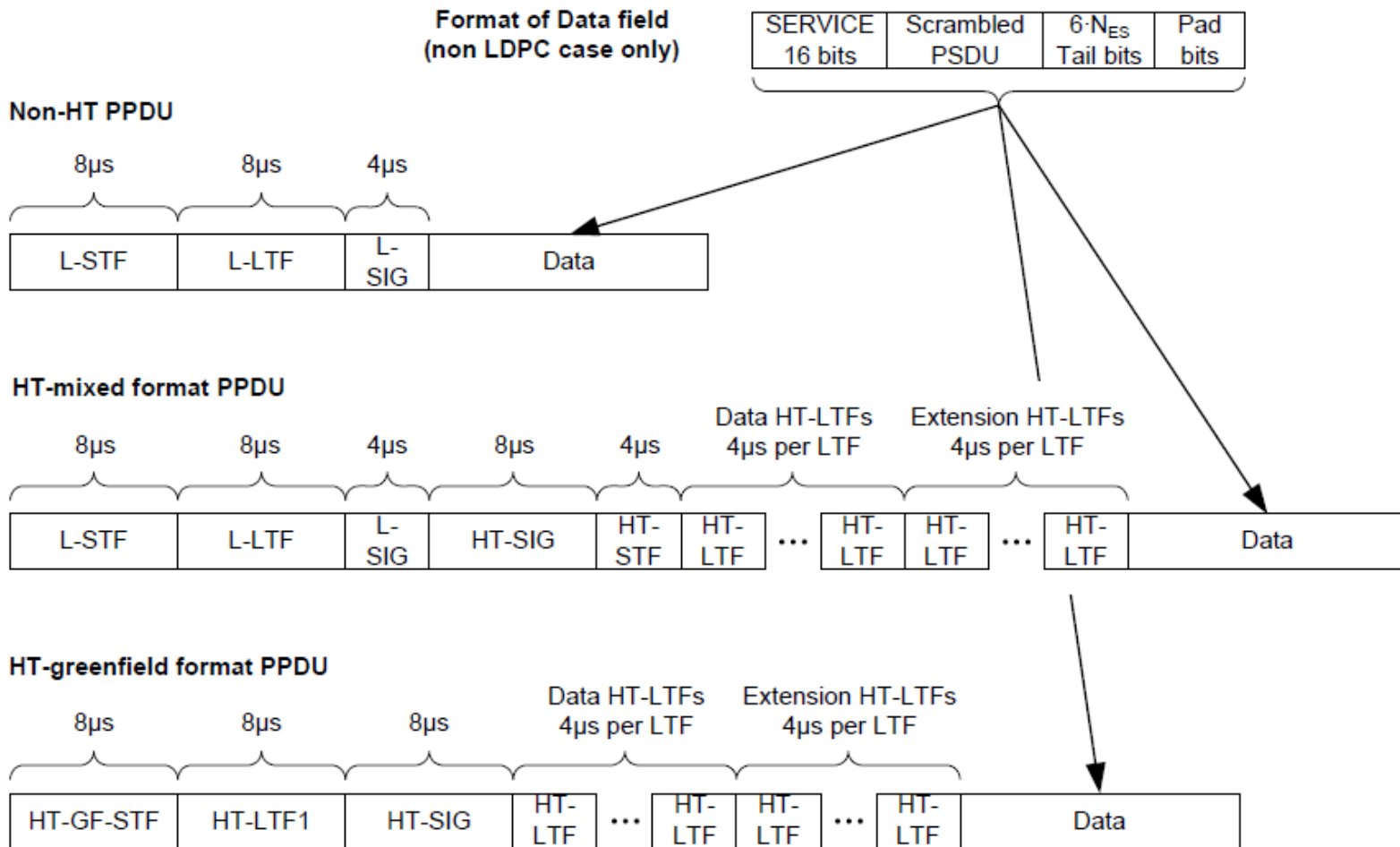
- **40 MHz-es sávok használata**
 - Korábban: gyártói megoldásként már alkalmazták a 2*20 Mhz együttes használatát, tulajdonképpen 2 db 802.11a/g átvitelt párhuzamosan
 - Itt: egyben kezelt 40 MHz csatorna
 - Szintén csak zöldmezős módon lehet alkalmazni
 - Ez nem mindig lehetséges, illik támogatni az (a,b,g) klienseket
 - Ezek is csatlakozni tudjanak az n-es AP-hoz
 - Figyelni kell a környező a,b,g rendszerekre, mert a 40 MHz allokáció ezeket zavarhatja, illetve ezek zavarják
 - Problémák: RTS/CTS, csatornaérzékelés, adás csak 20 MHz-en a régebbi termináloknál

802.11n rendszerek

- **802.11n AP üzemmódok**
 - HT (High Throughput) formátum: zöldmezős mód
 - A beacon és kontroll keretek mennek 20 MHz-en
 - Az átvitel további formátuma 20/40 MHz
 - Legacy eszközök nem tudják használni
 - Nem-HT formátum: visszafelé kompatibilis működés
 - Tulajdonképpen 802.11 a/g
 - Nincs 40 MHz csatornahasználat, még akkor sem, ha lenne ilyen képességű terminál
 - Kevert HT formátum: 802.11n klienseknek HT, többieknek nem-HT
 - Hasonlóan a 802.11g-nél
 - A fizikai előtag 802.11a/g-nek megfelelő
 - Kell egy elsődleges 20 Mhz csatorna, ezeken történik a régebbi eszközök kiszolgálása, valamint a beacon, management és kontroll keretek küldése
 - Az n-es készülékek 40 MHz-n

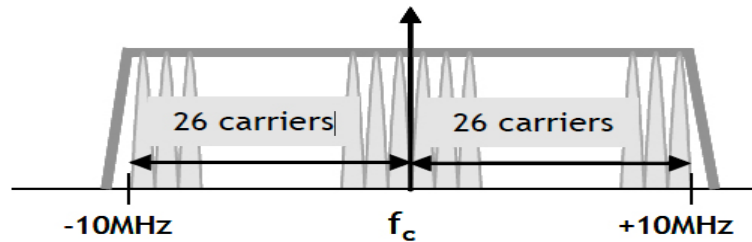
802.11n rendszerek

- 802.11n AP üzemmódok

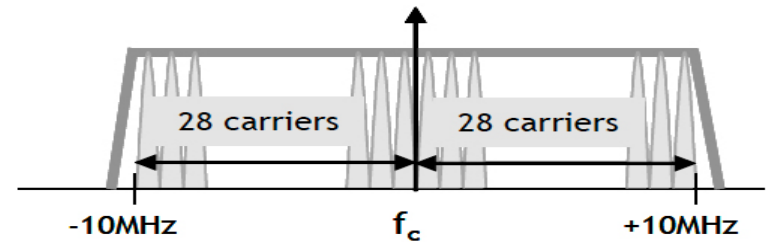


802.11n rendszerek

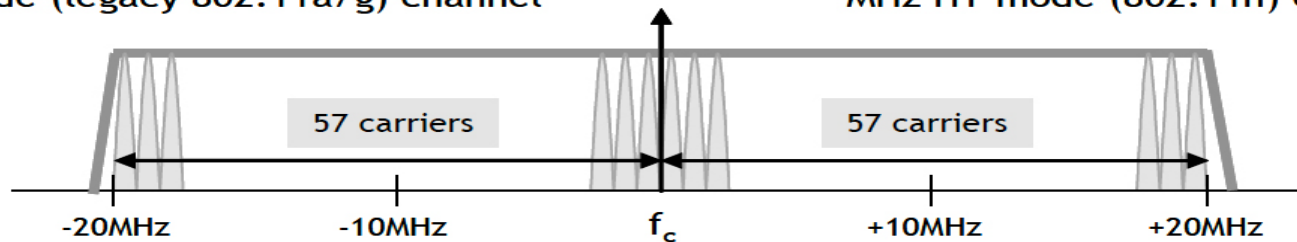
- OFDM megoldás a különböző formátumokban
 - Ezért nem kompatibilis a 20 MHz HT formátum sem
 - 4, illetve 6 pilot segédvívő



52 subcarriers (48 usable) for a 20 MHz non-HT mode (legacy 802.11a/g) channel



56 subcarriers (52 usable) for a 20 MHz HT mode (802.11n) channel



114 subcarriers (108 usable) for a 40 MHz HT mode (802.11n) channel

Forrás: Designed for Speed: Network Infrastructure in an 802.11n World, white paper, ARUBA

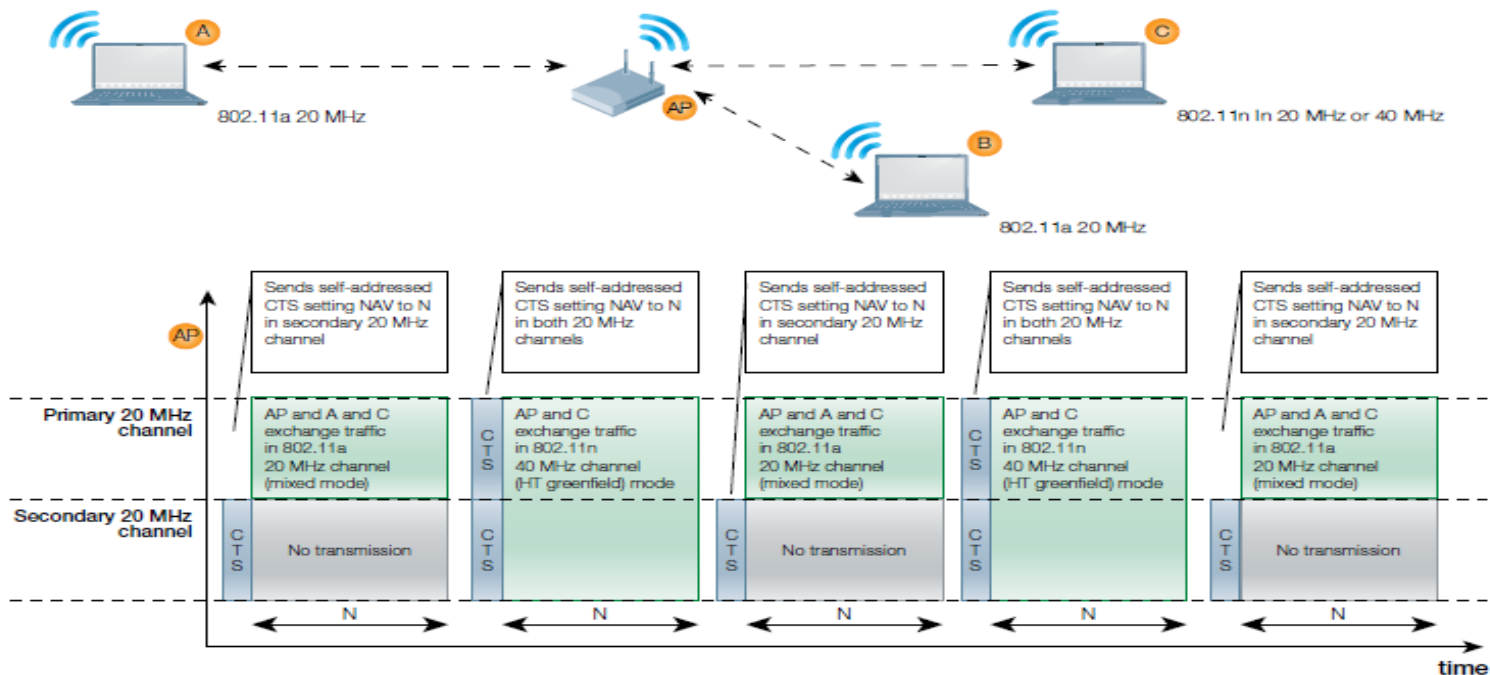
802.11n rendszerek

- Új, rövidebb ciklikus prefix bevezetése: 0.4 us
 - Tipikus a rövid hatósugarú, beltéri használat, itt nem várható ennél nagyobb terjedési úthossz-különbség (120 méter)
- Opcionálisan ún. LDPC (Low Density Parity Check) hibavédő kódolás
- Elérhető (pillanatnyi) sebességek tehát
 - 20 MHz, 52 segédvívő, 0.8 us GI, 64QAM, 5/6-os kódolás:
 - $(52 \cdot 6 \cdot 5/6) / (4 \text{ us}) = 70 \text{ Mbps}$
 - 40 MHz, rövid prefix:
 - $(108 \cdot 6 \cdot 5/6) / 3.6 \text{ us} = 150 \text{ Mbps}$
- Tipikus: b,g,n, wireless router:
 - 150 Mbps, 2.4 GHz, 40 Mhz, tudja a rövid prefixet



802.11n rendszerek

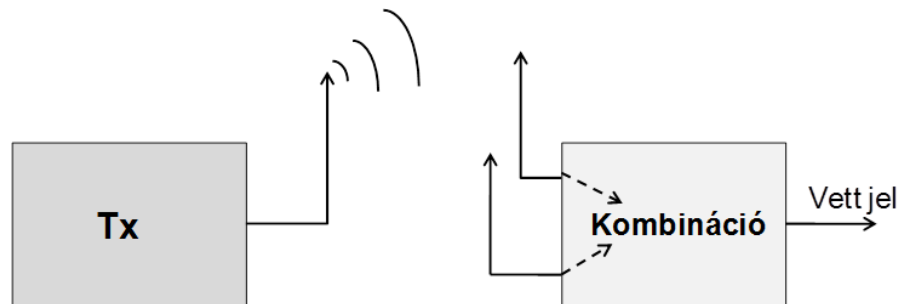
- A 40 MHz allokáció a kevésbé terhelt 5 GHz sávhoz jól illeszkedik
 - A 2.4 GHz-en csak egy foglalható le átlapolás-mentesen
 - De ha van szomszédos 20 MHz, azzal jó eséllyel átlapolódik
 - Az RTS/CTS működés ezt is igyekeznek javítani
 - Az együttélést az AP segíti
 - A másodlagos 20 MHz-en is beállítja a NAV-ot, az ott értelmezhető CTS küldésével



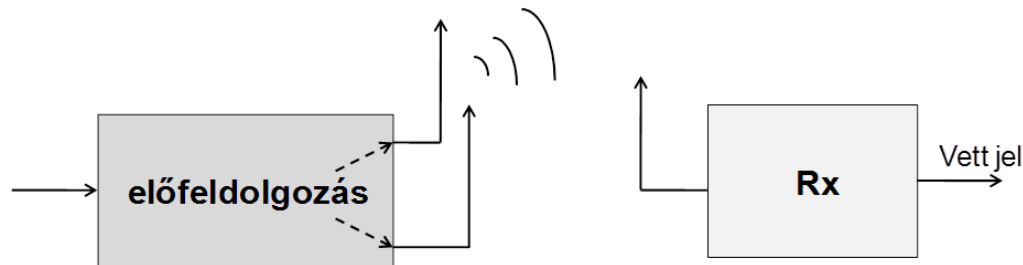
802.11n rendszerek

- Az említett sebességek nem voltak elegendők
- A nagy újítás: MIMO működési módok
 - Több adó/vevő jelfeldolgozási lánc működését igényli (nem csak több antennát)
- Fejlett antennadiverzitás:
 - Tér-idő kódolás
 - Maximális arányú kombinálás (maximum ratio combining)
- Nyalábformálás (beamforming)
- Térbeli multiplexálás

- **Maximális arányú kombinálás (MRC)**
 - Több vevőantenna esetén
 - Az antennákon vett jeleket súlyozva összegzi
 - A hatása olyan, mintha a vevőantennák számával szorzódna a jel-zaj viszony
 - Szükséges hozzá a csatornaállapot ismerete minden antennán
 - A pilot szimbólumok és a training segítségével
 - Fázistolás, pillanatnyi csillapítás, azaz egy komplex szorzó
 - A komplex szorzók konjugáltjával kell szorozni
 - Fázistolásokat el kell vevőlánconként tüntetni

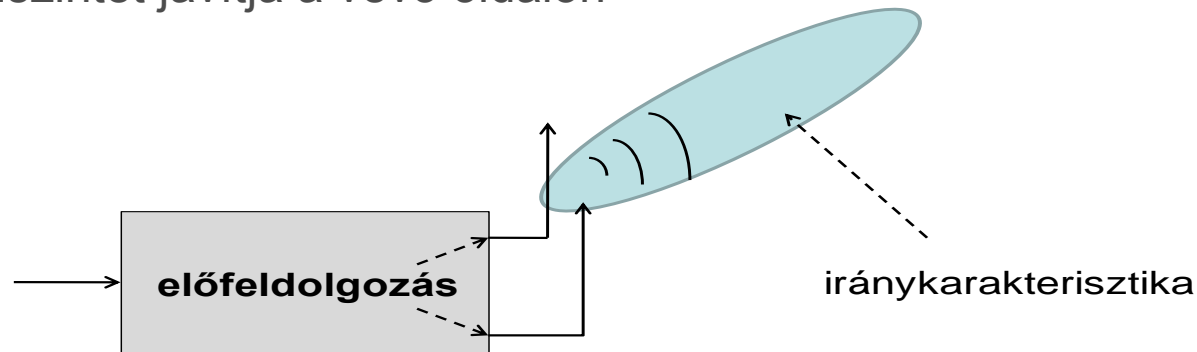


- Tér-idő kódolás (STBC)
 - Több adóantenna küld, adóoldali diverzitás
 - Több időegységben a különböző antennákon
 - Az antennák számának megfelelő különböző jelet küld
 - Az SNR javítható jelentősen
 - A vevőben kell ismerni (mérni) a csatornaállapotot, illetve a tér-idő kódot
 - Tér-idő kód: mikor-melyik antenna
 - Olyan a hatása, mint az MRC-é



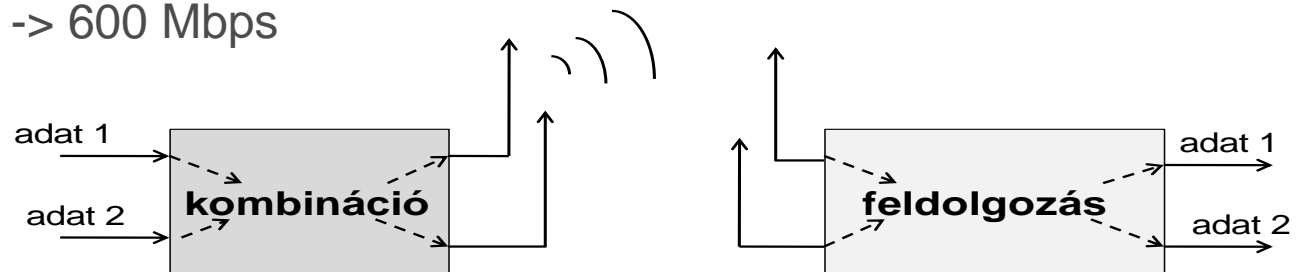
- **Nyalábformálás**

- Több adóoldali antennára megfelelően előfeldolgozott jelet küldve az antenna iránykarakterisztika javítható
 - Adott irányba (keskeny nyalábban) fókuszálja a küldött jelet (hagyományos)
 - Itt: úgy elősúlyozni, hogy a vevőnél fázisban „jól” érkezzenek a különböző antennákról jövő jelek
 - Szükséges, hogy a felek jól ismerjék a csatorna állapotát
 - Megint a csatorna konjugáltjával kell előszorozni
- Hasonló az MRC-hez, csak az adónál
- A jelszintet javítja a vevő oldalon

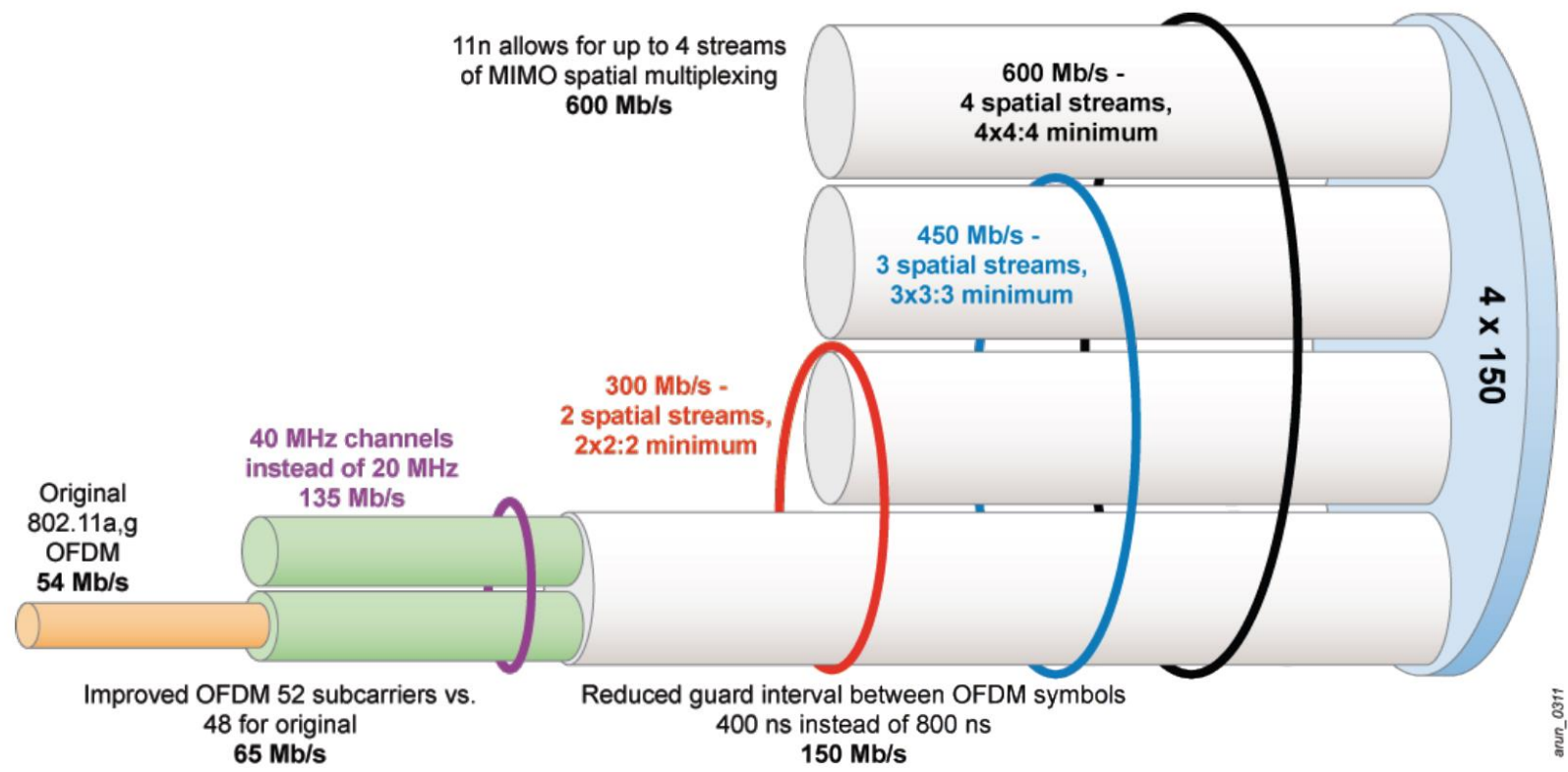


- **Térbeli multiplexálás**

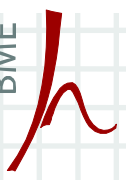
- Ez a klasszikus MIMO, itt mindkét oldalon több antenna kell
- A több adóantennát felhasználva több jel párhuzamos küldése (ugyanabban az időben, ugyanabban a frekvenciasávban)
- A különböző antennákon küldött jelek zavarják egymást
 - Ügyes jelfeldolgozással ez kiküszöbölhető
- A jelutaknak függetlennek kell lennie, hogy működjön
- Maximum négy adatfolyamot támogat a szabvány
 - Ez minimum 4x4 adó x vevő
- Definiálva még: nem azonos moduláció és kódolás streamenként
- Az elvi maximális pillanatnyi adatsebességek ebből következnek
 - 20 MHz -> 260 Mbps
 - 40 MHz -> 600 Mbps



802.11n rendszerek



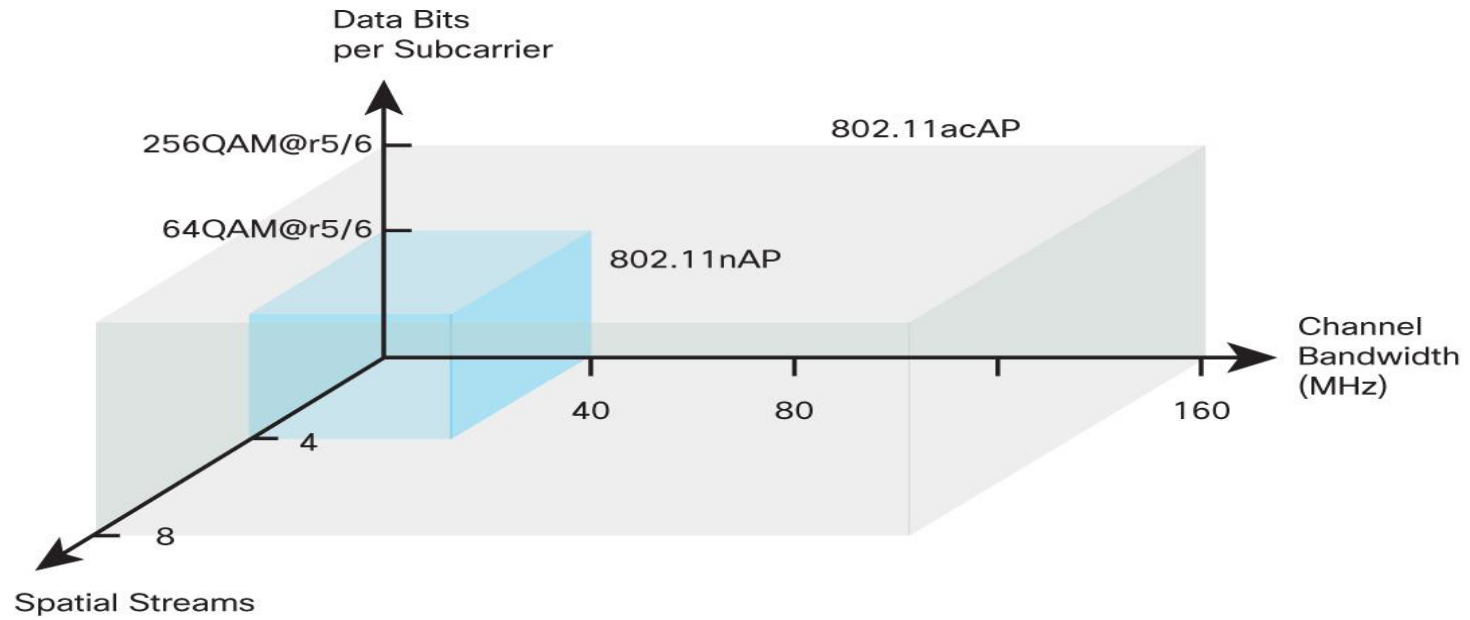
anun_0311



802.11ac – Very High Throughput

- Új szabvány, amely még nagyobb átviteli sebességet biztosít
 - Nagyfelbontású videó
 - AR alkalmazások
 - Nagyobb rendszerthroughput, azaz több felhasználó
- Adatsebesség növelésének alapelve: „brute force”
 - Szélesebb sáv
 - Nagyobb állapotszámú moduláció
 - Több térben multiplexált adatfolyam
 - 5GHz –es sáv ezért, a 2.4 GHz-en nincs elég
 - 2.4 GHz-beli működés nem is definiált az ac -ben
 - Amúgy is eléggé „zsúfolt” a 2.4 GHz
- Visszafelé kompatibilitás az 5GHz-n
 - a,n terminálok
- Továbbá kifinomultabb eljárások
- Ez az 5G WiFi

802.11ac – Very High Throughput

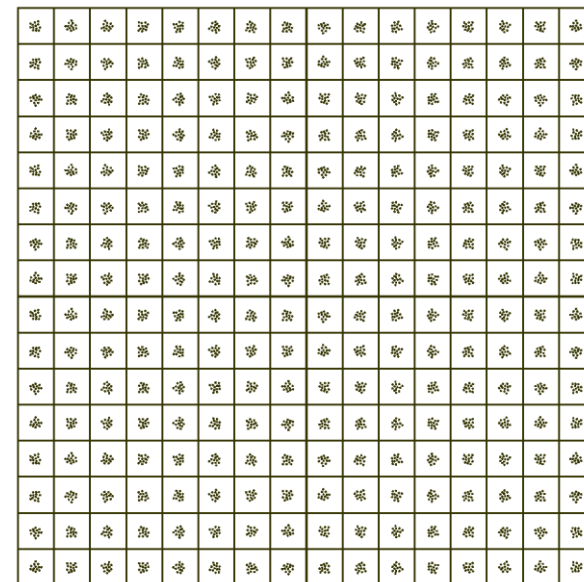


- **A definíció: VHT (Very High Throughput)**
 - Definiált sávszélesség konfigurációk: 20, 40, 80, 160 MHz (szomszédos 20 MHz-enként)
 - 80 + 80 MHz, két 80 MHz nem szomszédos sáv
 - Visszafelé kompatibilitás (sávszélesség tekintetében)
 - A fizikai keret előtagja 20 MHz 802.11a formátumban megy
- **Minden 20 MHz részcsatornában**
 - Érzékelni tudják a legacy készülékek

802.11ac – Very High Throughput

- OFDM mint eddig, itt is van rövid prefix
- Relatívén még kevesebb pilot segédvívó
 - Több, mint kétszeres növekedés a sávszélesség duplázásával
- Sebességek így (MIMO nélkül):
 - 80 MHz -> 325 Mbps (2*802.11n -> 300 Mbps lenne)
 - 160 MHz -> 650 Mbps
- Bevezetik a 256 QAM –et, max 5/6 kódolással
 - 433.3 Mbps, illetve 866.6 Mbps
 - A 256 QAM nagyon zajérzékeny
 - Kiváló RF jelfeldolgozás kell hozzá

Parameter	CBW20	CBW40	CBW80	CBW80+80	CBW160	Description
N_{SD}	52	108	234	234	468	Number of complex data numbers per frequency segment
N_{SP}	4	6	8	8	16	Number of pilot values per frequency segment
N_{ST}	56	114	242	242	484	Total number of subcarriers per subfrequency segment. See NOTE.



802.11ac – Very High Throughput

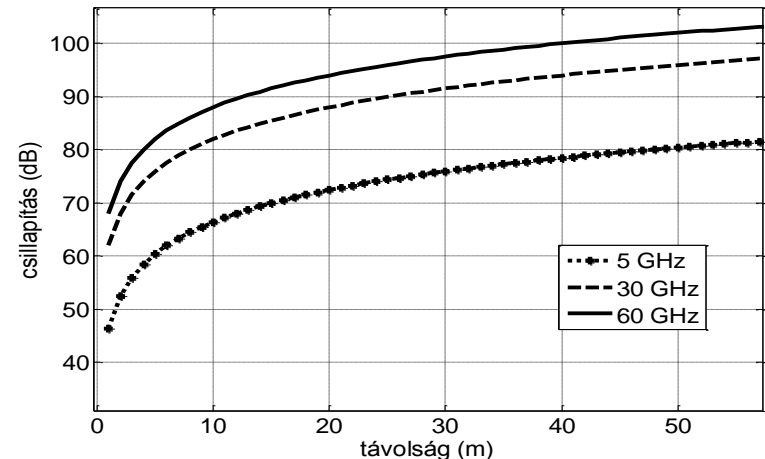
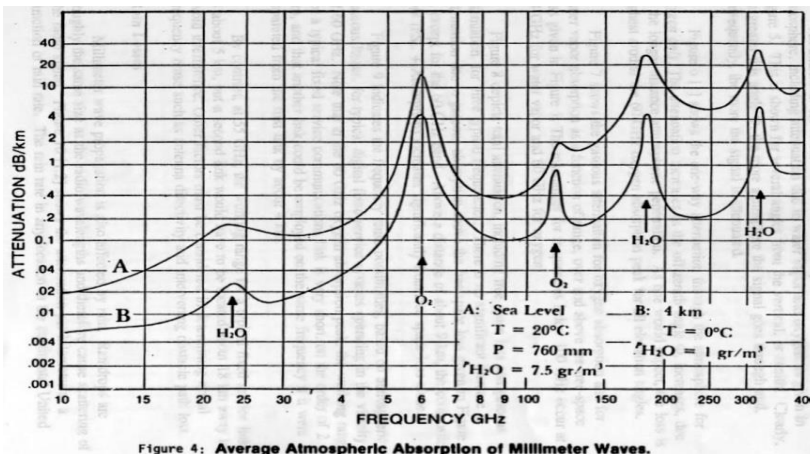
- **Térbeli multiplexálás**
 - Maximum 8 párhuzamos adatfolyam
 - Nyolcszoros adatsebesség
 - Elvi maximum a 6933.3 Mbps 160 MHz, 256 QAM
 - A vevőben (mobiltelefon, laptop, színtévé) ehhez
 - 8 antenna, legalább fél hullámhossznyira egymástól
 - De inkább egész (6 cm)
 - 8 vételi jelfeldolgozási lánc
- **Többfelhasználós (Multi User) MIMO**
 - Több adó és több vevő (MIMO) szükséges
 - A több, párhuzamosan küldött jel több kliensnek szól
- **A gyártók tipikusan beleteszik a 2.4 GHz n és 5 GHz n/ac technológiákat**
 - Szimultán működés a két sávban
 - Van aki erre mondja, hogy MU-MIMO, de nem igaz
 - Illetve összeadják az egyes sávokban elérhető elméleti maximális sebességeket
- **Háromsávú működés**
 - 2.4 GHz (ISM) és két sáv 5 GHz-en (U-NII)

802.11ad – Multi gigabit

- **Másik gigabites 802.11 szabvány**
 - Ez korábbi, mint az ac
 - Nem is direkt módon való továbbfejlesztése az előzőeknek
- **Eredet:**
 - A WiGig alliance ipari szervezet kezdte kidolgozni
 - Elsődleges cél
 - Képernyőkre streamelni nagy felbontású videót volt az
 - Nagyon széles sáv kell, de lehet kicsi hatósugár
- **Lehet nyerni spektrális hatékonysággal, többantennás technikákkal,**
 - De a fizikai sáv szélesség növelése az igazi
- **IEEE szabványként megjelent**

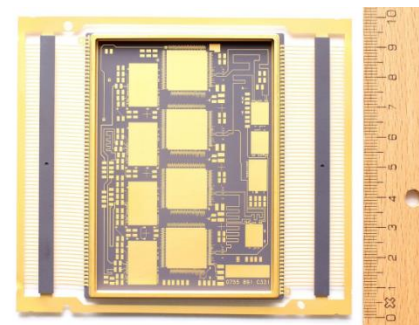
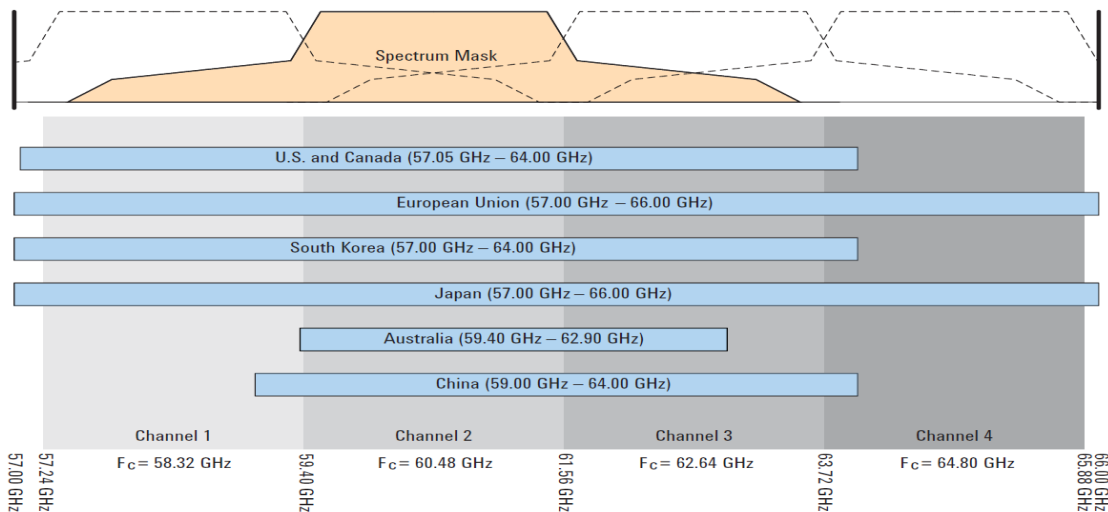
802.11ad – Multi gigabit

- **Fő újdonság: 60 GHz sáv használata**
 - Régióként eltérő szabályozás, de legalább 3.5 GHz széles egybefüggő „üres” sáv mindenhol elérhető
 - Ahol van kiosztás, ott sem nagyon használják
- **60 GHz**
 - Nagyon nagy a terjedési csillapítás
 - Kis adóteljesítmény, kis hatótávolság
 - Ez igazából előny: szomszédos rendszerek nem zavarják egymást
 - Rálátás kell az adó és a vevő között (LOS)
 - Falon/tárgyakon/emberen, stb. nem nagyon megy át



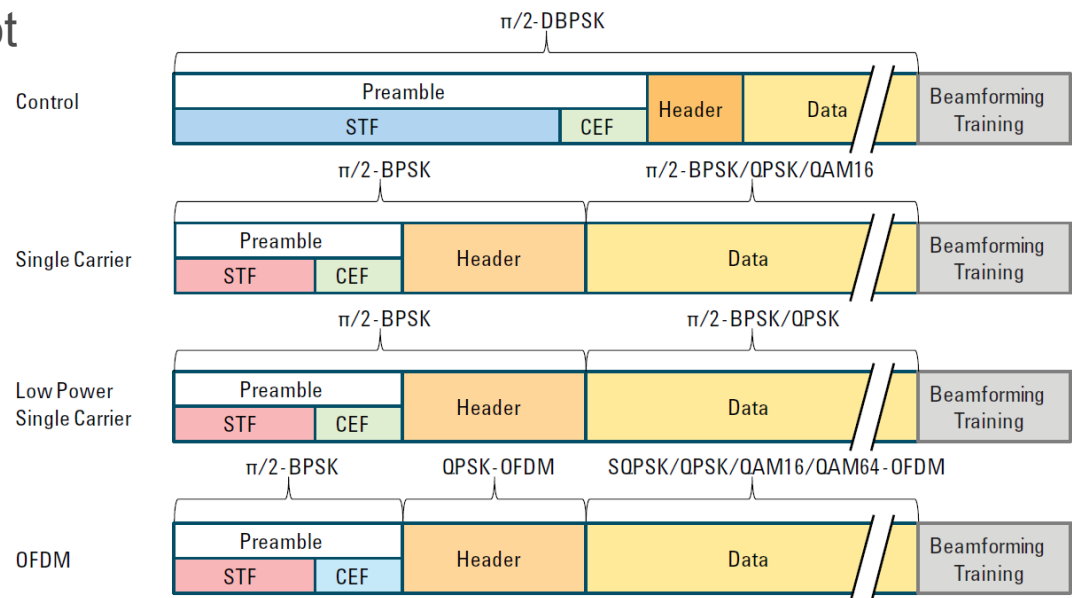
802.11ad – Multi gigabit

- Multiantenna
- Kis hullámhossz (~5 mm), így kis méretű antennarendszerek
 - Jelutak függetlensége
 - Sok antennával nagyobb nyereség érhető el
 - Sok antennával hatásosabb a nyalábformálás is
 - Nagyobb mennyiségű kontroll információ átvitele szükséges
- Új gyártási technológiák, új anyagok az antennagyártásban
 - Kerámia alapú anyagok, műanyagok
- ITU_R ajánlás: 2,16 GHz-es csatornák



802.11ad – Multi gigabit

- IEEE elnevezés: DMG (Directional Multi-Gigabit) fizikai réteg
- LDPC kódolás (korábban: opcionális)
- Háromféle hullámforma a szabványban
 - Szórt spektrumú, ez a fizikai kontroll információ
 - Külön hullámforma a kontroll keretek számára
 - Egyvívős moduláció
 - Ezen belül is megkülönböztetik az alacsony adóteljesítményű egyvívős modulációt
 - OFDM



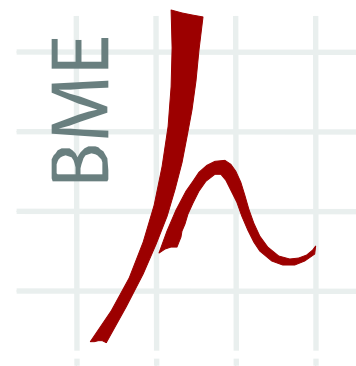
Forrás: Wireless LAN at 60 GHz - IEEE 802.11ad Explained, Agilent Technologies whitepaper

802.11ad – Multi gigabit

- Adatátviteli képességek
 - Egyvívős hullámforma
 - 1760 Msps szimbólumsebesség a csatornán
 - BPSK, QPSK, 16 QAM
 - Kis teljesítményű egyvívős
 - Adatsebességek 626 – 2503 Mbps
 - OFDM hullámforma
 - 512 pontos FFT 2640 MHz mintavételen:
 $2640/512 = 5.15625$ MHz segédvívők közti távolság (vs. 3G 5 MHz)
 - A széles sávúság fogalma
 - Szimbólumidő 194 nsec, védőperiódus 48.4 nsec
 - (512 lehetségesből) 336 segédvívő
 - 16 pilot, 3 dc, sáv szélén nem használtak
 - ~ 336 3G sáv egyszerre: elvárjuk a ~300*20 Mbps-t
 - 64 QAM, 13/16 kódarány a legnagyobb sebesség
 - $(336*6*13/16)/(194+48.4 \text{ nsec}) \sim 6756.75$ Mbps

802.11ad – Multi gigabit

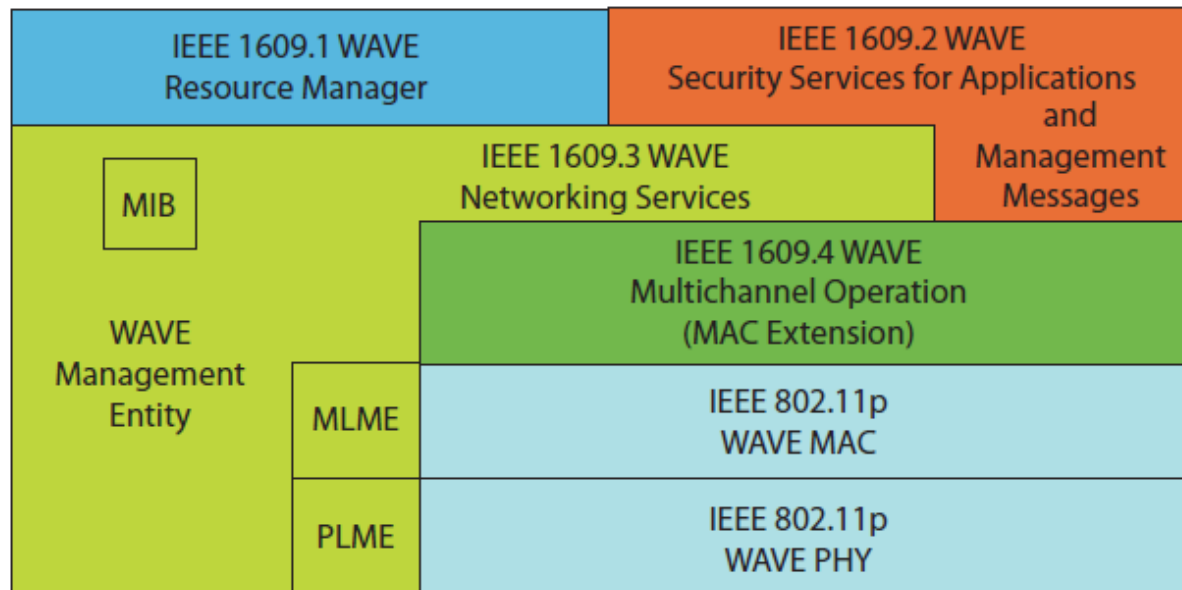
- Továbbfejlesztési lehetőségek
 - 256 QAM
 - Több segédvívő (512-ig)
 - Channel bonding
 - Multi-stream
 - Pl. 2 stream, 2 csatorna, +100 segédvívő ~ 30 Gbps



Egyéb 802.11 megoldások

802.11p – Járművek

- Intelligens közlekedési rendszerekben, valamint V2V linkek számára javasolt szabványverzió
- Definiálja a licencköteles 5.9 GHz sáv használatát
- Alapvetően a 802.11a OFDM hullámforma
- 802.11e QoS közeghozzáférés
 - Az IEEE 1609 WAVE protokoll erre épül
 - Az ETSI ITS-G5, GeoNetworking protokoll is épülhet rá

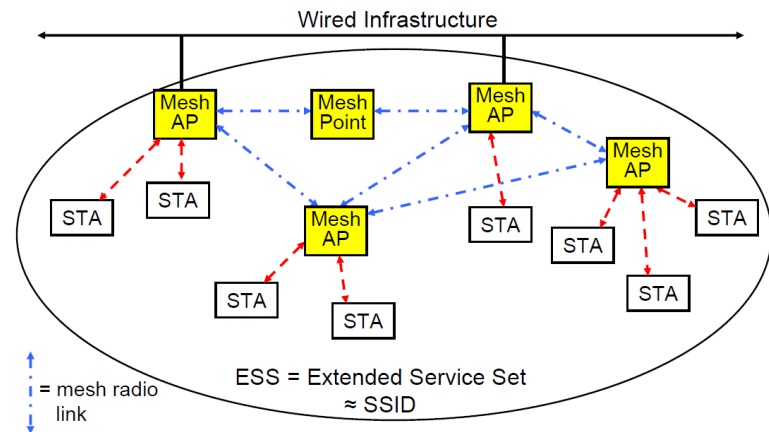


802.11p – Járművek

- **Mit kell változtatni?**
 - Alapvetően: a kapcsolat csak rövid ideig áll(hat) fenn
 - Ez alatt kell az információcserének megtörténnie
 - A normál BSS kialakítás folyamatai nem elég gyorsak ehhez
 - Hiába definiálja a szabvány az IBSS-t
 - Tehát definiálásra kerül a BSS, hitelesítés, titkosítás, asszociáció nélküli adatcsere
 - Ha mégis van ilyesmire szükség, azt a felsőbb rétegekben kell megoldani
 - Ehhez „joker” BSSID címet tesznek a keretbe a BSS címe helyett (csupa 1, ez a fogadó mezőben broadcast címezést jelent amúgy)
- **Szinkronizációs mechanizmus**
 - A szabvány definiál egy új menedzsment keretformát, amellyel hirdeti az órája állapotát
 - 1958 jan 1. óta eltelt idő nanosec-ben
 - 10 byte (elég sok)
- **Gyártóspecifikus menedzsment információk**
- **Rádiós paraméterek**
 - 802.11a OFDM formátum, de csak 10 MHz sávszélességen
 - Emelt szintű szomszédcsatornás elnyomás definiálása
 - kevésbé zavarják a szomszédos rendszerek

802.11s – Mesh

- Szövevényes hálózati infrastruktúra támogatása
- Multihop, ad-hoc működés
 - Hagyományosan: vezetékes hálózat
- Gyorsabb, olcsóbb telepítés
 - Nehezen vezetékezhető helyszíneken
- Bővíthető, hibatűrő
- Többugrásos adattovábbítással nagyobb lefedhető terület
 - Nagyobb átviteli sebesség biztosítható jó körülmények esetén
- Célok
 - Wireless Distribution System automatikus topológiafelderítéssel
 - Elsősorban kis/közepes hálózatok (30 csomópont körül)
 - Dinamikus, csatornaállapotot figyelembe vevő útvonalválasztás a mesh-en belül
 - Uni/multi/broadcast
 - Csak a MAC változik, a fizikai réteg marad
 - IP rétegben is megoldható ugyanez (vagy hasonló), vannak open source implementációk is
 - Sőt, ezek tipikusan 3. rétegbeli feladatok: útvonalválasztás, topológia
 - A 802.11: MAC és PHY



802.11s – Mesh

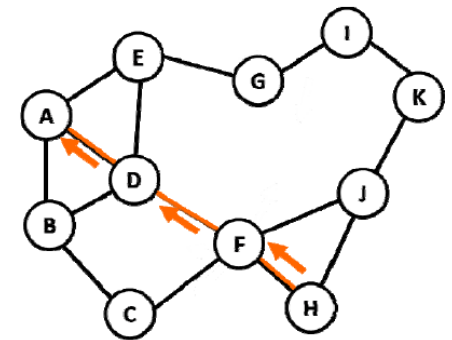
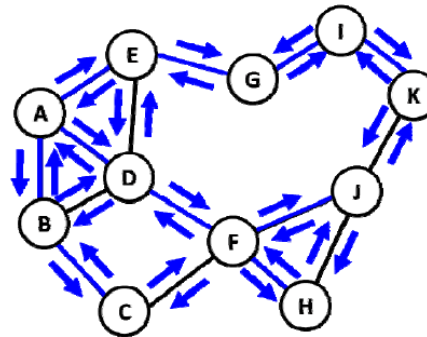
- **Topológiafelderítés:**
 - Új típusú menedzsment beacon és probe response keretek erre a célra
 - Ebben mesh képességek és tulajdonságok (konfiguráció)
 - PI. Mesh azonosító (melyik hálózat)
- **Képességek/tulajdonságok:**
 - Alkalmazott útvonalválasztási protokoll és metrika
 - Alkalmazott titkosítás/hitelesítés
 - Szinkronizációs módszer
 - Szomszédok száma
 - Stb.
- **Kapcsolat létrehozása**
 - Beaconok alapján az egymást halló állomások szomszédossági viszonyt alakítanak ki
 - Hitelesített: van AAA szerver alapú megoldás, de ez nem rugalmas
 - Simultaneous Authentication of Equals (SAE) módszer
 - Nem hitelesített módszer
 - Információcsere után
 - Ami hasonlít az asszociációhoz, de kölcsönösen megtörténik
 - Lesz a kapcsolatnak és a szomszédnak is egy-egy lokális azonosítója

- **Topológiafelderítés**
 - Új típusú menedzsment beacon és probe response keretek erre a célra
 - Ebben mesh képességek és tulajdonságok (konfiguráció)
 - PI. Mesh azonosító (melyik hálózat)
- **Képességek/tulajdonságok**
 - Alkalmazott útvonalválasztási protokoll és metrika
 - Alkalmazott titkosítás/hitelesítés
 - Szinkronizációs módszer
 - Szomszédok száma
 - Stb.
- **Kapcsolat létrehozása**
 - Beaconok alapján az egymást halló állomások szomszédossági viszonyt alakítanak ki
 - Hitelesített: van AAA szerver alapú megoldás, de ez nem rugalmas
 - Simultaneous Authentication of Equals (SAE) módszer
 - Nem hitelesített módszer
 - Információcsere után
 - Ami hasonlít az asszociációhoz, de kölcsönösen megtörténik
 - Lesz a kapcsolatnak és a szomszédnak is egy-egy lokális azonosítója

802.11s – Mesh

- **Útvonalválasztás: Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)**
 - Proaktív és reaktív módon is működik
 - Reaktív: útvonalválasztás közvetlenül a küldés előtt
 - Proaktív: útvonalak felderítése periodikusan, küldéskor van útvonal
 - Az útvonalválasztási folyamat útvonal kérés (PREQ) és útvonalválasz (PREP) üzeneteken alapul
 - Egy állomás akar útvonalat felderíteni, PREQ-t küld minden szomszédjának
 - Benne tartalomként a saját MAC címe, a kérés egyedi azonosítója
 - Útvonal eddigi hossza, illetve súlya
 - Melyik MAC című állomásokhoz (max 20) szeretne útvonalat felderíteni
 - Csomag élettartama, mikor keletkezett
 - Broadcast címre küldi, minden szomszédja megkapja
 - De csak az dekódolja, akivel megvan a mesh szomszédossági kapcsolat
 - Mindenki ezt teszi:
 - Növeli a távolság (ugrások száma) értéket, módosítja az útvonal súlyát,
 - Változtatja az élettartamot
 - Feljegyzi, hogy melyik szomszédjától kapta az adott azonosítójú PREQ-t és hogy a küldőtől számítva milyen hosszú és súlyú az útvonal idáig
 - És broadcast módon elküldi a saját szomszédainak

- **Útvonalválasztás: Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)**
 - A kezdeményező is, illetve a közös szomszédok újra megkapják
 - Az idő mezők és a kérés azonosító alapján ezt észlelik és eldobják
 - Aki első alkalommal kapja meg, az az előbbi módon továbbítja
 - Előbb-utóbb eljut a PREQ a címzethez
 - A címzett küld PREP-t
 - Annak, akitől a PREQ, pontosabban akitől olyan PREQ jött, amiben az útvonal hossza és metrikája a legkedvezőbb
 - Aki megkapja a PREP-t, megjegyzi, hogy kitől, ugrások száma, élettartam, útvonal-metrika
 - A PREP így visszatér az eredeti feladóhoz
 - A végső PREP-ekben az odaút van
 - Ezt követően lehet küldeni a tényleges információt
 - Emiatt reaktív



Forrás: 802.11s Mesh Networking, whitepaper, Jerome Henry

- **Útvonalválasztás: Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)**
 - Később: bármely állomás, ha rendelkezik érvényes útvonallal egy címzett felé, akkor ő válaszol RREP-pel
 - Nem megy el a RREQ a legtöbb esetben a célig
 - Proaktív: amikor egy állomás csatlakozik a mesh-hez, akkor broadcast címet ad meg, mint célcím a PREQ-ben
 - Mindenki válaszol majd PREP-pel, és továbbítja is a PREQ-t
 - Elvileg lehet mindenkinek mindenhová útvonala
 - Ez nagyon terheli a hálózatot
- **A gyakorlatban tipikus, hogy a forgalom egy, vagy néhány mesh csomóponton keresztül megy**
 - Átjáró AP (gate) csomópont (Mesh Portal, MPP): ez csatlakozik egy DS-hez
- **A szabvány mechanizmust definiál a (logikai) fa struktúrájú működésre**
 - Definiálva van a gyökér (root) AP funkcionalitás is
 - A root AP-k periodikusan küldenek a hálózatba RANN (Root Announcement) üzeneteket
 - Ebben közlik a MAC címüket, valamint az, hogy átjáró-e
 - Az állomások a már ismertett PREQ – PREP mechanizmussal derítik fel az útvonalat a root-ig
 - Így a hálózat üzemeltetője tetszőleges topológiát konfigurálhat

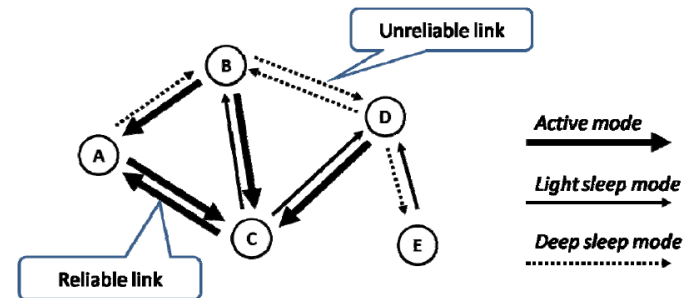
- **Útvonalválasztási metrika**
 - Hop count: hány csomóponton keresztül került a PREQ/PREP továbbításra
 - Nem feltétlenül a legrövidebb a legjobb
 - A 802.11s metrika figyelembe veszi az átviteli sebességet és a hibaarányt
 - Airtime link metric
 - Mennyi idő átvinni a csomagot (~átviteli sebesség)
 - Normálva a mért kerethiba-aránnyal (a nyugtázási mechanizmusból következik)
- **Gyártófüggetlen routing metrika implementálható**
- **Teljesítménykímélő üzemmódok**
 - Cél, hogy mesh hálózati csomópont akkumulátoros üzemeltetésű is lehessen
 - Szenzor hálózatok
 - Tulajdonképpen kétféle forgalmi funkció van
 - Továbbítás
 - Saját adat
 - Ennek megfelelően a korábbi módszert ki kellett bővíteni

802.11s – Mesh

- **Háromféle PS módot definiálnak**
 - Aktív: a csomópont bármikor elérhető
 - Olvassa a csatornán megjelenő MAC keretek címzett mezőjét)
 - „Szundikál” (light sleep)
 - Saját forgalma nincs, de kész a továbbításra
 - Alvó módban van, de azokban a szomszédjai által küldött beacon üzenetek idejére periodikusan felébred
 - A beacon-ben jelzik a szomszédok, ha továbbítandó adat gyűlt fel náluk
 - Ekkor felébred és explicit kéréssel lekérdezi a szomszédtól ezt az adatot
 - Ez hasonló a „hagyományos” teljesítménykímélő üzemmódhoz
 - Alvó mód
 - Saját beaconjeit küldi csak
 - De ezután hosszabb ideig ébren marad, hogy a szomszédjai tudjanak megfelelő menedzsment kereteket küldeni
 - Mesh Awake Window információ a beacon-ben
 - A PS mód szomszédonként változhat
 - Pl. Egyik szomszédal deep sleep -> az ő beaconjeit nem hallgatja
 - Másikkal light sleep
 - Illetve mesh forrás/cél viszonyban is értelmezett

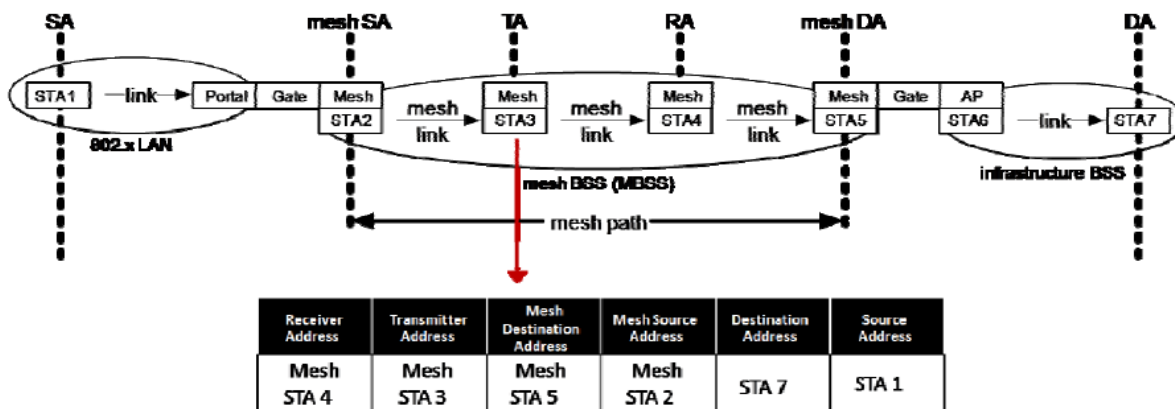
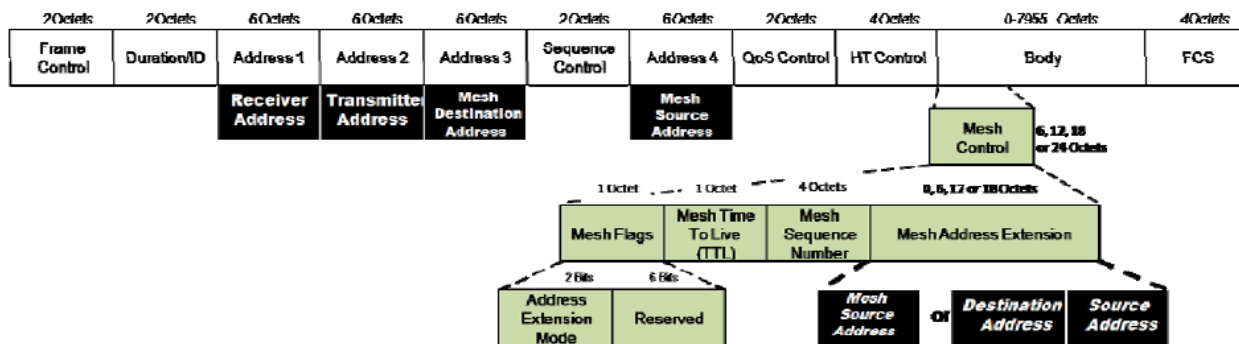
802.11s – Mesh

- **Háromféle PS módot definiálnak**
 - Ezzel befolyásolható a routing is
- **Fejlettebb szinkronizációs megoldás**
 - Bizonyos kontroll üzenetekben időbélyeg
 - Az órák elcsúszása is mérhető
 - Az elvárttól eltérő időbélyeg érkezik a két óra közti elcsúszás miatt
- **Beacon üzenetek ütközésének elkerülése**
 - A beaconben azt is hirdetik, hogy a szomszédok beaconjei mikor várhatók
 - Rejtett terminál ellen
 - A – B – C: B a beaconben megmondja, A beaconjeinek időzítését, C ehhez igazíthatja a sajátját (hogy ne egyszerre legyen)
 - Ez saját döntése, vagy explicit kérés alapján egy szomszédjától
- **TXOP foglalása a mesh-en keresztül**
- **Bonyolult funkciók**
 - Sok kiegészítés az eredeti „faék egyszerűségű” 802.11-hez képest
 - Új management információk, új keretformák
 - A keret törzsén belül mesh kontrol mező



802.11s – Mesh

- L2 hálózat kialakítása esetén: több cím kell, max 6 darab
 - Rádiós vevő/adó (közvetlen link-hez)
 - mesh hálózatban forrás/cél (mesh routinghoz)
 - Eredeti küldő/fogadó: L2 több hálózat esetén



Forrás: 802.11s Mesh Networking, whitepaper, Jerome Henry

802.11af – Super Wi-Fi

- **Alapvető tulajdonságok**
 - Egy inkumbens szolgáltatás számára lefoglalt spektrum
 - A rendszert használók az elsődleges használók
 - De a spektrum nincs jól kihasználva
 - Térben és/vagy időben „lyukak” (spectrum holes) a spektrumban
- **Kognitív rádió**
 - Másodlagos hozzáférés definiálása
 - A másodlagos felhasználó érzékeli a spektrumot
 - Detektálja a lyukakat, adási lehetőséget (spectrum opportunity, opportunistic radio)
 - Ott és akkor adhat
 - Úgy, hogy az elsődleges rendszert ne zavarja
- **A WiFi alapvetően kognitív: vivőérzékeléses hozzáférés**
- **Sok projekt, széles szakirodalom a kognitív rádióról**
 - Spektrum érzékelési módszerek
 - Fő probléma: az érzékelés helyén lehet lehetőség, de az adás máshol attól még zavarhat inkumbens előfizetőt
 - Kontextus, szabályok ismerete, döntés (adás)
 - Kontroll információk cseréje: honnan tudja a másodlagos vevő, hogy a másodlagos adó melyik spektrumlehetőséget használta?
 - Dinamikus módon ez rendkívül nehéz
 - Tehát msec/sec nagyságrendű adaptáció a spektrum kihasználtságához

802.11af – Super Wi-Fi

- **Fő motiváció: nem használt TV sávok jobb kihasználása (TV whitespace)**
 - Területileg változó, hogy mely földfelszíni digitális műsorszóró sávok vannak használatban
 - A spektrum lyukak hónapokig fennállnak
 - Lehet tudni előre a kiosztás változását
 - GHz alatti sávok, nagyon jó terjedési tulajdonságokkal
- **Pragmatikus megközelítés: geolokációs adatbázis (GDB, Geolocation DataBase)**
 - Külső eszköz, amely a 802.11af architektúra része
 - Az adatbázis földrajzi koordinátákhoz tartalmazza az elérhető sávokat és az alkalmazandó rádiós paramétereket (sávszélesség, adóteljesítmény)
 - Regionális spektrumszabályozásnak megfelelően
 - A GDB-t a szabályozó hatóság hitelesíti és adminisztrálja
- **Biztonságos regisztrált lokációs szerver (RLSS, Registered Location Secure Server)**
 - Lokális szerver, az általa kontrollált AP-k és STA-k számára nyújtja a GDB-nek megfelelően a hozzáféséri információkat
- **Geolokációs adatbázistól függő (GDD, Geolocation Database Dependent) eszközök a hálózatban**
- **AP-k a hozzájuk kapcsolódó állomások számára teszik lehetővé az üres sávok használatát**
 - GDD Enabling állomás: AP; GDD dependent állomás: a terminál
 - Ehhez ún. spektrum-térképeket használnak
 - WSM-et (White Space Map) oszt az AP a klienseknek

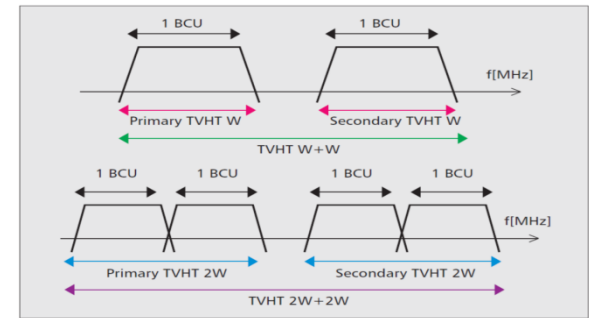
802.11af – Super Wi-Fi

- **A GDB modell:**
 - Nyílt hurkú (FCC):
 - a GDB napi szinten frissül, elvileg elég lekérdezni ilyenkor
 - Elvileg napi fehatalmazás az adott sávok használatára
 - RLSS szerepe: adat-továbbítás
 - Zárt hurkú (ETSI, Ofcom)
 - A termináloktól jövő adatok alapján gyakoribb frissítés
 - Újra le kell kérdezni, ha pl. Elmozdul több, mint 50 métert
 - Kétórás fehatalmazás
 - Rádiós paraméterek függnnek az inkumbenstől való frekvenciában és fizikailag mért távolságtól
 - RLSS: aktív vezérlő
- **ISM sávbéli működés alap, ezt kiegészíti a TVWS**
- **Az AP gondoskodik róla, hogy a WSM megfelelő legyen a kliensnél**
 - WSM azonosítóval
 - Ha a kliensnél nem megfelelő, akkor lekérdezi
 - Vagy visszatér ISM sávú működésbe
- **Hálózat kialakítása:**
 - Az AP speciális beacon-okat küld az elérhető üres sávokban
 - A terminálok ezt figyelik, ez alapján próbálnak regisztrálni
 - Bizonyos szabályozások megkövetelik, hogy az AP lekérdezze a GDB-től, hogy az adott (típusú) kliens beengedhető-e

802.11af – Super Wi-Fi

- Fizikai réteg:**

- Elnevezés TVHT (TV High Throughput)
- A HT (802.11n) fizikai rétegre épül, tehát OFDM
- A földfelszíni műsorszóró csatornáknak megfelelően
 - 6, 7 vagy 8 MHz csatorna (BCU, Basic Channel Unit)
 - Az OFDM feldolgozáshoz, illetve hogy a 802.11n-hez hasonló legyen, ez meglehetősen furcsa konkrét értékeket fog eredményezni FFT, időzítési paraméterek tekintetében
 - Pl. 6/7 MHz: 144/168 pontos FFT: 125/3 kHz segédvívó távolság; 24 us szimbólumidő
 - 8 MHz: 144 pontos FFT, 280/9 kHz segédvívó-távolság, 18 us szimbólumidő
 - Kétféle prefix



- 108 hasznos segédvívó (adat) + 6 pilot segédvívó
- 2/4/16/64/256 QAM
- 4*4 MIMO maximum
- 1, 2 vagy 4 csatorna folytonosan
- 1+1 vagy 2+2 nem folytonosan, aggregálva használható

- Átviteli sebességek**

- Egy csatorna max 35.6 Mbps
- Csatornák számával + Térben multiplexelés
- Pl. 4*8 MHz esetén 142.4 Mbps
- Elvi max. 570 Mbps

MCS Index	Modulation	R	N _{BPS}	N _{SD}	N _{SP}	N _{CBPS}	N _{DBPS}	Data rate (Mb/s) for 6 MHz or 7 MHz		Data rate (Mb/s) for 8 MHz	
								6.0 μs GI	3.0 μs GI	4.5 μs GI	2.25 μs GI
0	BPSK	1/2	1	108	6	108	54	1.8	2.0	2.4	2.7
1	QPSK	1/2	2	108	6	216	108	3.6	4.0	4.8	5.3
2	QPSK	3/4	2	108	6	216	162	5.4	6.0	7.2	8.0
3	16-QAM	1/2	4	108	6	432	216	7.2	8.0	9.6	10.7
4	16-QAM	3/4	4	108	6	432	324	10.8	12.0	14.4	16.0
5	64-QAM	2/3	6	108	6	648	432	14.4	16.0	19.2	21.3
6	64-QAM	3/4	6	108	6	648	486	16.2	18.0	21.6	24.0
7	64-QAM	5/6	6	108	6	648	540	18.0	20.0	24.0	26.7
8	256-QAM	3/4	8	108	6	864	648	21.6	24.0	28.8	32.0
9	256-QAM	5/6	8	108	6	864	720	24.0	26.7	32.0	35.6