

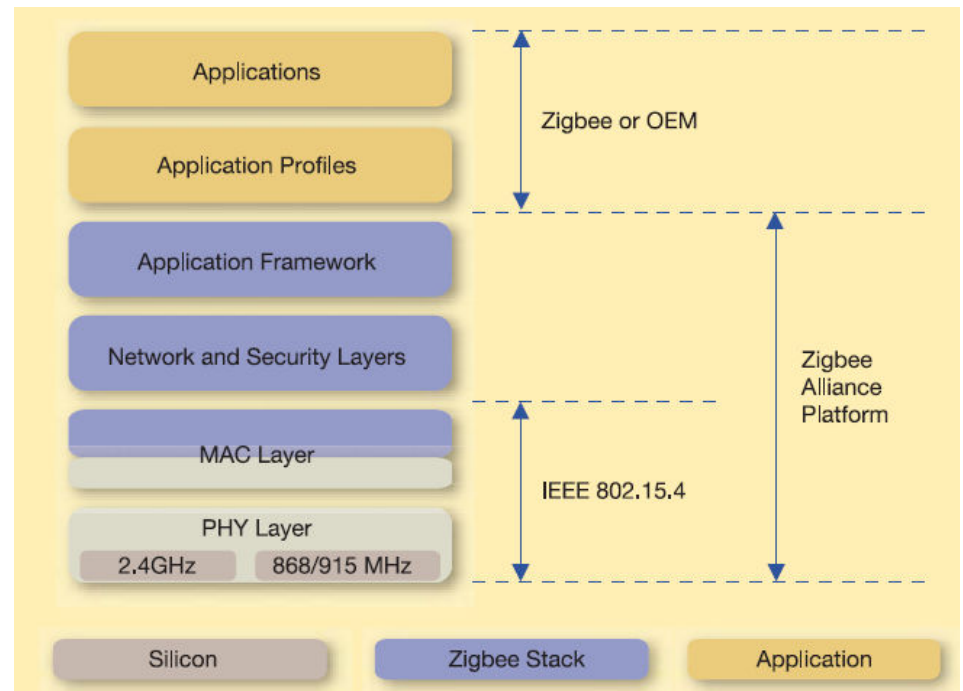
# IEEE 802.15.4. szabvány ismertetése *(folytatás)*

Orosz György  
2011. 09. 30.

Forrás: Dr. Kolumbán Géza előadásanyagai,  
IEEE 802.15.4 szabvány

# Medium Access Control layer

- Medium Access Control: közeghozzáférési szint
- PAN: Personal Area Network
  - Kisméretű hálózatok
  - Egyszerű, olcsó, kis hatótávolságú eszközök
- Felsőbb szintek rádiós csatornához történő hozzáférést szabályozza
- Részfeladatok
  - Hálózatok létrehozásának támogatása
  - Eszközök hálózathoz történő hozzárendelése és eltávolítása
  - Acknowledge üzenetek generálása
  - Biztonsági funkciók (pl. titkosítás)
  - Beacon (jelző) üzenetek generálása
  - Garantált időszeletek felügyelete



# IEEE 802.11.4. Hálózati topológia

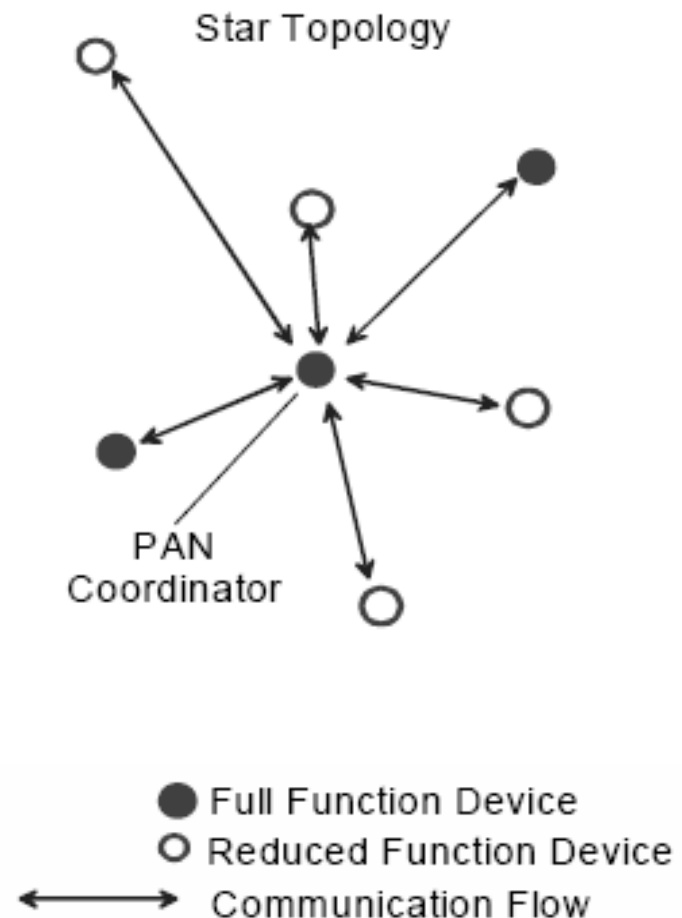
- A hálózatokhoz azonosító tartozik: PAN ID
  - A PAN ID egyedi: nem tartozik egyéb, hatótávolságon belüli más hálózathoz sem
- Star (csillag) és peer-to-peer (közvetlenül kapcsolt) topológiákat támogatja
- Hálózat felügyelete nem tartozik a szabványba
- A peer-to-peer topológia lehetővé teszi nagy, ad-hoc, öngyógyító hálózatok kialakítását is csatlakozási pontokon keresztül
- Minden eszköznek egyedi 64 bites cím tartozik
  - A komplexitás csökkentése miatt 16 bites címek is alkalmazhatóak
  - A címek kicserélése a hálózathoz történő csatlakozáskor történik

# Hálózati eszközök típusai

- Full function device (**FFD**)
  - Bármilyen topológiában működhet
  - Hálózati koordinátorként (PAN coordinator) üzemelhet
  - Képes saját hálózat létrehozására
  - Bármilyen eszközzel kommunikálhat
- Reduced function device (**RFD**)
  - A hálózatban csak végpont lehet
  - Nem lehet hálózati koordinátor
  - Csak a hálózati koordinátorral kommunikálhat
  - Egyszerű implementáció, csekély erőforrások

# Star topology

- Star (csillag) topológia
- Minden eszköz egy központi eszközhöz, a PAN Coordinator-hoz csatlakozik
- Csak egy PAN coordinator létezik egy hálózaton belül
- Mindenki csak a PAN coordinatorral kommunikálhat
- Bármely FFD létrehozhat egy csillag topológiájú hálózatot
- Koordinátor feladatai:
  - Hálózat felügyelete
  - Eszközök csatlakozási és lecsatlakozási kéréseinek kezelése
  - Hálózat ütemezése: beacon üzenetek küldése



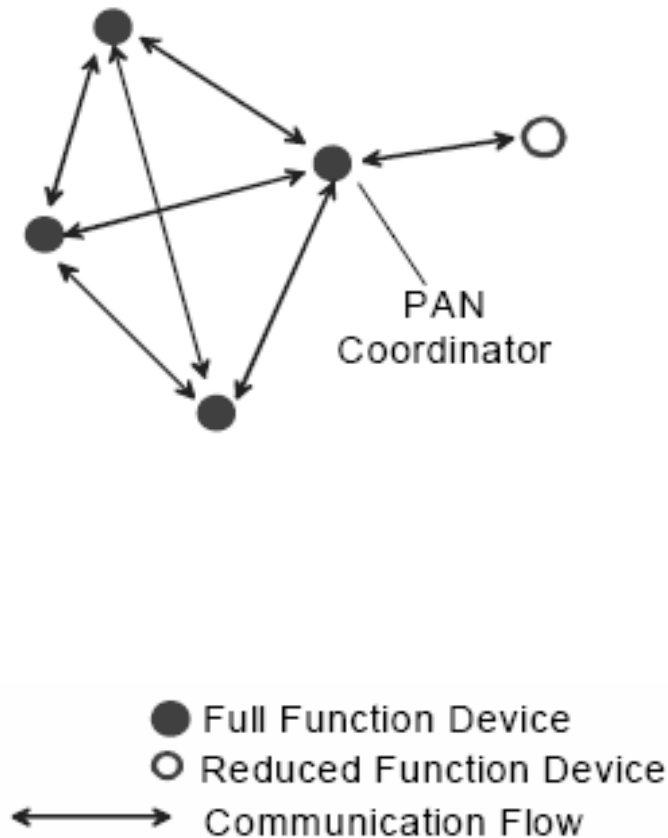
# Star topology

- Új csillag topológiájú hálózat létrehozása
  - A PAN coordinator egy egyedi címet (PAN ID) választ (hatótávolságon belül nem létezik ilyen PAN ID)
  - Beacon üzeneteket küld a hálózatba, és várja az eszközök hálózathoz való csatlakozási kéréseit
- Hálózathoz történő csatlakozás folyamata
  - A hálózathoz csatlakozni kívánó eszköz beacon üzeneteket keres
  - Beacon üzenet észlelésekor az eszköz csatlakozási kérelmet küld a PAN koordinátor felé
  - A PAN coordinator engedélyezi/elutasítja a kérelmet
- Non-beacon-enabled elrendezés esetén
  - A PAN coordinator csak hálózatlétrehozási szándékkal küld üzeneteket

# Peer-to-peer hálózat

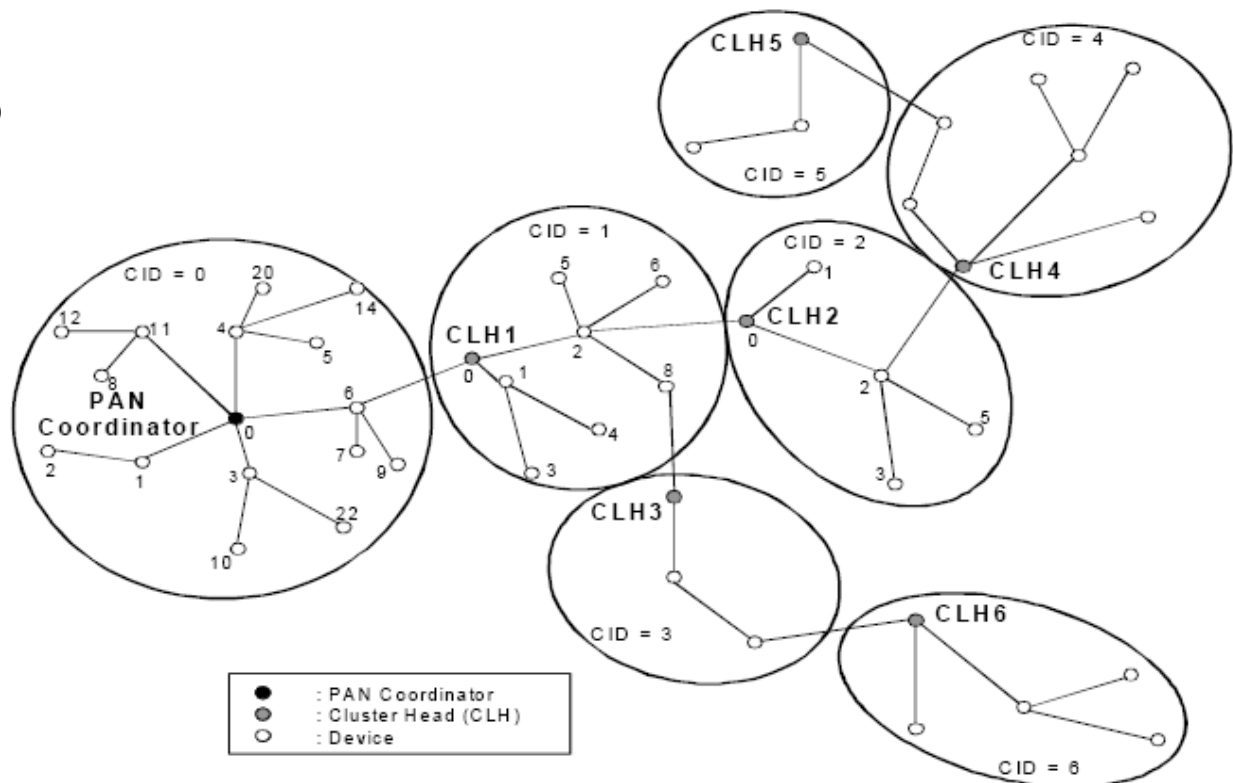
- Peer-to-peer hálózat
- Minden eszköz képes minden eszközzel kommunikálni, amely a rádiós hatótávolságon belül található
- Hatótávolságon kívüli FFD-k közötti kapcsolat is lehetséges multi-hop üzenetküldés segítségével
- A multi-hop kapcsolattartás extra memóriát igényel: routing tábla tárolása
- RFD is lehet tagja a hálózatnak, de csak mint „periféria”, routing során nem, mert nincsen megfelelő erőforrás
- Több útvonal is lehetséges két eszköz között, így robusztus: egy-egy node kiesése még nem okoz végzetes kapcsolatvesztést; öngyógyító topológia

Peer-to-Peer Topology



# Bonyolultabb hálózati struktúrák

- Cluster-tree topológia: több alhálózatból felépített hálózat
- RFD: csak levél (végpont) lehet a gráfban
- Egyetlen PAN coordinator
- Egy cluster head minden clusterben
- Az FFD-k egymásnak szolgáltatást nyújtanak
- Multihop kommunikáció
  - Nagyobb lefedett terület ☺
  - Nagyobb késleltetés ☹
- Redundáns kapcsolat → robusztusság
- Első node: CLH és CID=0
- Folyamatos csatlakozással felépül a hálózat

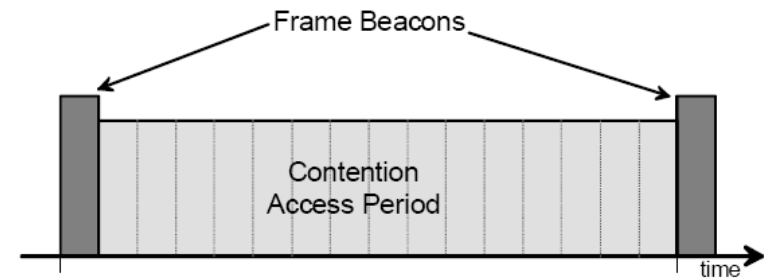




# Hálózati üzenetütemezés

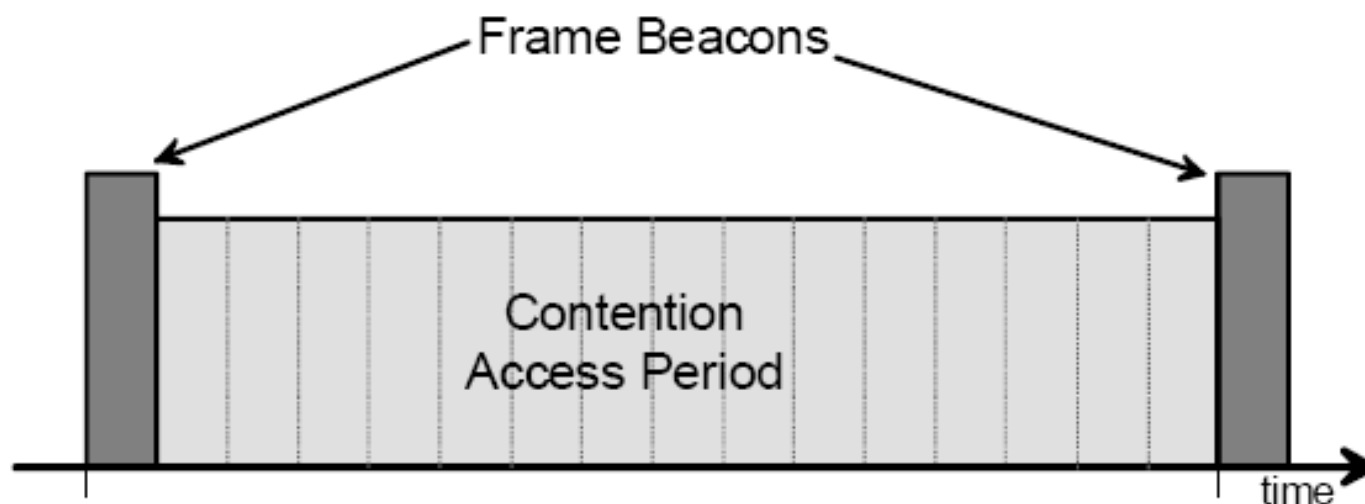
## Superframe formátum

- Lehetséges hálózati ütemezés – hálózati keretstruktúra
  - Non-beacon-enabled (unslotted): üzenetküldés bármely időpontban lehetséges
  - Beacon-enabled (slotted): a hálózati működést periódikusan küldött beacon (jelző) üzenetek időzítik. Az üzenetküldés a beacon üzenet által meghatározott, fix hosszúságú időrésekben (slot) lehetséges
  - Az üzenetek üzemelését a PAN coordinator vezérli
- Beacon-enabled network
  - Fix hosszúságú intervallumok
  - 16 slot minden keretben
- Beacon üzenetek és a keretek célja
  - A hálózat összehangolása
  - A hálózat azonosítása, összetartása megfelelő PAN ID (PAN Identifier) sugárzásával
  - A superframe formátumát megadja
  - Beacon üzenetek periodicitásának (superframe hosszának) definiálása
- A superframe-en belül bármely eszköz küldhet üzenetet a CAP-on (contention access period) belül CSMA-CA segítségével



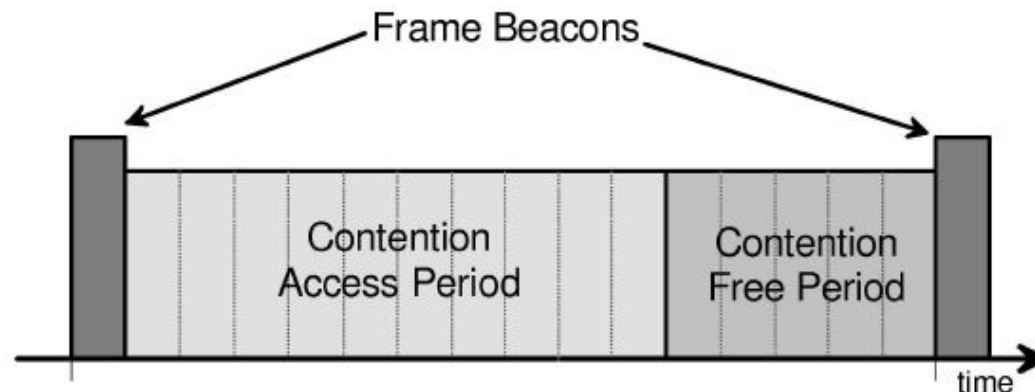
# Általános superframe struktúra

- A keretet ún. beacon (jelző) üzenetek határolják
- Nincsen GTS (Guaranteed Time Slots, tehát adott eszközhöz fixen allokált időszelet), így bármely eszköz adhat
- CSMA-CA használható az ütközések minimalizálására
- CAP (Contention Access Period): az eszközök versengenek a csatornáért. Szabad az adásjog mindenki számára.
- CAP minimális hossza 440 szimbólum
  - 2.4 GHz-es sáv: 1 szimbólum=4 bit → minimális CAP hossz = 7ms @250kbps



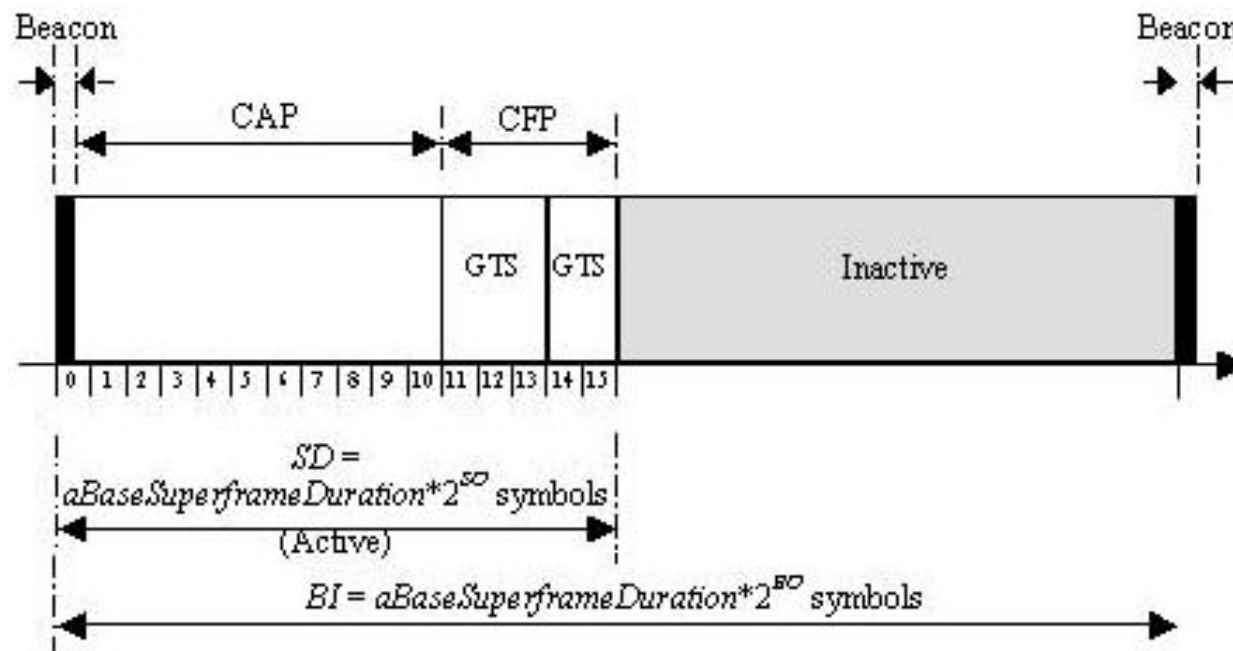
# Superframe GTS-el

- GTS: Guaranteed Time Slots
- A garantált időszetek superframe-en belüli pozícióit CFP-nek (Contention Free Period) nevezzük. Itt nem adhat olyan eszköz, amely nincsen allokálva valamelyik szabad időszülethez
- Az időszetek hozzárendelését a PAN coordinator végzi az eszközök kérésére
  - Egy eszköz akkor kap egy GTS-t ha van még szabad. Kérések beérkezési sorrendjében történik az allokáció, nincsen priorítás
- Maximum 7 GTS lehet egy superframe-en belül
- Több GTS slot is rendelhető egy eszközhöz. Beacon üzenetben történik a kiosztása
- Kis késleltetést, determinisztikus működést igénylő rendszerek esetén hasznos (riasztás, )



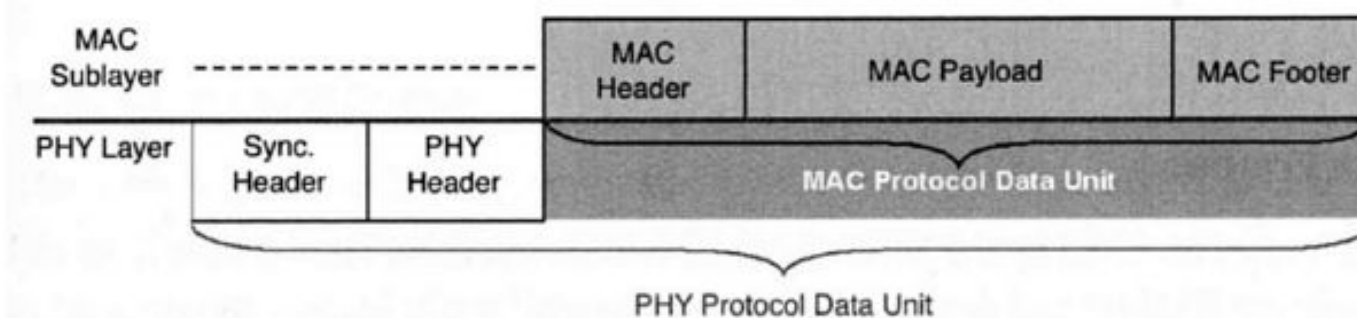
# Superframe időzítési viszonyai

- A keretezés időzítési viszonyait a MAC réteg paramétereinek határozzák meg
- Egy keret tartalmazhat inaktív szakaszokat IFS (Interframe Space)
- BI: Beacon Interval; (BO: 0...14), ahol BO: Beacon Order (BO=15: unslotted)
- SD: Superframe Duration; (SO: 0...BO), ahol SO: Superframe Order
- $aBaseSuperframeDuration = aBaseSuperframeDuration * aNumSuperframeSlots$ 
  - $aBaseSuperframeDuration = 60$  szimbólum és  $aNumSuperframeSlots = 16$
  - Maximális kerethossz @ 250kbps:  $T_{BI} = (60 * 4 * 1/250e3) * 16 * 2^{14} = 252 \text{sec} \approx 4 \text{min}$



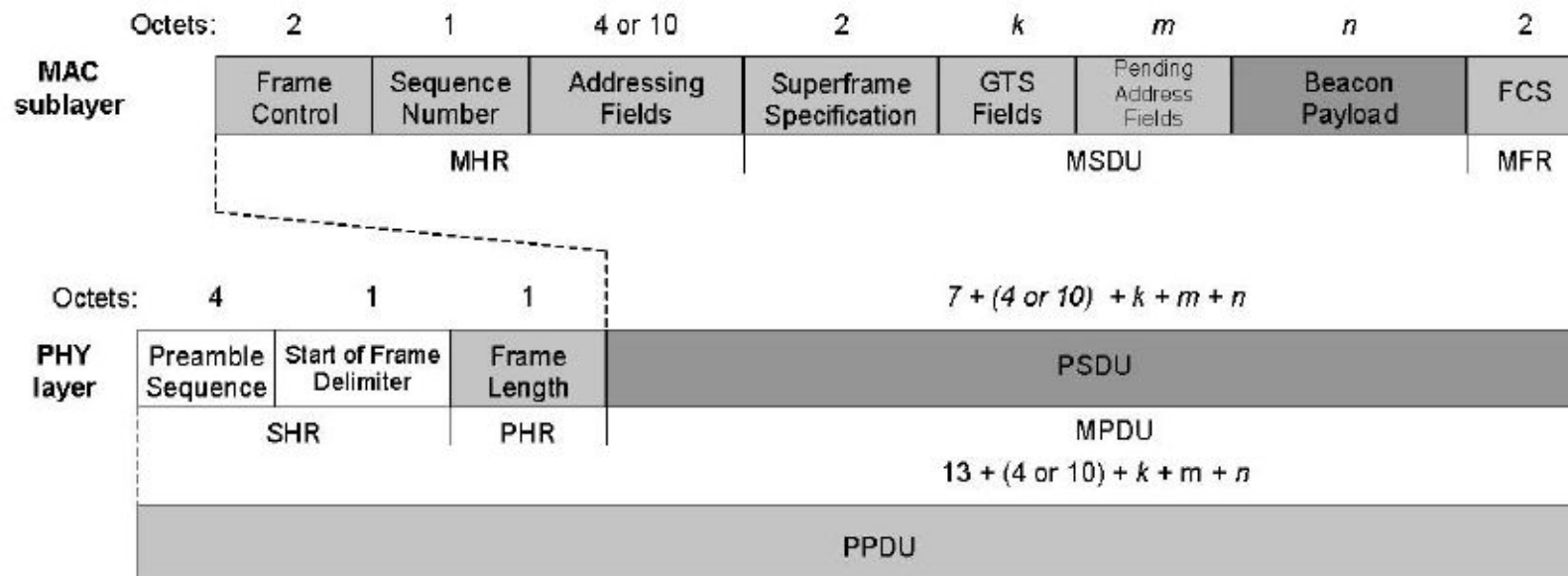
# Üzenetformátumok

- Négy típusú üzenet definiál a szabvány
  - Beacon üzenet
  - Adat üzenet
  - Acknowledge üzenet
  - Parancs üzenet (MAC command frame)
- MAC réteg üzeneteinek (MPDU) felépítése
  - MPDU: MAC Protocol Data Unit
  - Fejléc (MHR)
    - Frame Control Filed (FCF): vezérlő biteket tartalmaz, pl.: üzenet típusa, címezési mód (short/long), biztonsági adatok, acknowlede kérés.
    - Forrás és fogadó címe (FCF-ben definiált formátum)
    - Sequence number
  - Hasznos adat (MAC payload)
    - Felsőbb kommunikációs szintek adatait tartalmazza (keretezéssel együtt)
  - Lábléc (MFR: MAC Footer)
    - FCS (Frame Check Sequence). 16 bites CRC-t tartalmazza.
- A MAC teljes üzenetstruktúrája (MPDU: MAC Protocol Data Unit) a fizikai réteg hasznos adatmezéjébe kerül (PSDU).



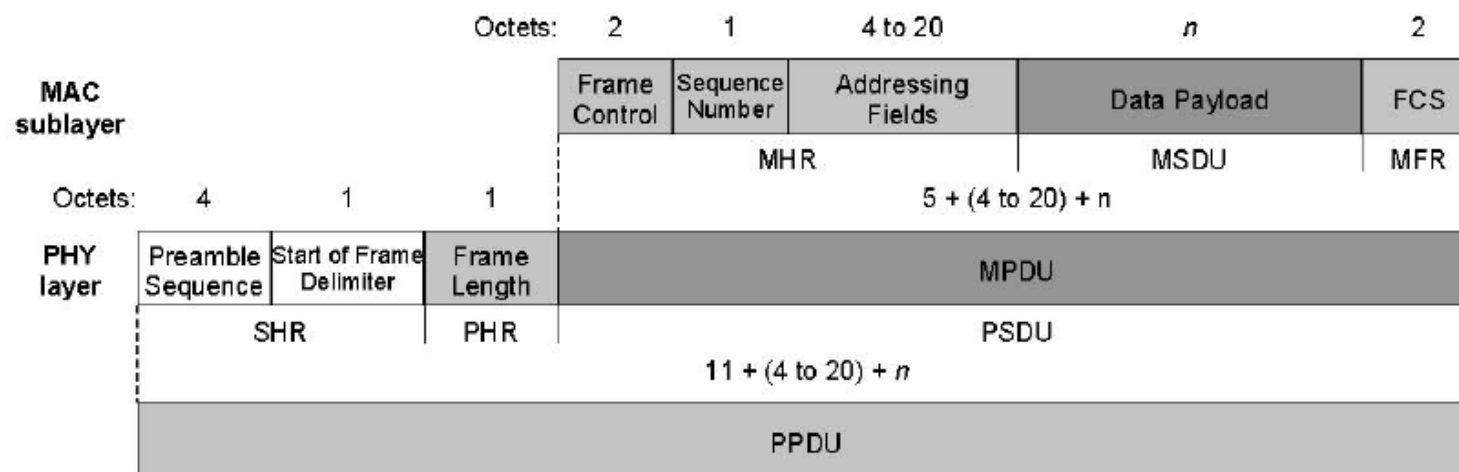
# Beacon üzenet

- Egy FFD (Full Function Device) küldhet beacon üzeneteket
- A forrás cím mező tartalmazza a PAN ID-t, és az eszköz címét
- PASF (Pending Address Specification Fields) mező jelzi, hogy mely node számára tárol üzenetet a PAN coordinator
- GTS Fields: GTS szeletek kiosztása



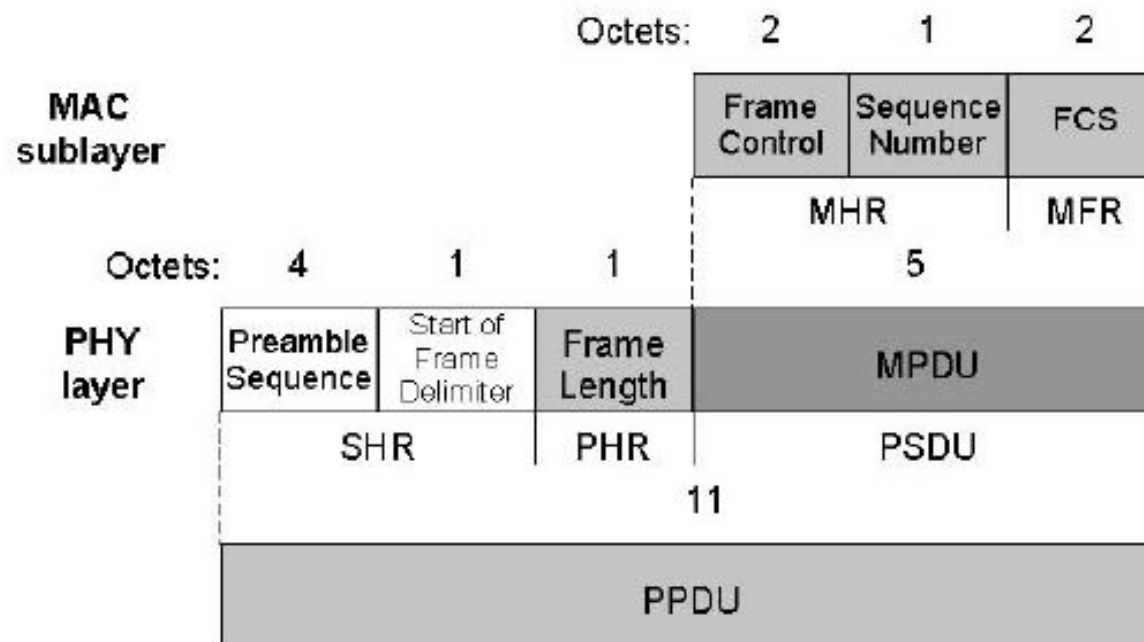
# Adat üzenet

- Mind a forrás, mind a címzett azonosítója megtalálható a cím mezőben
- Sorszámozott üzenetek (Sequence Number)



# Acknowledge üzenet

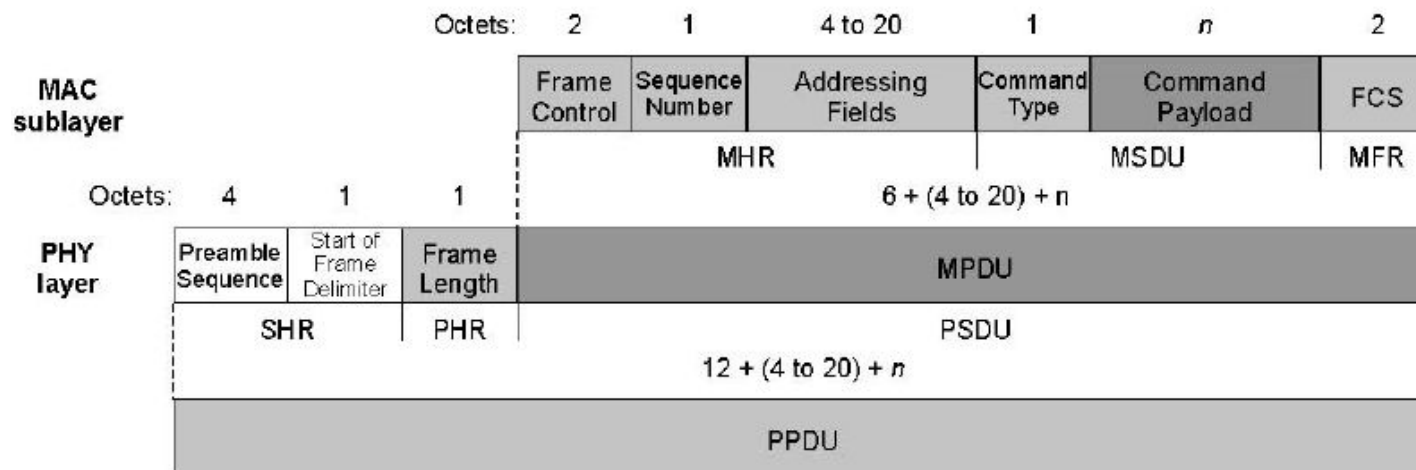
- Nem tartalmaz adatmezőt: gyors üzenetváltás
- Azonosítás az üzenet sorszám alapján (Sequence Number)
- Acknowledge üzenet feldolgozása:
  - Az üzenet sorszámának ellenőrzése
  - Nem megfelelő sorszám esetén az üzenet eldobása





# MAC parancs üzenet

- A MAC réteg vezérlésére szolgáló csomag



Parancs típusok  
(Command Type)

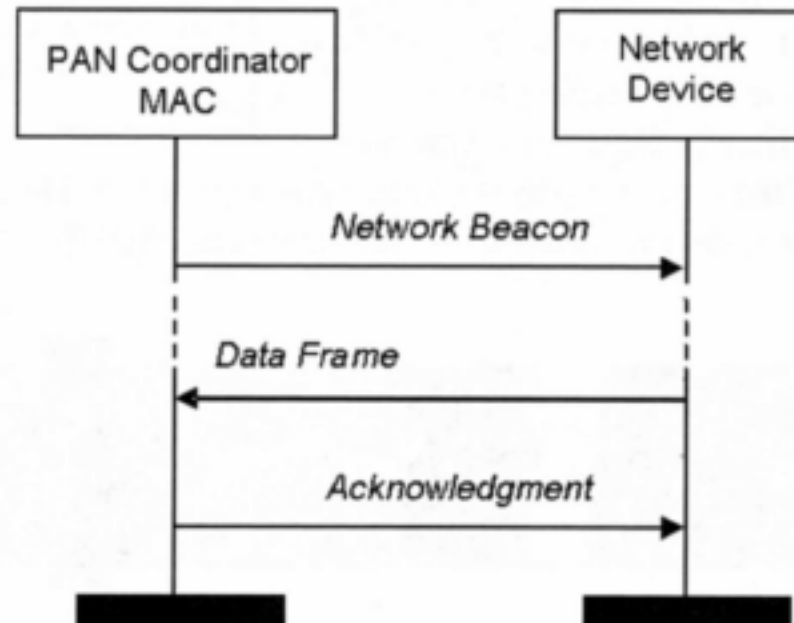
Command identifier	Command type
1	Association request
2	Association response
3	Disassociation notification
4	Data request
5	PAN ID conflict notification
6	Orphan notification
7	Beacon request
8	Coordinator realignment
9	GTS request
10-255	Reserved

# MAC réteg kommunikációs szerepe

- Feladat: biztonságos kommunikáció a szabadon hozzáférhető ISM sávokban
  - Acknowledge üzenetek
  - CSMA-CA használata
  - CRC használata
  - Titkosítás lehetősége: adatbiztonság
- Adatátvitel típusa függ a topológiától
  - Csillag topológia: csak PAN coordinator-rel lehet kommunikálni
  - Peer-to-peer topológia: mindenki kommunikálhat a hatótávolságon belüli node-okkal

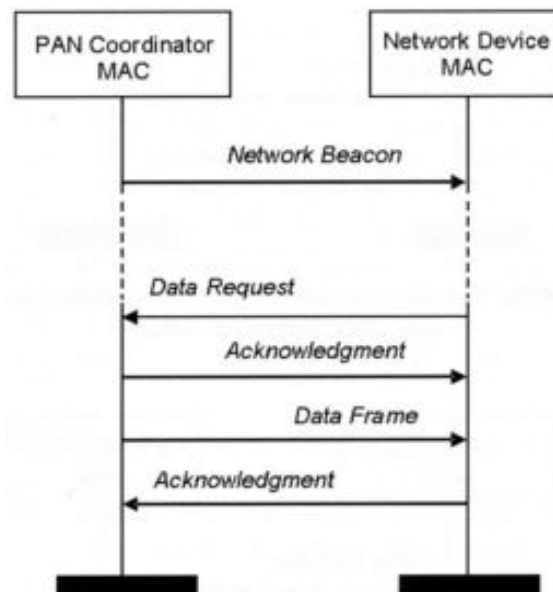
# Csillag topológia, beacon-enabled mód

- A küldő node vár a beacon üzenetre
- Ha GTS van rendelve a node-hoz, akkor vár a megfelelő GTS-re (CFP szakasz)
- Ha nincsen GTS rendelve az eszközhöz, akkor CSMA-CA módszerrel ad a CAP szakaszban
- A sikeres vételt követően a PAN coordinator acknowledge üzenetet küld



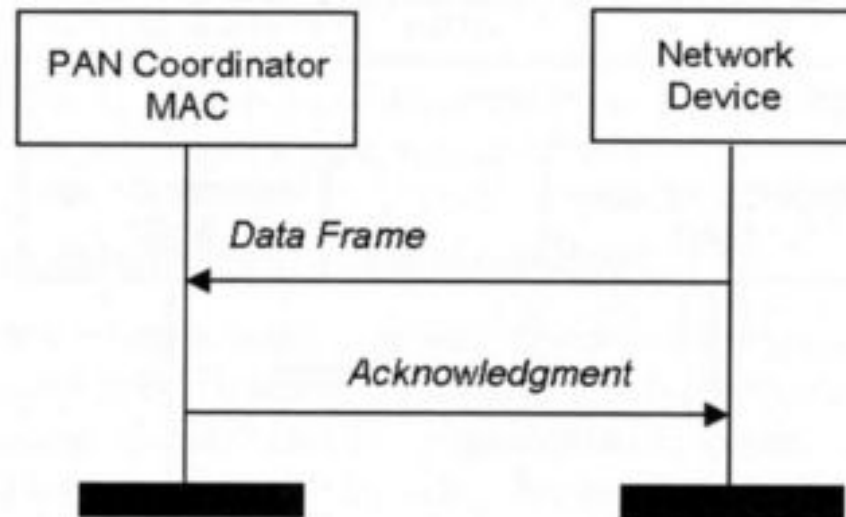
# Csillag topológia, beacon-enabled mód

- Adatküldés a PAN coordinator-tól node felé
  - Ha a PAN coordinator-nak van függő üzenete valamelyik node felé, akkor azt jelzi a beacon üzenetben
  - A címzett node data request üzenetet küld (a többi node inaktív állapotba mehet)
  - Acknowledge üzenetet követően elküldi az adatot
  - A címzett node acknowledge-al válaszol



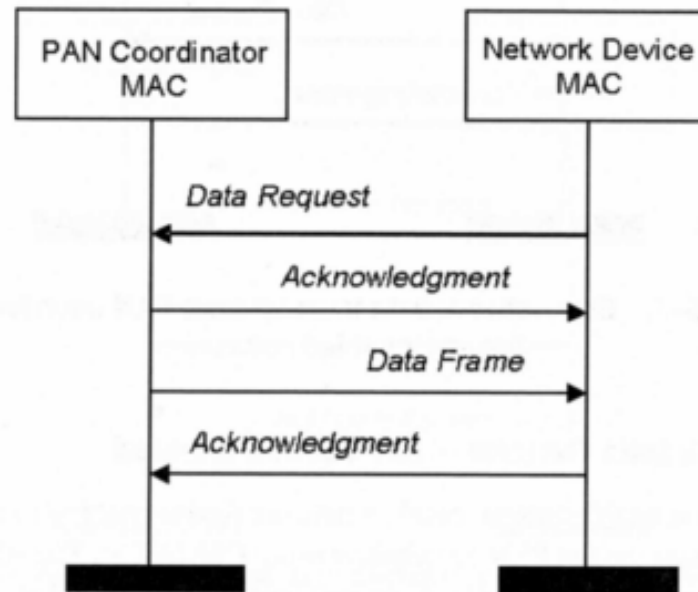
# Csillag topológia, non-beacon-enabled mód

- Adatküldés a hálózat felől a PAN kordinátorhoz
  - CSMA-CA segítségével a node adatot küld a PAN coordinator felé
  - Acknowledge csomaggal válaszol a PAN coordinator



# Csillag topológia, non-beacon-enabled mód

- PAN coordinator küld egy node-nak
  - A coordinator vár, míg data request üzenetet nem küld az adott node
  - Acknowledge üzenetet küld a coordinator melyben elküldi, hogy van-e függő üzenet
  - Ha van függő üzenet, akkor egyből küldi az üzenetet
  - A címzett node acknowledge üzenetet küld



# Peer-to-peer topológia

- Minden eszköz kommunikál minden eszközzel
- A szabvány nem korlátozza részleteiben a kommunikáció folyamatát
- Szinkronizálatlan kommunikáció során unslotted CSMA-CA használható
- Működések összehangolása magasabb szintek feladata
  - Folyamatos csatornafigyelés
  - Egységek szinkronizálása

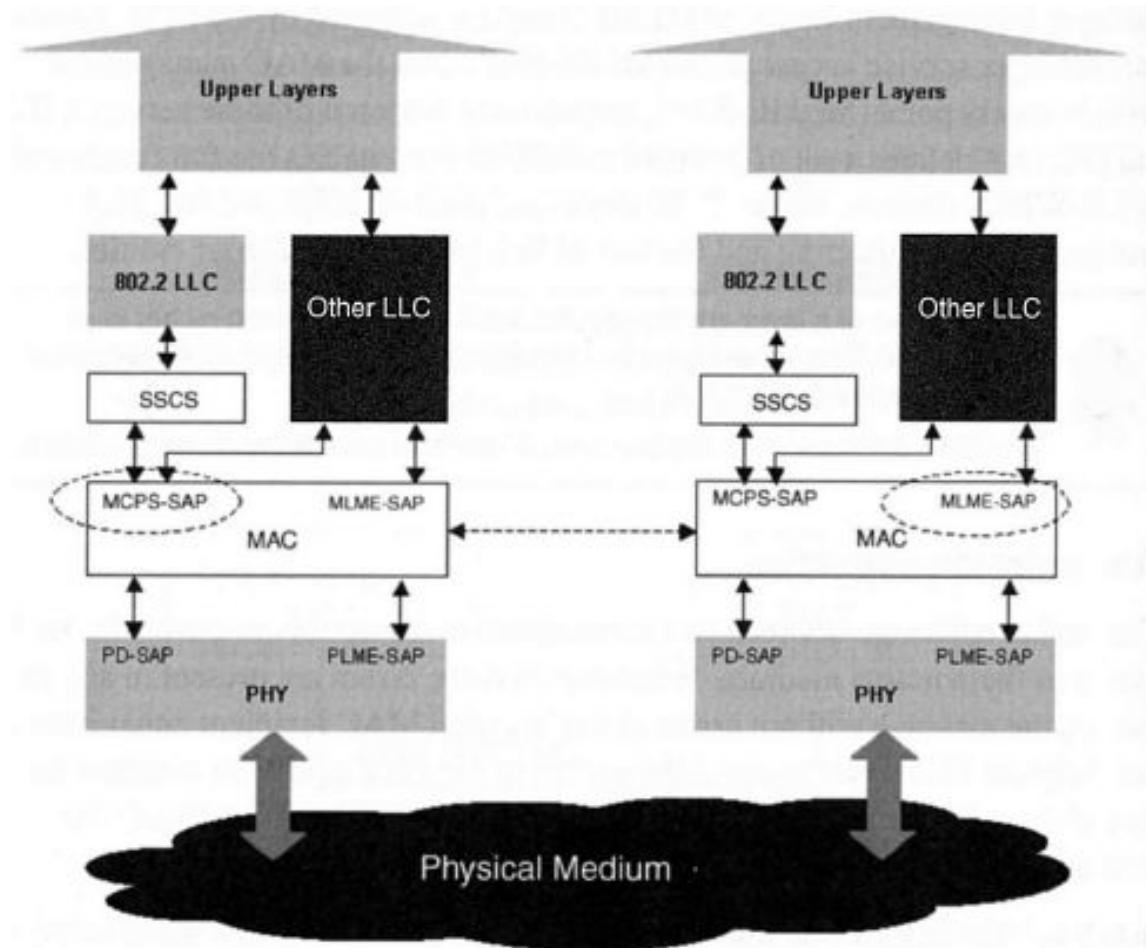
# MAC szolgáltatások

- Két alapvető funkció
  - Adattovábbítás: MAC Common Part Sublayer (MCPS)
    - Hozzáférési pont: MCSP-Service Access Point (MCPS-SAP)
  - MAC menedzsment: MAC subLayer Management Entity (MLME)
    - Hozzáférési pont: MAC subLayer Management Entity Service Access Point (MLME-SAP)
- Az IEEE 802.15.4. szabvány definiálja a megfelelő primitíveket a funkciók végrehajtásához
  - Magasabb rétegek ezen primitívek segítségével építhetik fel a bonyolultabb funkciókat



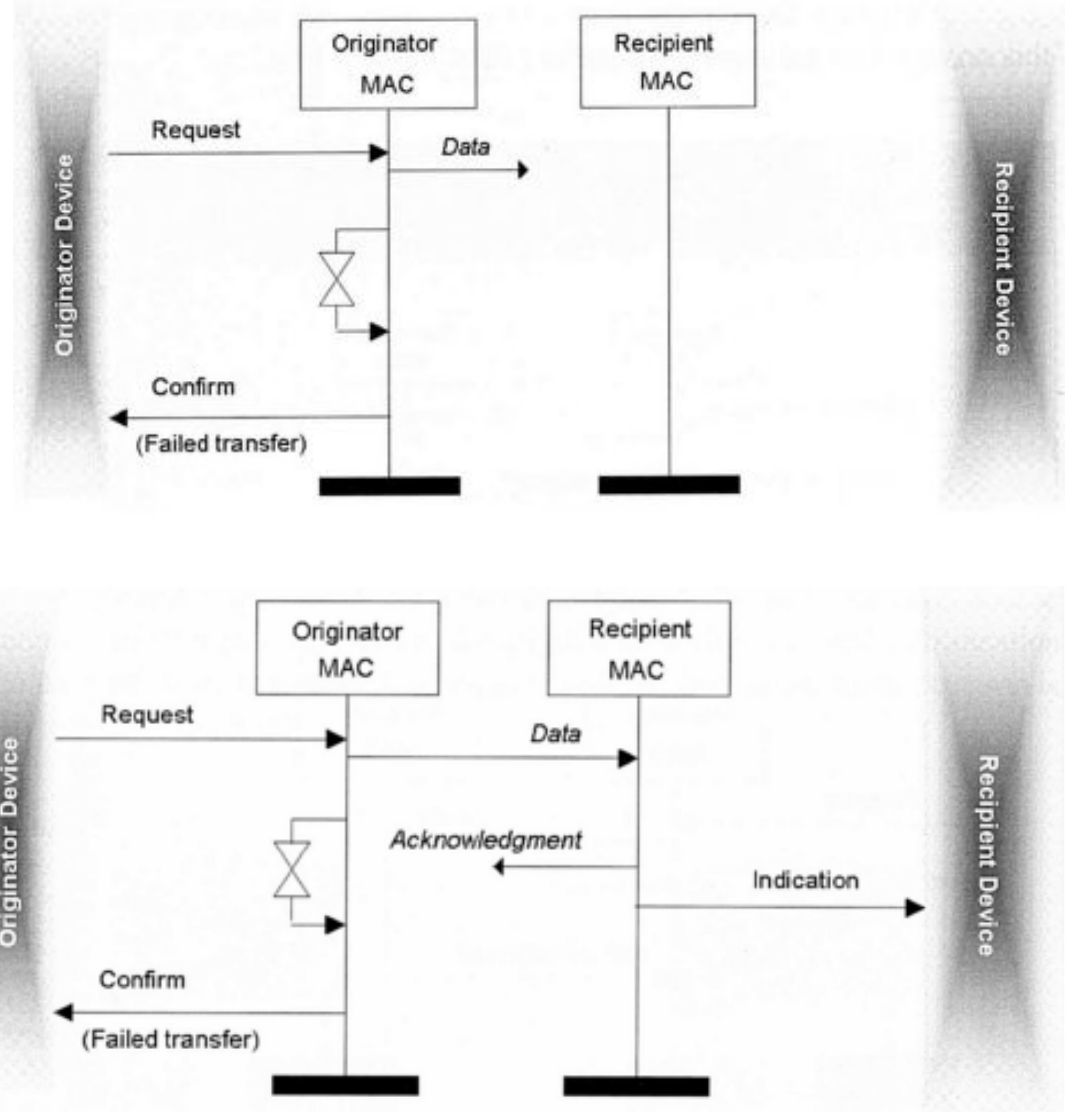
# IEEE 802.15.4 felépítése, MAC szerepe

- MCPS-SAP
  - Adatcsere felsőbb rétegekkel
- MLME-SAP
  - Kommunikációs beállítások
  - Rádió beállítások
  - Hálózat irányítása



# Adatátvitel (felsőbb szintek szempontjából)

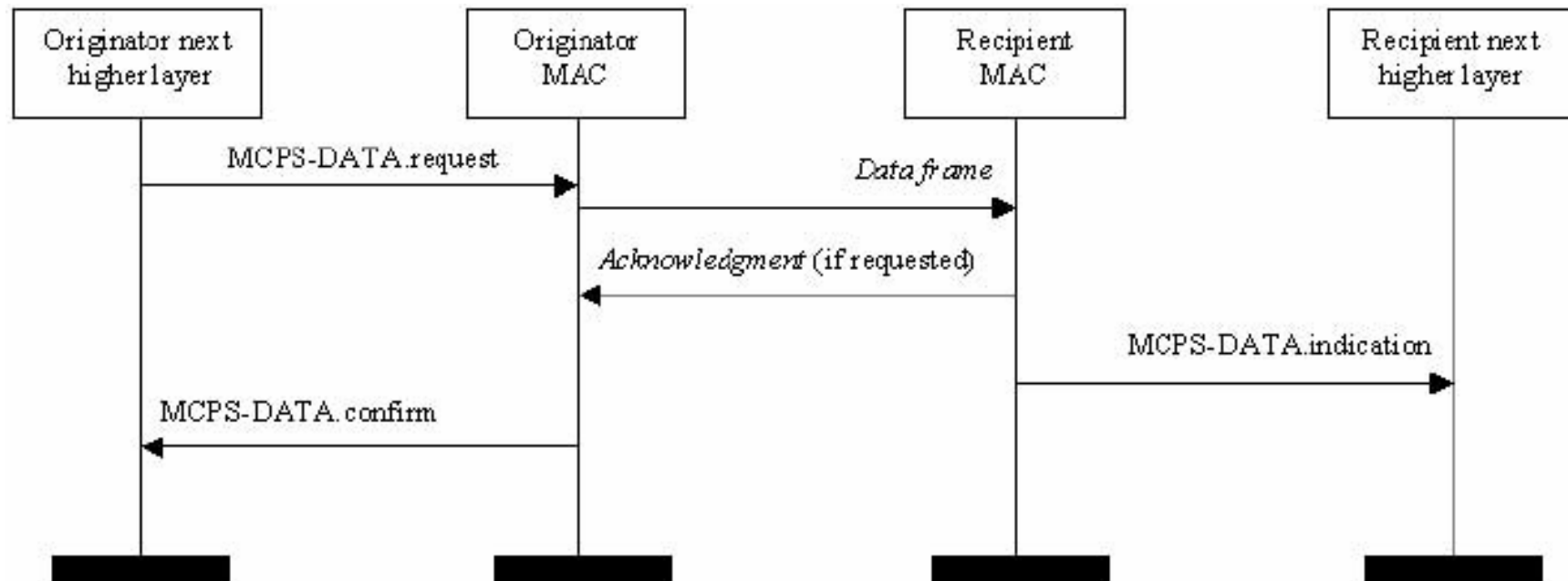
- Sikeres adatátvitel: időkorlát letelte előtt acknowledge érkezik
- Sikertelen adatátvitel: többszöri adatátvitel kezdeményezés és timeout letelte után felsőbb réteg értesítése a sikertelen átvitelről
- Sikertelen acknowledge vétel esetén a felsőbb szintek feladata a többszöri adatküldés lekezelése



# MAC adatátvitel

- Adatátviteli primitívek: data.request, data.confirm and data.indication (data.response: nincsen információ, hogy feldolgozták-e az üzenetet)
- Különböző címzési üzemmódok
  - Egyszerű implementáció
  - Felsőbb szintekről beállítható, hogy milyen címzési adatok jelenjenek meg az üzenetekben
  - Alapértelmezésként 64 bites címzés, de lehetséges 16 bites short address alkalmazása
- Rendelkezésre állnak a MAC réteg FIFO-ját kiürítő parancsok:
  - MCPS-PURGE.request
  - MCPS-PURGE.confirm

# MAC réteg adatátvitel



# MAC réteg vezérlési utasítások

- Kommunikációs beállítások, rádió beállítások, hálózatüzemeltetési beállítások (hálózatkeresés, csatlakozás, leválás, GTS kezelés, beacon üzenetek kezelése)
- Vannak opcionális primitívek azért, hogy kis erőforrással rendelkező eszközökön is implementálni lehessen

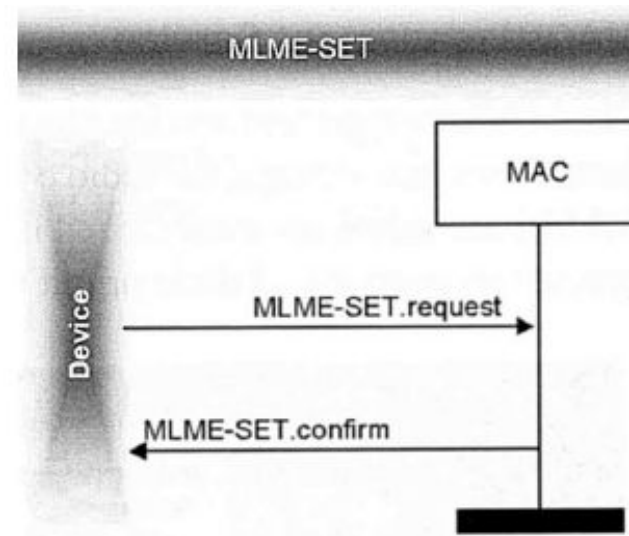
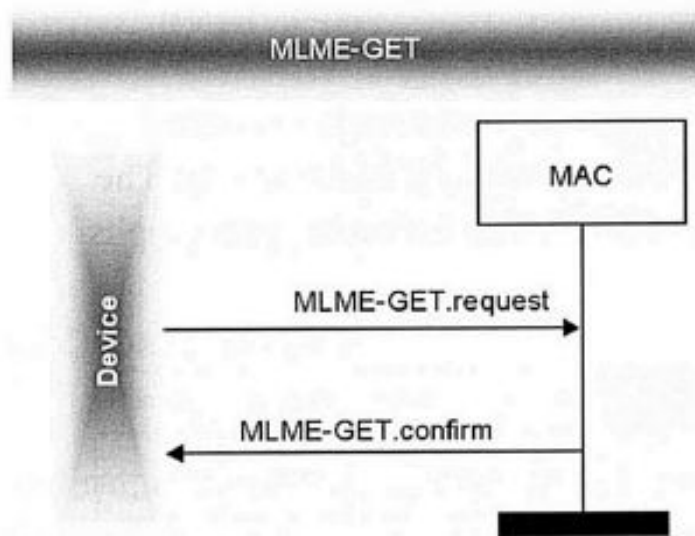
Primitive	Category	Description	Request	Confirm	Response	Indication
GET	Communication setting	MAC PAN information base management	x	x		
SET			x	x		
RESET			x	x		
RX-ENABLE	Radio control	Enables/disables radio	x	x		
SCAN		Scan radio channels	x	x		

# MAC réteg vezérlési utasítások

Primitive	Category	Description	Request	Confirm	Response	Indication
ASSOCIATE	Networking	Association control with a network coordinator	x	x	x	x
DISASSOCIATE			x	x		x
GTS		GTS management	x	x		x
ORPHAN		Orphan management			x	x
SYNC		Control of device synchronization with network coordinator	x			
SYNC-LOSS						x
START		Beacon management	x	x		
BEACON -NOTIFY						x
POLL		Synchronization in non-beacon enabled mode	x	x		
COMM -STATUS		Communication status				x

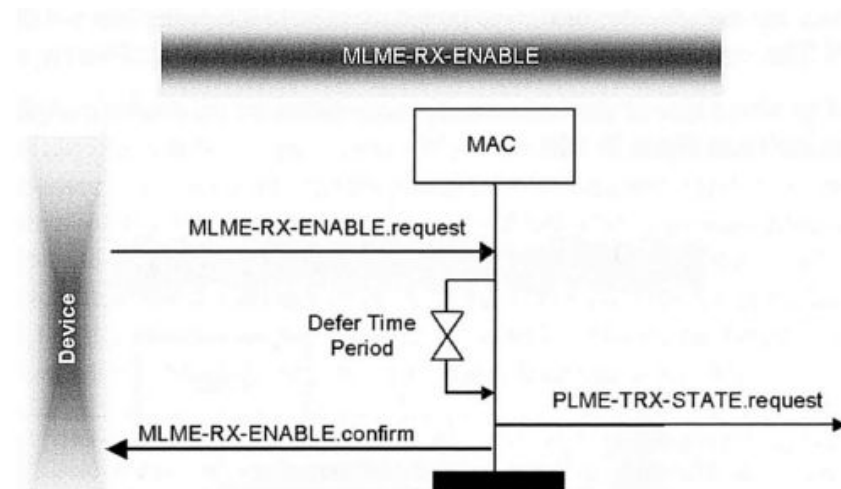
# MAC vezérlő primitívek

- MAC attribútumok írása és olvasása SET és GET primitívek segítségével történik
- Attribútumok például:
  - Keretbeállítás (Superframe struktúra)
  - Maximális adathossz
  - Kommunikációs timeout értékek
  - Acknowledge request
  - CSMA beállítások
  - PAN ID, short/long address



# Rádió engedélyezése / tiltása

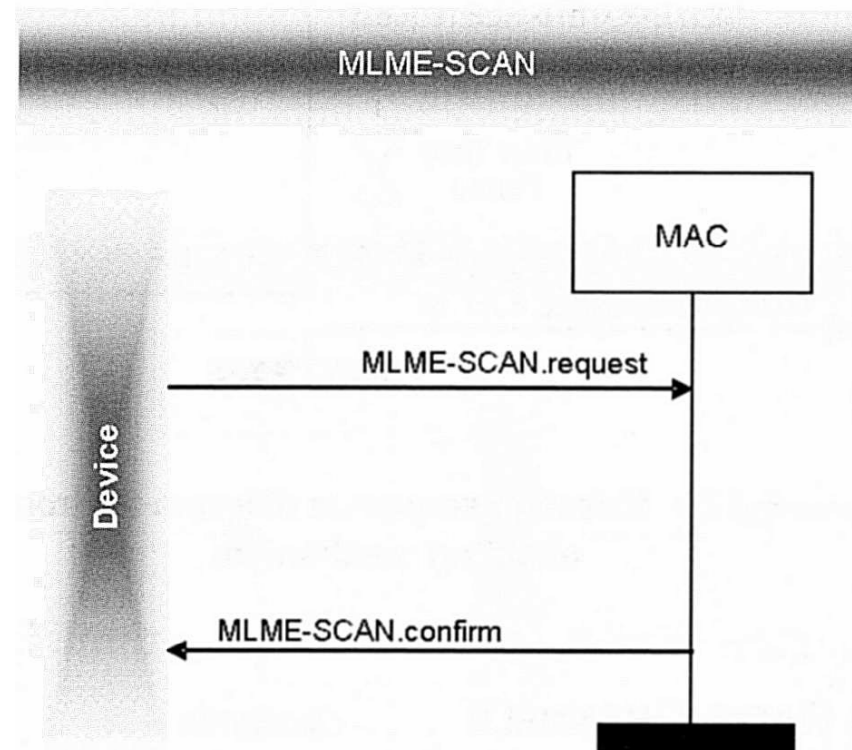
- Rádió ki- / bekapcsolása MLME-TRX-STATE primitív segítségével
- Extra funkcionalitás a fizikai réteghez képest:
  - Azonnali/késleltetett kapcsolás
    - A beacon üzenetekhez képest időzíthető alvás/ébredés
  - Aktív/inaktív állapot hosszának beállítása





# Csatornafelderítés (scan)

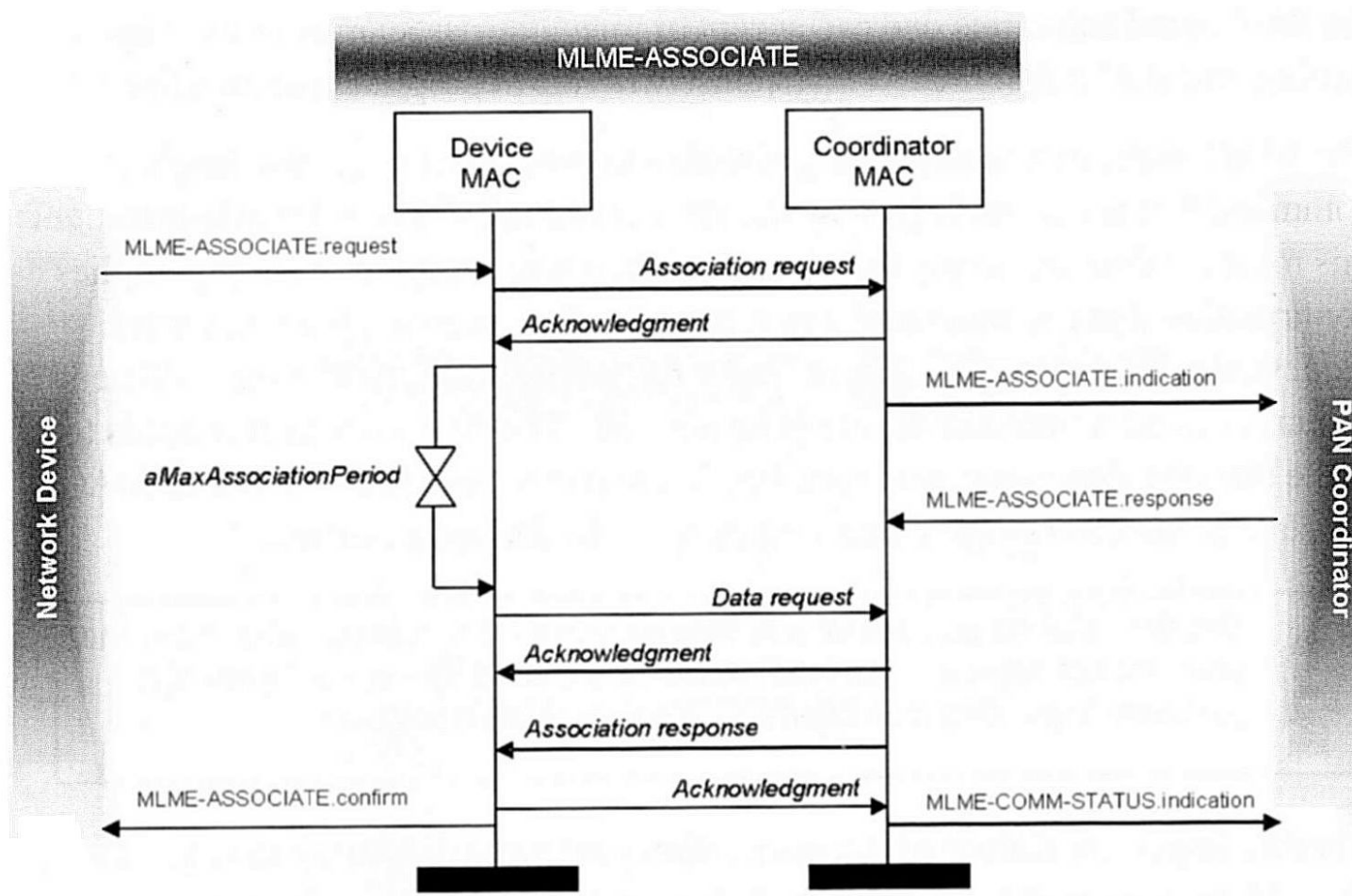
- MLME-SCAN primitív segítségével
- Cél: a hatótávolságon belül található eszközök felderítése
- Energiadetekción alapuló
  - A PLME-ED primitív segítségével megvizsgálja a MAC réteg az egyes csatornában található jelteljesítményt
- Aktív scan
  - A hatótávolságon belül sugárzott beacon üzeneteket keresi az eszköz. Az eszköz beacon request üzenetet küld. Ennek hatására a PAN coordinator (és leendő PAN coordinator) beacon üzenetet küld
- Passzív scan
  - Beacon üzenetek figyelése beacon request üzenet küldése nélkül.
- Aktív scan és orphan scan műveleteket minden eszköznek támogatnia kell
- Amennyiben a kapcsolatot elvesztését érzékeli egy eszköz, orphan (árva) státuszba kerül



# Hálózathoz csatlakozás

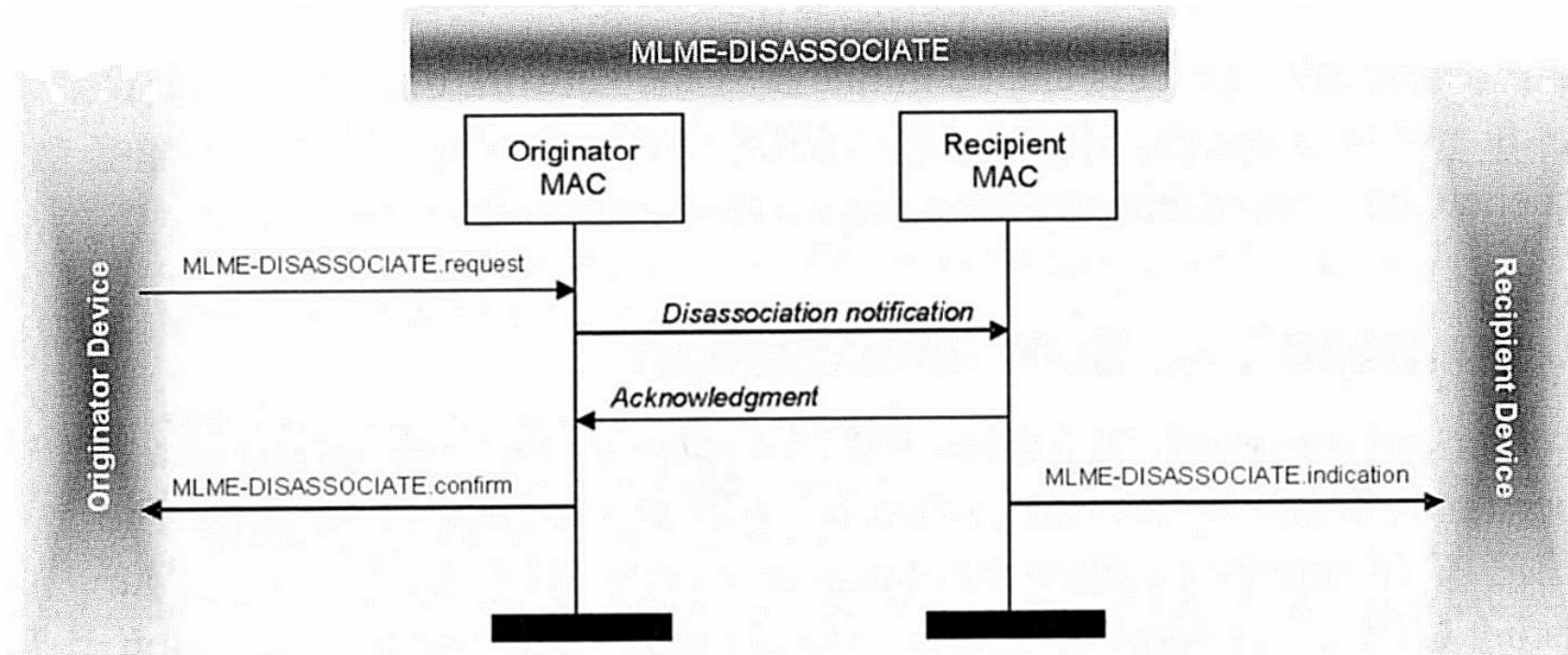
- Sikeres csatorna letapogatást (scan) követően csatlakozási kérést (MLME.ASSOCIATE.request) adhat ki az eszköz
- A PAN coordinator acknowledge-el jelzi az üzenet vételét, és ellenőrzi, hogy van-e elég erőforrás az új eszköz fogadásához
- A döntéshez *aMaxAssociationPeriod* idő áll rendelkezésre, ellenkező esetben a kérő eszköz timeout-ot kap
- Az új eszköz 16 bites címet kérhet a PAN coordinator-tól a 64 bites címe helyett
- A PAN coordinator MLME.ASSOCIATE.response üzenetet küld, ha a csatlakozás engedélyezett
- A PAN coordinator szerepe csatorna letapogatást követően nem definiált a 802.15.4. –es szabványban. Ez felsőbb szintek feladata.

# Hálózathoz csatlakozás



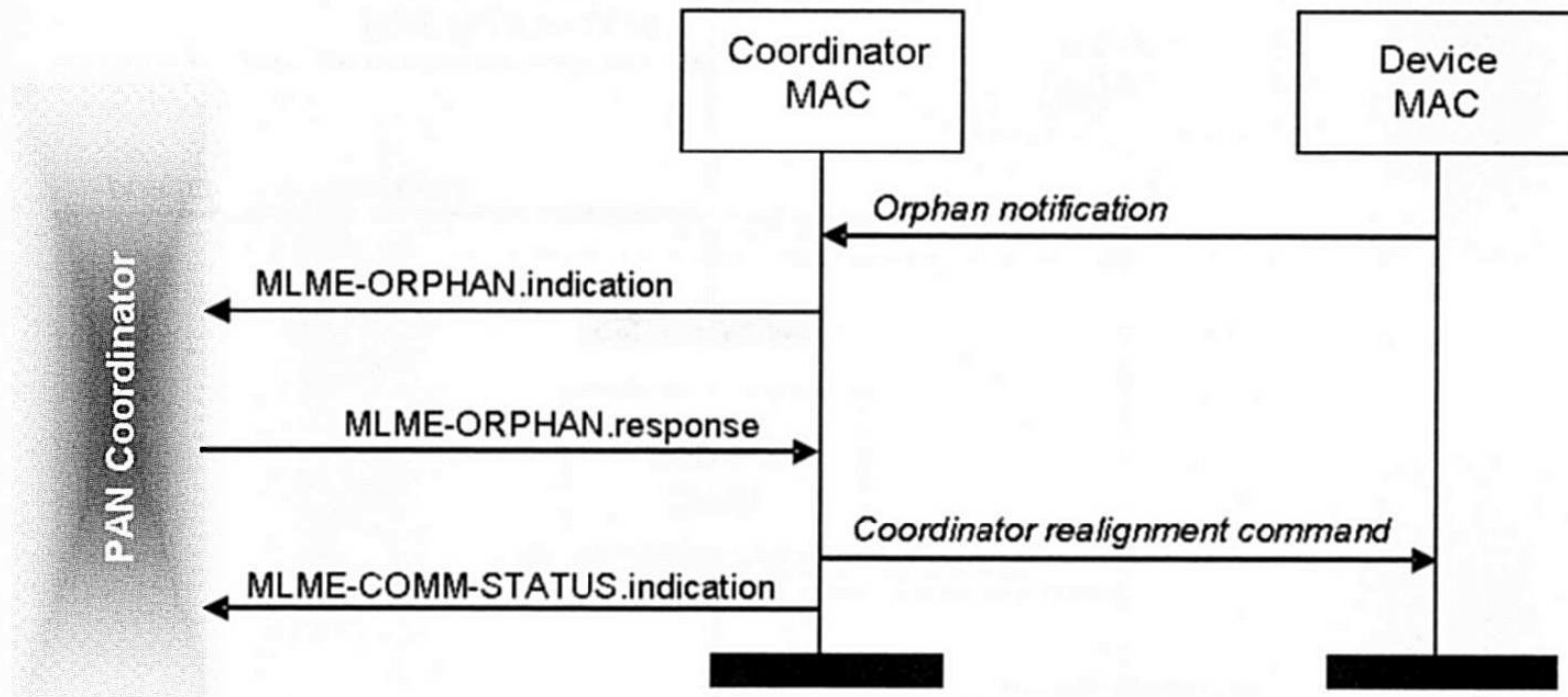
# Hálózatról történő leválás

- A PAN coordinator és az érintett eszköz is kezdeményezheti a leválást a hálózatról MLME-DISASSOCIATE.request üzenettel.



# Orphan (árva) eszközök kezelése

- Ha egy eszköz elveszíti a kapcsolatot a PAN coordinatorral, akkor *orphan channel scan* műveletet hajt végre a MLME-SCAN primitív segítségével
- A fogadó MAC szintje MLME-ORPHAN.indication primitívvel jelez a következő szint felé az új eszköz létezéséről
- A hozzárendelés végeredményéről MLME-ORPHAN.response primitív segítségével küld értesítést



# GTS menedzsment

- Emlékeztető: GTS (Guaranteed Time Slot) a determinisztikus adatátvitelt szolgáló átviteli lehetőséget nyújt
- MLME-GTS primitív:
  - Új GTS kiosztás
  - Meglévő GTS megszüntetése
  - GTS újraosztása a széttördelődés elkerülésére
- Maximum 7 GTS osztható ki egy superframe-en belül
- GTS kiosztás kezdeményezhető a PAN coordinator és bármely eszköz által
- GTS kérés esetén:
  - A PAN coordinator ellenőrzi, hogy van-e szabad GTS
  - A PAN coordinator az új beacon üzenetben megadja az allokált GTS azonosítóját
  - Ha nincsen kiosztható GTS, akkor a PAN coordinator visszautasítja a kérést
  - A GTS hozzárendelés a MLME-GTS.confirm primitív meghívásával történik, mely tartalmazza a szükséges információt
  - A slot-ok kiosztása a kérések sorrendje alapján történik

## GTS leíró struktúra

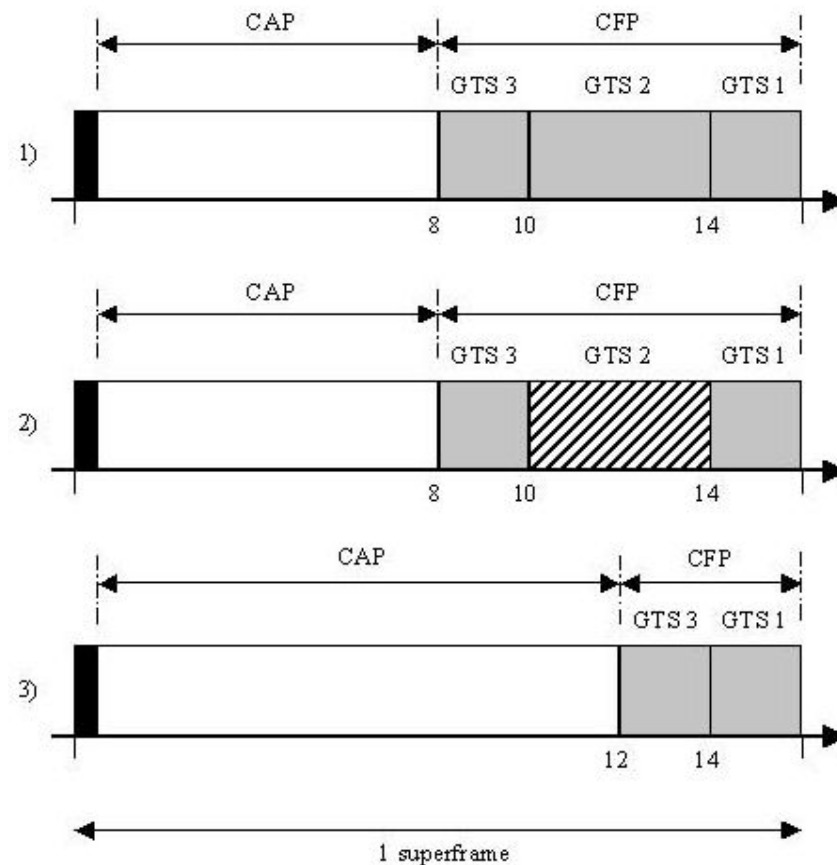
- GTS length: hány GTS slotot igényel
- GTS direction: adás/vétel
- Characteristics type: allokáció / deallokáció

bits: 0–3	4	5	6–7
GTS length	GTS direction	Characteristics type	Reserved

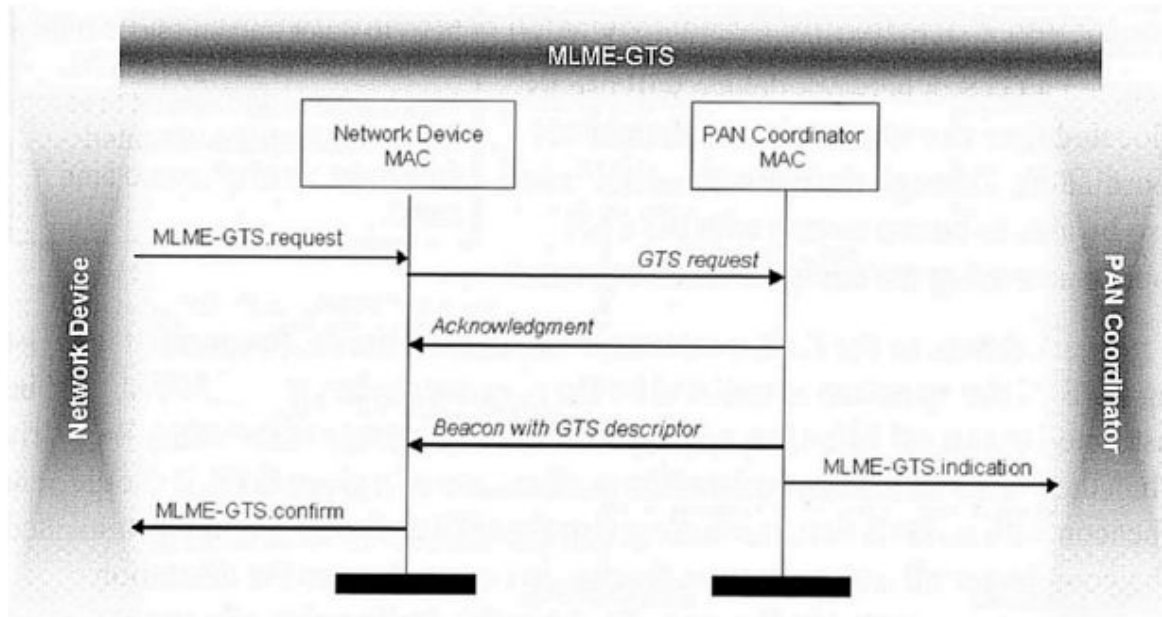
# GTS menedzsmment

- Ha egy eszközhöz GTS-t rendeltünk, az adhat a CAP szakasz közben is
- GTS jellemzői: kezdő slot és hossz, irány, hozzárendelt eszköz ID
- A GTS deallokációt kezdeményezheti a PAN coordinator vagy az érintett eszköz
- Ha egy eszköz elveszíti a szinkronizációt a PAN coordinator-ral, akkor a hozzá rendelt GTS-ek felszabadulnak
- A GTS allokáció és deallokáció következtében töredezetté válhat a CFP szakasz. Ekkor a PAN coordinator újraoszthatja a GTS-eket
- GTS automatikus deallokációja
  - Az eszköz adott időn belül nem küldött üzenetet
  - Nem jött acknowledge üzenet az eszköztől adott időn belül

## Töredezett CFP

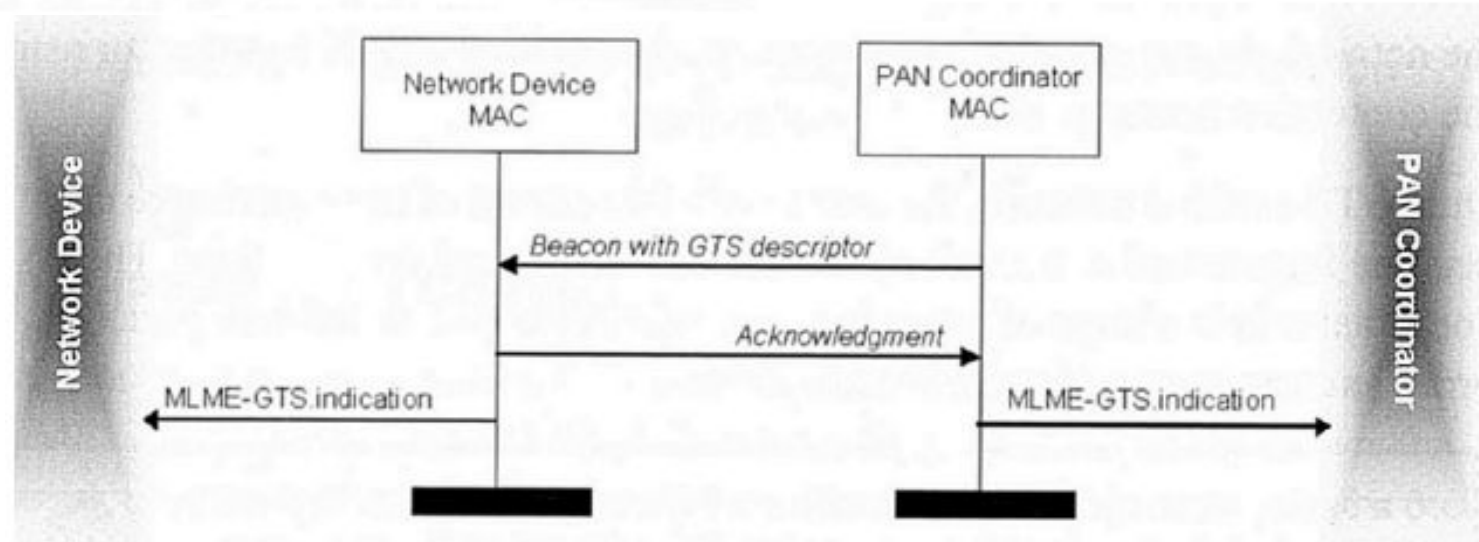


# GTS hozzárendelés folyamata



Eszköz  
kezdeményez

PAN coordinator  
kezdeményez

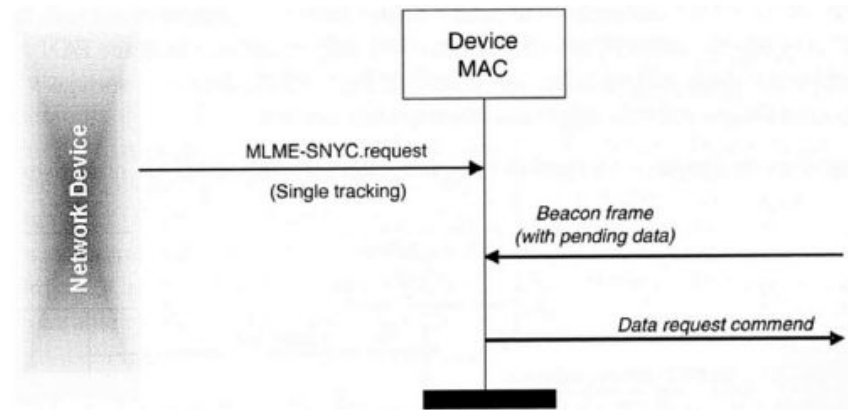




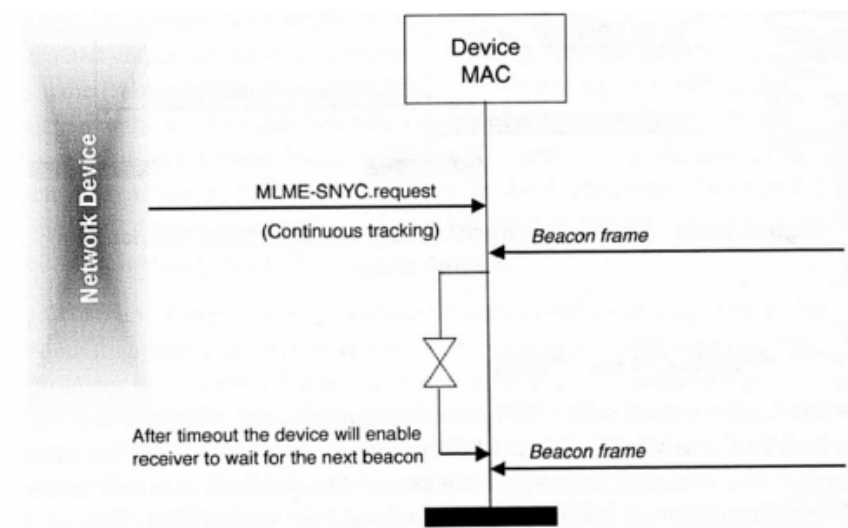
# Szinkronizáció kezelése

- Magasabb szint küldi az adott eszköz MAC szintjének
- Adott csatornán beacon üzenet keresése, és ha engedélyezve van, akkor a további beacon üzenetek követése
- A MLME-SYNC primitív a beacon üzenetek keresésére szolgál (beacon-enabled mód), illetve függő adat lekérdezésére a PAN coordinator-tól (non-beacon-enabled mód)
- Ha nem sikerül a szinkronizáció (beacon keresése és követése), akkor ezt a MLME-SYNC-LOSS.indication primitívvel jelzi

## Egyszeri beacon keresés



## Folytonos beacon követés

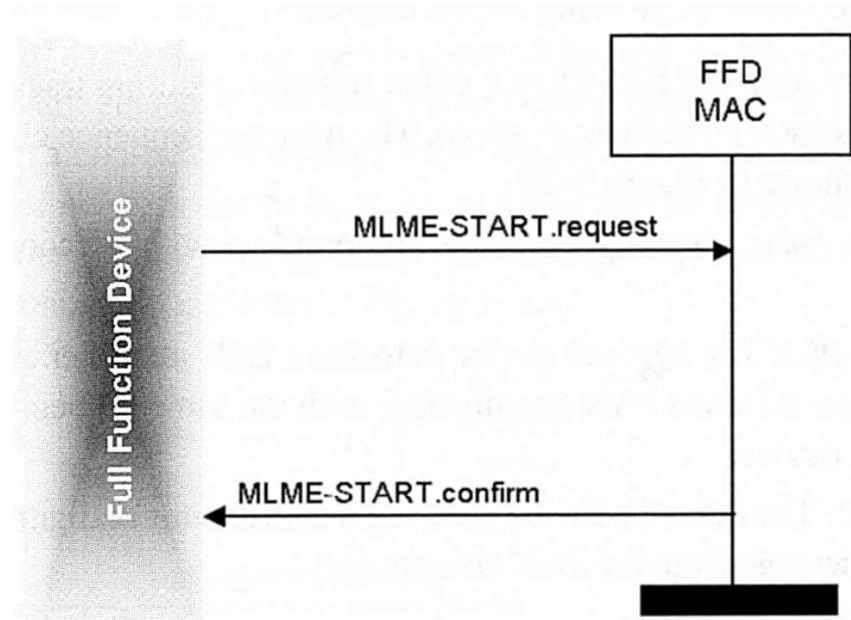


# Elveszített szinkronizáció

- MLME-SYNC-LOSS.indication primitívvel jelzi egy eszköz MAC szintje egy felsőbb szint felé
- Kiváltó események
  - Beacon üzenet hiánya: nem talált beacon üzenetet az eszköz legalább *aMaxLostBeacons* alkalommal
  - PAN coordinator elvesztése
    - Nem válaszol a PAN coordinator
  - PAN ID ütközés
    - Több, azonos ID-val rendelkező PAN coordinator található a rendszerben
  - Újrarendezés
    - A PAN coordinator

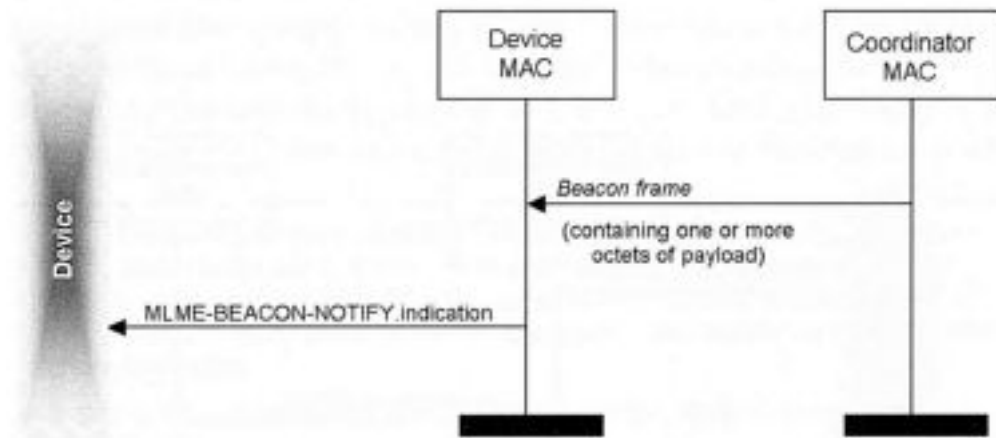
# Beacon menedzsment

- A beacon üzenetek sugárzása az MLME-START primitív segítségével történik
- MLME-START primitív paraméterei
  - Az eszköz PAN coordinator-nak való kinevezése és PAN ID beállítása
  - Csatorna kiválasztása
  - Beacon periodicitás beállítása
  - Superframe paramétereinek beállítása
- A folyamat a MLME-START.confirm primitív segítségével történik



# Beacon üzenetek kezelése

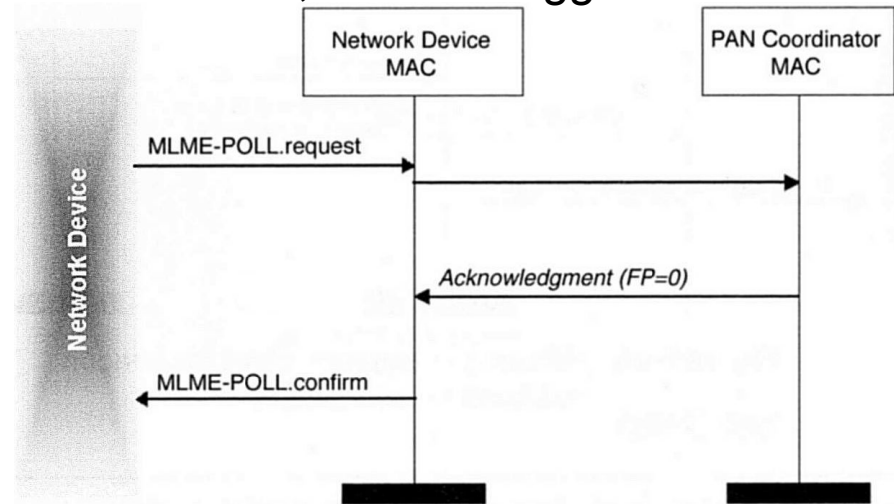
- A MAC réteg értelmezi a beacon üzeneteket
- Ha a beacon üzenet tartalmaz hasznos adatot, akkor azt a MLME-BEACON-NOTIFY.indication primitív segítségével küldi tovább a MAC szint a fölsőbb szintekhez
- Amennyiben a címzett listában van egy eszköz, akkor *data request* üzenetet küld a PAN coordinator felé



# Beacon nélküli szinkronizáció

- Beacon nélküli hálózat esetén MLME-POLL primitív segítségével kéri le egy eszköz a PAN coordinator-tól a függő adatokat
- A PAN coordinator a MLME-POLL.confirm primitív segítségével küldi el az adatokat

Adatlekérdezés, nincsen függő adat



Adatlekérdezés, van függő adat

