

IEEE 802.15.4. fizikai réteg ismertetése

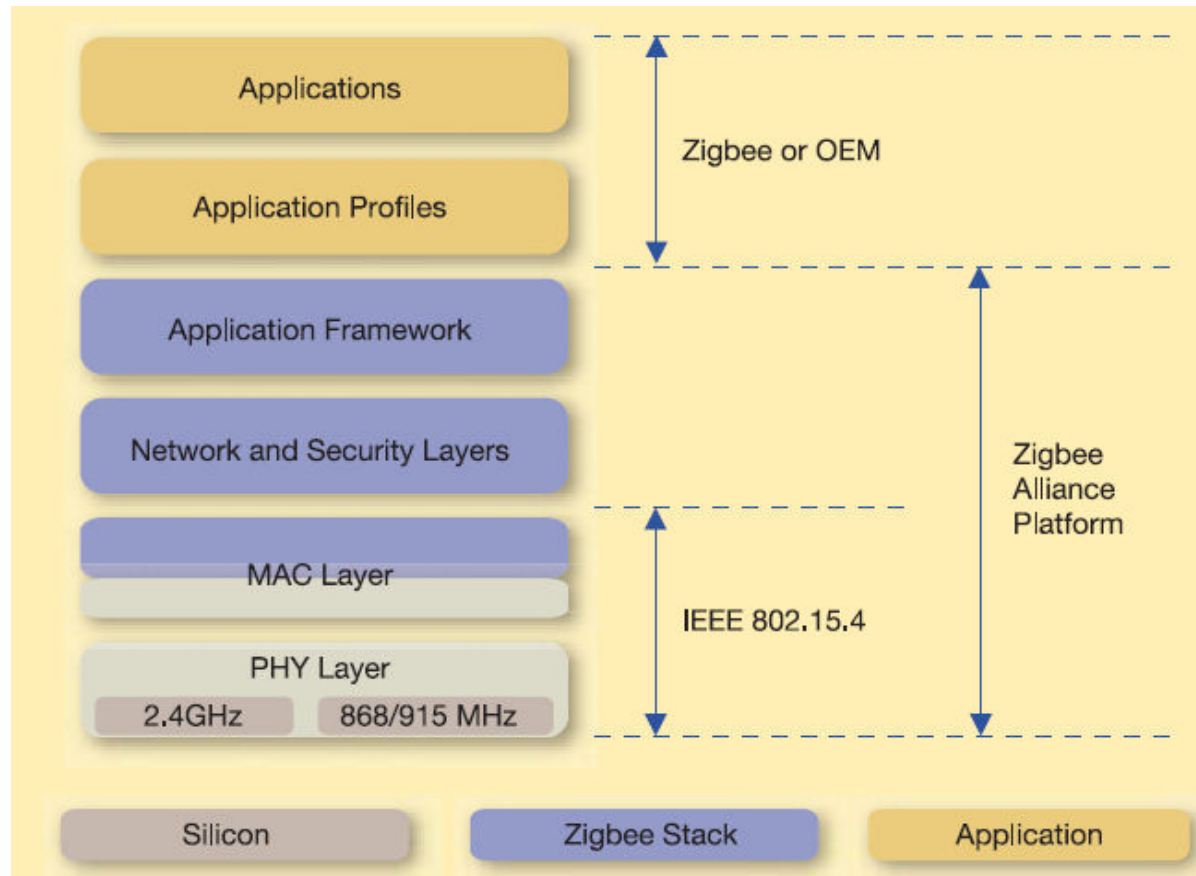
Orosz György
2011.

Forrás: Dr. Kolumbán Géza
előadásanyagai

IEEE 802.15.4 fizikai réteg

- IEEE 802.15.4: LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Network)
- Fizikai réteg feladatai
 - Rádiós adás és vétel
 - Rádiófrekvenciás (RF) egység aktiválása/tiltása
 - RF energia detektálása (ED: Energy Detection)
 - Összeköttetés minőségének ellenőrzése (LQI: Link Quality Indication)
 - Csatornafoglaltság figyelése (CCA: Clear Channel Assessment) a CSMA-CA megvalósításához
 - Rádiós csatorna kiválasztása
- Specifikáció kialakításának szempontjai
 - Egyszerű implementáció
 - Kis számú külső alkatrész igény
 - Kis méret
 - Alacsony fogyasztás
 - Alacsony ár

Rendszerszintű áttekintés



Definíciók

- SDU (Service Data Unit) : egy felsőbb rétegtől kapott adatcsomag. Ez a nyers adat az adott szinten.
- PDU (Protocol Data Unit): egy felsőbb szintről kapott SDU kiterjesztve az adott szinthez tartozó információkkal
- Példa: SDU szint 2 = PDU szint 1



Hardver specifikációk

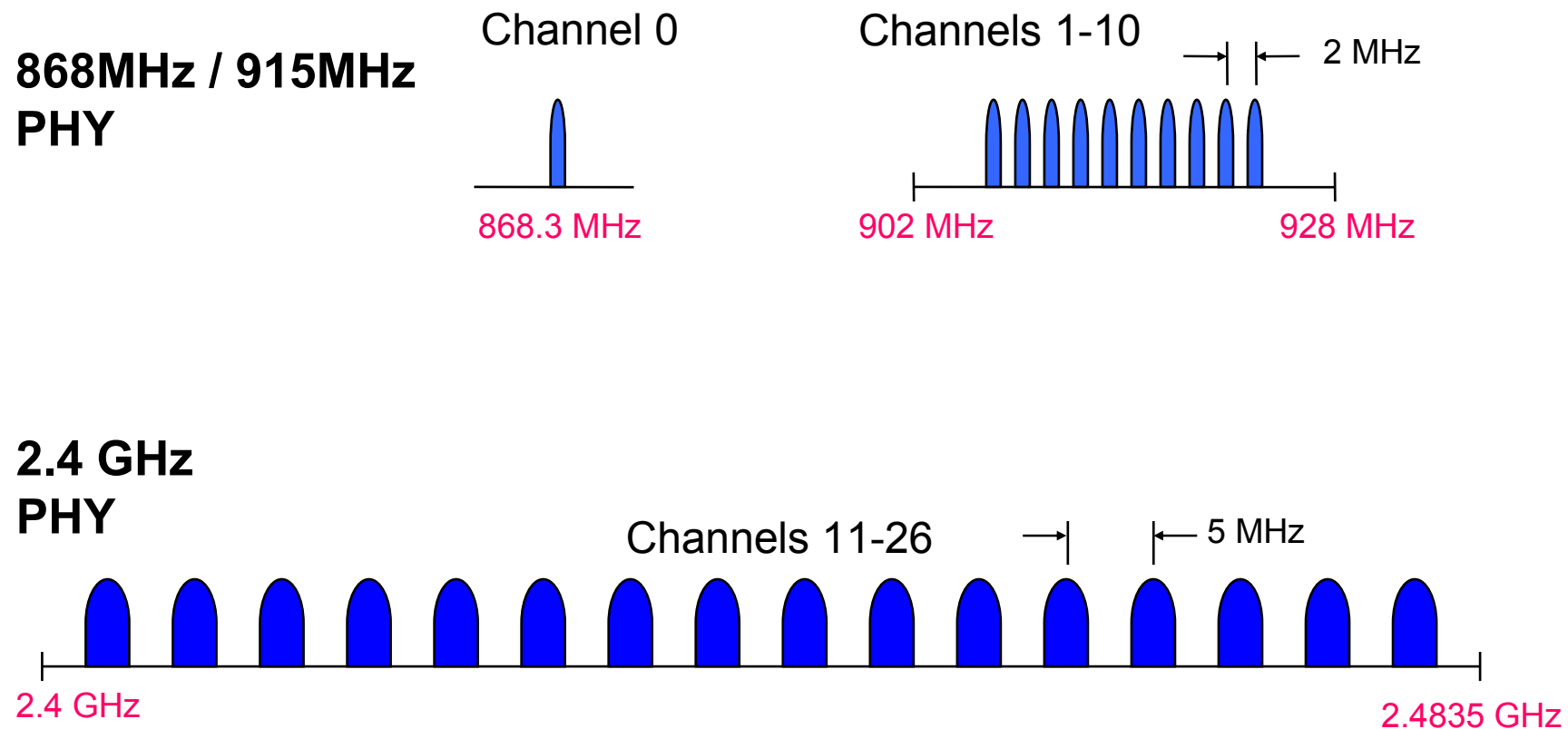
- ISM (Industrial, Scientific, and Medical) sávok használata
- FONTOS: ezek a sávok világszerte vagy nagyobb régióként szabad felhasználású sávok, nem kell jogdíjakat fizetni, így az eszközöket nem terheli a frekvenciafoglalás költsége
 - A szabad felhasználásból következően viszont számítani kell egyéb felhasználókra is

Frequency band	Region	Frequency band covered	Null-to-null RF bandwidth $BW = 2B = 2R_{chip}$
868 MHz	Europe, ETSI	868-868.6 MHz	600 kHz
915 MHz	USA, FCC	902-928 MHz	1.2 MHz
2450 MHz	Worldwide	2400-2483.5 MHz	2 MHz

Frequency band	Center frequency (MHz)	Channel number	Spacing
868 MHz	868.3	$k = 0$	na
915 MHz	$906 + 2(k - 1)$	$k = 1, \dots, 10$	2 MHz
2450 MHz	$2405 + 5(k - 11)$	$k = 11, \dots, 26$	5 MHz

Hardver specifikációk

- Rádiócsatorna hozzárendelés, kiosztás és számozás



Hardver specifikációk

- Adóteljesítmények specifikálása
- Minimálisan -3 dBm-es teljesítmény megkövetelt
 - $\text{dBm} = 10 \cdot \log_{10}(P/P_0)$, ahol $P_0 = 1\text{mW}$
 - $1\text{dBm} = 1\text{mW}$
- Maximális adóteljesítmény:

Frequency band	Region	Maximum transmit power or radiated field limit
868 MHz	Europe	25 mW Duty cycle must be less than 1 % (Recall: Only one channel is available)
915 MHz	USA	1000 mW
2450 MHz	Europe	100 mW Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) or 10 mW/MHz peak power density
	USA	1000 mW

Hardver specifikációk

- 868MHz-es sávban az igazságos csatornakiosztást az adási idő és kitöltési tényező korlátozásával oldják meg

Parameter	Specification	Comment
Carrier frequency	868.0–868.6 MHz	
Transmit power	25 mW ERP maximum	
Transmit duty cycle	< 1%	In any 1 h period
Maximum TX on time	3.6 s	Advisory only as per Appendix 1 of ERC 70-03E.
Minimum TX off time	1.8 s	Advisory only as per Appendix 1 of ERC 70-03E.
Antenna	Integral or dedicated required	Type approved with the equipment

Hardver specifikációk

- Vevő érzékenység (viszonylag alacsony → olcsó eszközök)

Frequency band	Sensitivity
868 MHz	Better than -92 dB
915 MHz	Better than -92 dB
2450 MHz	Better than -85 dB

- Érzékenység definíciója: 20 oktet hosszúságú PSDU (Physical Service Data Unit) esetén a PER (Packet Error Rate) jobb, mint 1%
 - PSDU: MAC réteg által küldött adat. Ezt továbbítja a fizikai réteg megfelelő keretezéssel.
- Megjegyzések:
 - Maximálisan elérhető elvi érzékenység zajmentes O-QPSK moduláció esetén -109 dBm
 - A maximális érzékenységre nem érdemes törekedni a nagy interferencia miatt: egyéb eszközök is sugározhatnak a szabad sávban

Hardver specifikációk

- Csatorna szelektivitás és blokkolás (minden sávra)
- Sávok: 0...26
- Specifikációk:
 - Egy szomszédos csatorna jelére érzéketlennek kell lennie az aktuálisan használt csatornának, ha a teljesítmények megegyeznek.
 - Két csatorna távolságra lévő jelre érzéketlennek kell lennie az aktuális csatornának, amennyiben a teljesítménykülönbség maximum 30dB
 - A vevőnek alkalmasnak kell lennie legalább -20dBm teljesítményű jel vételére (ne okozzon telítést, blokkolást)
 - Enyhe követelmény
 - Nem kíván nagy dinamikatartományban lineáris erősítőt
 - Lineáris működés általában nagy munkaponti áramokat eredményez

Hardver specifikációk

- Moduláció és spektrumkiterjesztés

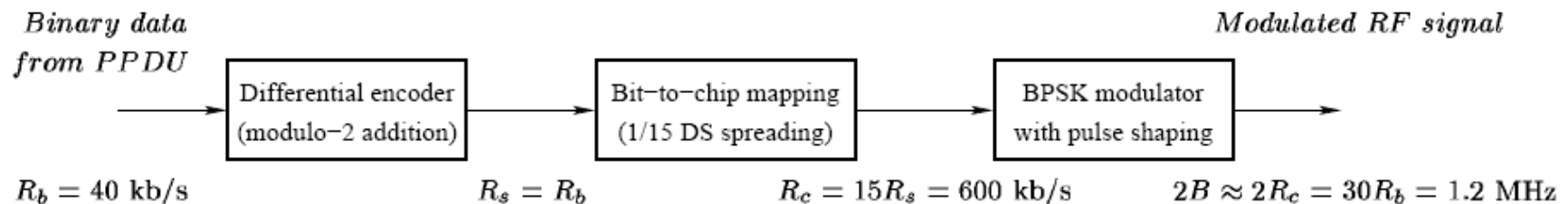
Frequency band	Modulation and spreading			Data parameters		
	Modulation	Length of PN code	Chip rate (kchip/s)	Symbols	Symbol rate (ksymbol/s)	Bit rate (kb/s)
868 MHz	BPSK	15 chips	300	Binary	20	20
915 MHz	BPSK	15 chips	600	Binary	40	40
2450 MHz	O-QPSK	32 chips	2000	16-ary Orthogonal	62.5	250

Moduláció és spektrumkiterjesztés

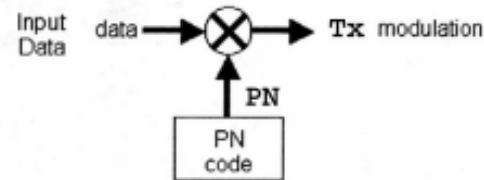
- Emlékeztető; beltéri kis hatótávolságú kommunikáció jellegzetességei:
 - Többutas terjedés
 - Reflexió, elhajlás ...
 - Többutas terjedés miatt nagy csillapítások alakulnak ki bizonyos frekvenciákon.
 - Reflexiók miatt egymást követő szimbólumok között átlapolódás jöhet létre
 - Szabad kommunikációs sávokban egyéb eszközök is kommunikálhatnak
- Főbb következtetések:
 - **Szélessávú, mesterségesen szórt spektrumú kommunikáció javasolt a nagy csillapítások elkerülése miatt**
 - **Szórt spektrumú kommunikáció kevésbé érzékeny keskenysávú zavarforrásokkal szemben**

Moduláció és spektrumkiterjesztés

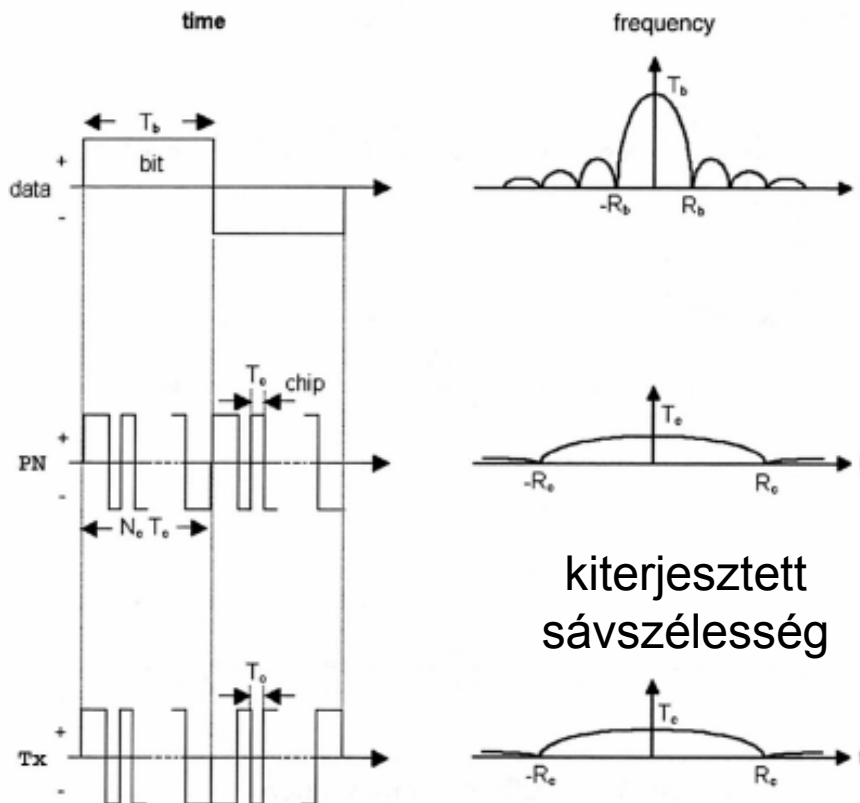
- BPSK moduláció: 868 / 915 MHz-es sávok
- Minden bit 15 chip hosszúságú pseudovéletlen (PN) sorozattá képződik le.
- **FONTOS: egy bitidő alatt 15 „bit” kisugárzása: spektrum kiszélesedik → szórt spektrumú átvitel**
 - Védelem a keskenysávú nagy csillapítások ellen
 - Védelem a keskenysávú zavarjelekkel szemben
- Példa: 915 MHz-es sáv jelfolyam diagramja



Spektrumkiterjesztés megvalósítása 868/915MHz-es sávokban



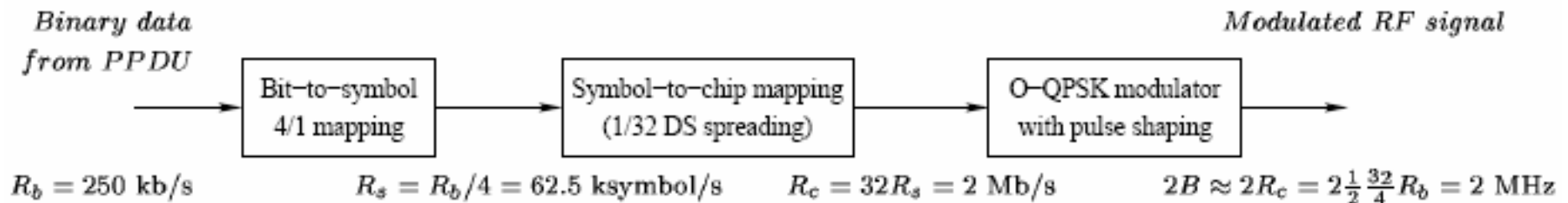
		Band	
		868 MHz	915 MHz
T_b	bit period	50 μ s	25 μ s
R_b	bit rate	20 kb/s	40 kb/s
T_c	chip period	3.33 μ s	1.66 μ s
R_c	chip rate	300 kc/s	600 kc/s
N_c	chips per symbol	15	



- Az adat egy megnövelt chip sebességgel történik
- Nagyobb chipsebesség \rightarrow kisebb chip idő
- Rövid chip idő \rightarrow kis késleltetés szórás (RMS delay spread) engedélyezett ☹️
- Egy bit több chip-ben kódolt \rightarrow robusztusság 😊
- Ortogonális PN chip szekvenciák:
 - 0bit: 111101011001000
 - 1bit: 000010100110111

Spektrumkiterjesztés megvalósítása a 2.4 GHz-es sávban

- Egy octet (8 bit) két 4 bites részre (szimbólum) történő felosztása.
- Összesen $2^4=16$ szimbólum.
- Minden szimbólumot 32 bites kvázi ortogonális PN bitsorozatra (chip) képezzük le.
- **FONTOS: egy bitidő alatt 8 bit kisugárzása: spektrum kisélesedik → szórt spektrumú átvitel**
- Modulációs forma: O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) szinuszos impulzus formálással
 - Konstans burkoló
 - A teljesítményerősítőre nézve kis linearitást kíván
 - „Sávszélesség takarékos”: nincsenek nagy ugrások a jelben



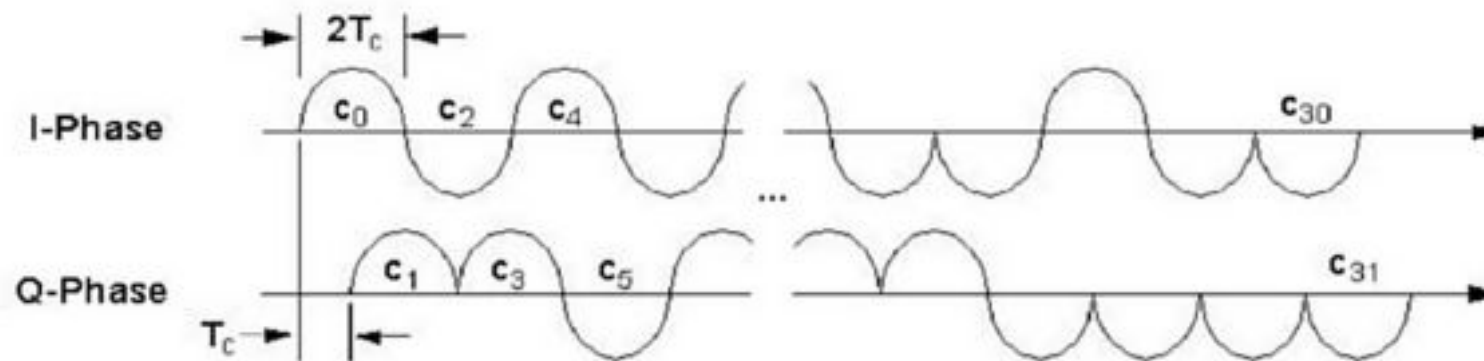
Bit – szimbólum –chip leképzés

Data symbol Binary ($b_0 b_1 b_2 b_3$)	Data symbol Decimal	Chip values ($c_0 c_1 \dots c_{30} c_{31}$)
0000	0	11011001110000110101001000101110
1000	1	11101101100111000011010100100010
0100	2	00101110110110011100001101010010
...
1111	15	11001001011000000111011110111000

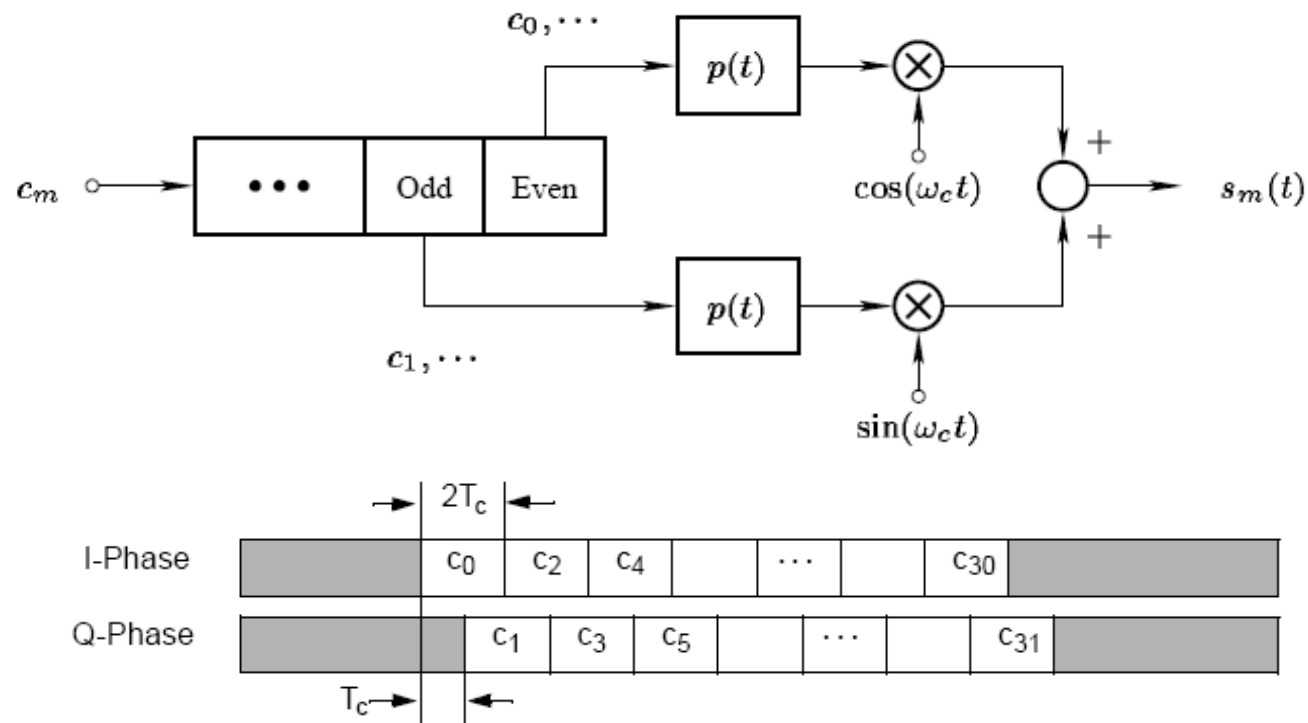
- Effektív adatátviteli sebesség: 250 kbps
- Szimbólum sebesség:
adatsebesség/4=62.5kszimbólum/sec
- Chip sebesség: 32·szimbólumsebesség=2 Mchip/sec

Linearitás és sáv szélesség követelmények enyhítése

- O-QPSK: páros és páratlan indexű chipeket használjuk fel modulálójelként (I-Q moduláció)
- Jel sáv szélessége:
 - Chip sebesség: 32-szimbólumsebesség=2 Mchip/sec= $1/T_c$
 - RF sáv szélesség: 2 MHz



- Szinuszos impulzusformálás végrehajtása a chip-eken a következő folyamatábra alapján

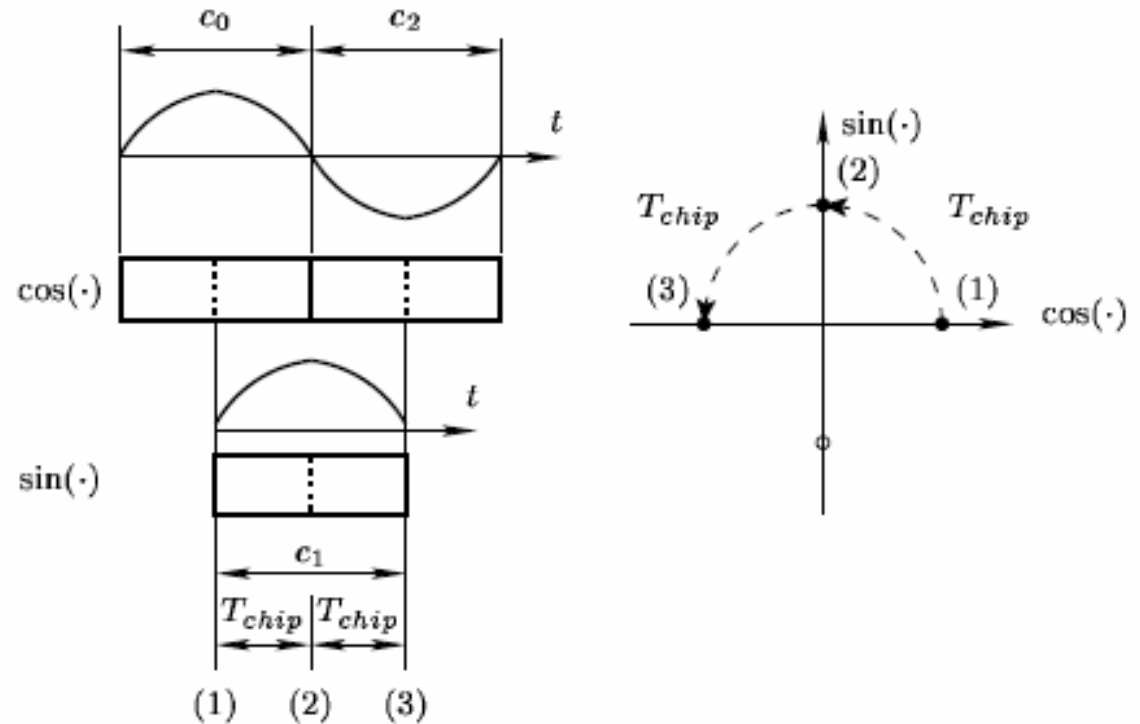


Legyen T_c egy chip periódusideje, ekkor :

$$p(t) = \begin{cases} \sin\left(\pi \frac{t}{2T_c}\right), & 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Moduláció szemléltetése

- Az átmenet két konstellációs pont között körív mentén történik, emiatt konstans burkolójú jelet kapunk
- $c_0=+1$, $c_1=+1$, $c_2=-1$



Példa: BPSK, QPSK, O-QPSK

- Bitsorozat átvitele

Bitsorozat:

1 0 1 0 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0

BPSK

1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

QPSK (I-Q ág)

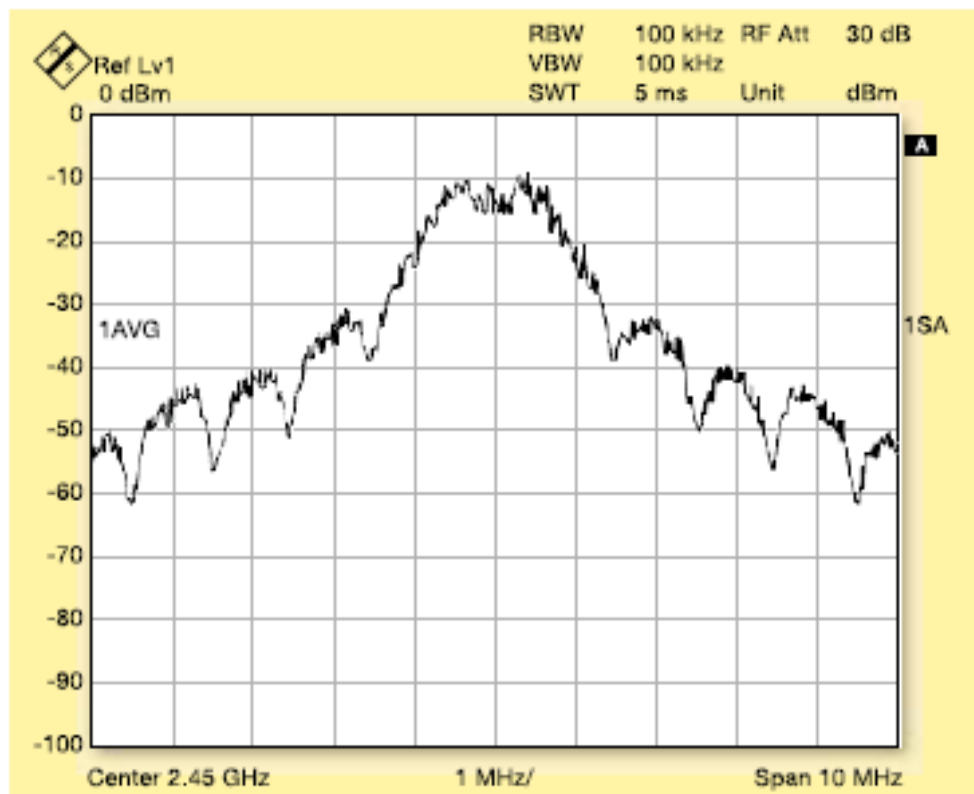
1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0
0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0

O-QPSK (I-Q ág)

1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	
	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0

O-QPSK moduláció jellemzése

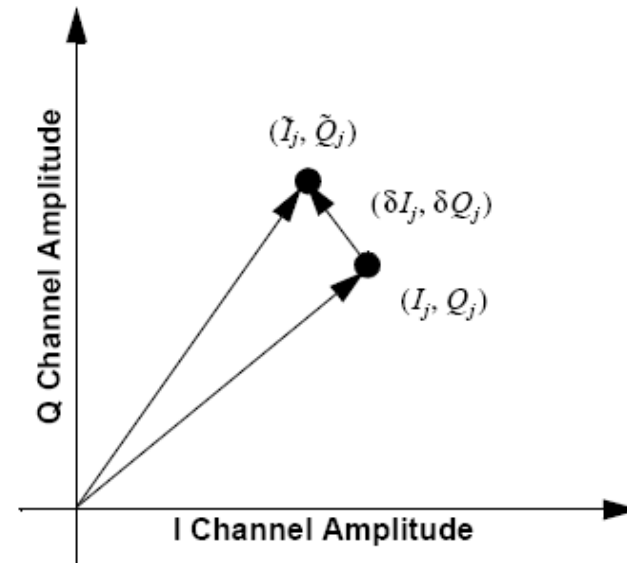
- Forrás: Khan Tuan Le, "Designing a ZigBee-Ready IEEE 802.15.4-Compliant Radio Transceiver," <http://www.rfdesign.com/>, November 2004, pp. 42-50.



- Az O-QPSK moduláció konstans burkolójú jelet eredményez
 - Az adó teljesítményerősítőre linearitására nézve enyhe követelmény (amplitúdó nem hordoz információt)
 - A végerősítő hatásfoka is jobb, ha a linearitás nem fontos
- Nincsenek hirtelen fázisváltozások a jelben → sáv szélesség-kihasználás szempontjából kedvező
- Nincsen frekvencia szinkronizálási idő ellenben más, szórt spektrumú kommunikációs szabványokkal szemben (FH-SS: szórt spektrum frekvenciaugrással, pl. Bluetooth)
- Rövid chip idő (2MHz), így kis RMS késleltetés szétkenődés engedélyezett

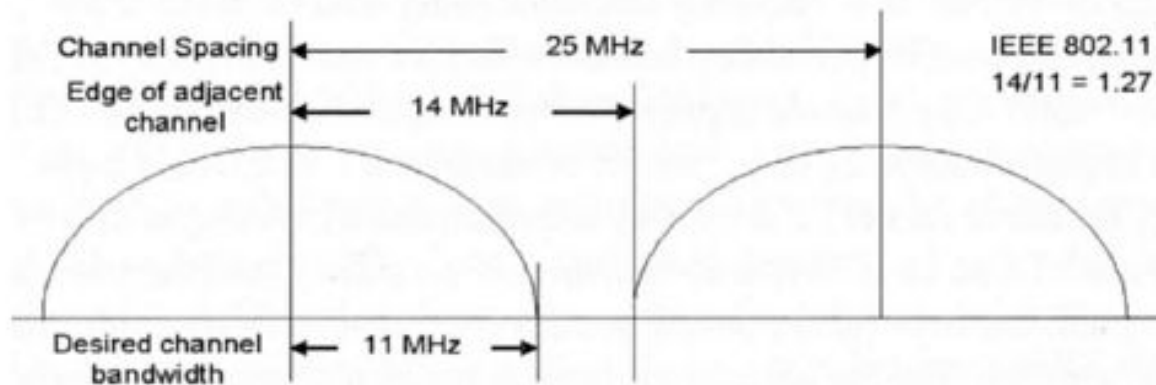
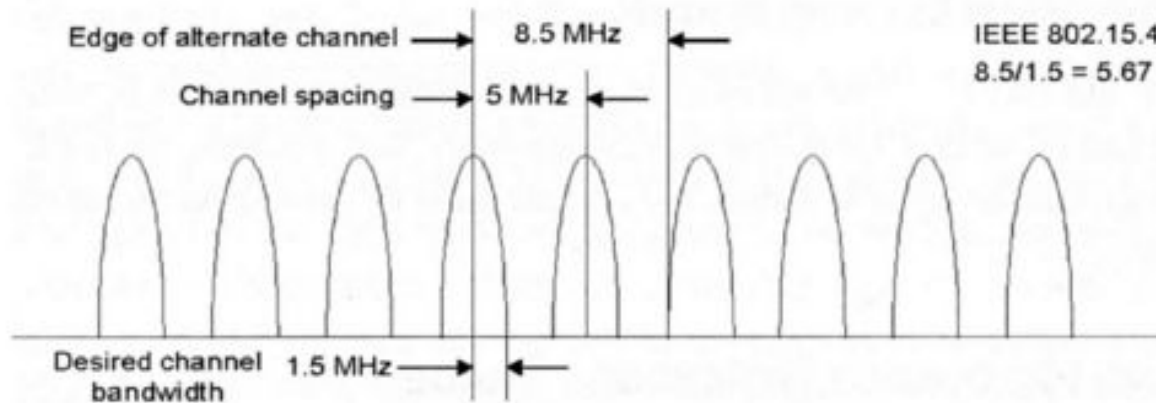
Moduláció pontossága az IEEE 802.15.4 szabvány alapján

- EVM (Error Vector Magnitude)
- Az ideális konstellációs ponttól (S) vett távolság
 - a fázis és amplitúdóhibát jellemzi
- Specifikáció: $EVM < 35\%$
 - $N=1000$ chip hosszú periódusra
 - δI és δQ : hibavektor komponensei: négyzetösszeg \rightarrow hossz
 - Viszonylag enyhe előírás \rightarrow egyszerű, olcsó eszközökkel megvalósítható
 - integrált oszcillátor külső komponensek nélkül
 - egyszerű modulátor pl. csatornák közötti áthallás kevésbé kritikus



$$EVM = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)}{S^2}} \times 100\%$$

Csatornakiosztás szempontjai



Csatornák közötti távolság/csatornák sávszélessége

$$802.15.4 : 5\text{MHz}/1.5\text{MHz} = 3$$

$$802.11 : 14\text{MHz} / 11\text{MHz} = 1.27$$

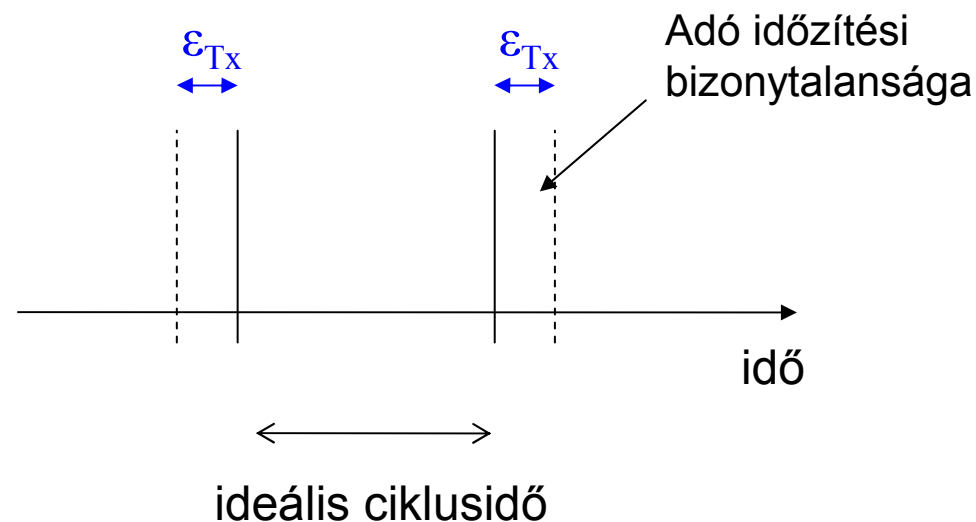
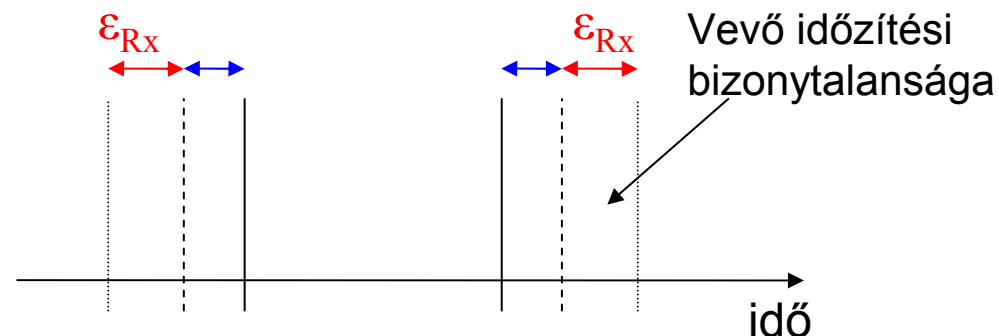
- Egyszerű felépítés megvalósításához enyhe követelmények szükségesek
- Jel sávszélessége ~2MHz csatornák közötti távolság 5MHz
- Összehasonlítva az IEEE 802.11. (WiFi) szabvánnyal, a csatornák relatív távolsága nagyobb
- Kevésbé meredek levágású szűrő szükséges a csatornák szétválasztásához
 - Szűrő meredeksége a komplexitást befolyásolja
 - IC-ben megvalósítható integrált szűrők
 - Kis meredekségű szűrőknek gyorsabb a beállási ideje → rövidebb feléledési idő

IEEE 802.15.4. időzítési követelményei

- Két időzítési feladat
 - Protokoll időzítés
 - Folyamatosan járnia kell
 - Rádiófrekvenciás jelek generálása
 - Csak akkor aktív amikor a kommunikáció engedélyezve van
- A két órajelgenerátor ketté is választható
- Ciklikus kommunikáció esetén 2.4GHz-es sávban 15.36ms...4min lehet a ciklusidő
 - tág határok → flexibilis konfiguráció
- Szabvány által megengedett hiba: +/-40ppm
- Maximális megengedett hiba hatása kettős (kompromisszumos választás)
 - Rádiófrekvenciás kommunikáció
 - Enyhe megkötések → egyszerű és olcsó adóstruktúra
 - Rossz minőségű jelek feldolgozása → bonyolultabb vevőegység a megfelelő minőségű kommunikáció biztosításához
 - Protokoll időzítés
 - Kis pontosság → olcsó időzítő
 - Nagy biztonsági időrések a kommunikáció összehangolásához

Protokollidőzítés kompromisszumai

- Legyenek ϵ_{Tx} és ϵ_{Rx} az adó és vevő időzítési hibái
- Legrosszabb eset:
 - A vevő egy ciklus elején korábban, a ciklus végén pedig később sugároz
 - A vevőnek a ciklus előtt korábban aktív állapotba kell kapcsolni (beleszámítva a saját órájának bizonytalanságát is), a ciklus végén tovább aktívnak kell maradnia
- Megoldások
 - Pontosabb időalap
 - Óraszinkronizáció
 - Kihasználjuk a kvarcok hosszútávú stabilitását: ha egy egység egy ciklus előtt korábban kezdett adni, akkor a következő ciklus előtt is korábban kezd



Fizikai réteg adatstruktúrája

- PPDU (PHY Protocol Data Unit): a fizikai réteg adatsorozata, melyet a rádiós adó modulátora használ fel
- Minden fölsőbb szint adatait tartalmazza
- PPDU komponensei:
 - Szinkronizációs fejléc (SHR)
 - 32 bit preamble
 - 8 bit SFD: Start of Frame Delimiter
 - Fizikai réteg fejléce (PHY header)
 - Adat hossza
 - Változó hosszúságú adatsorozat, mely a felsőbb rétegektől jövő adatokat foglalja magába: PSDU (PHY Service Data Unit)

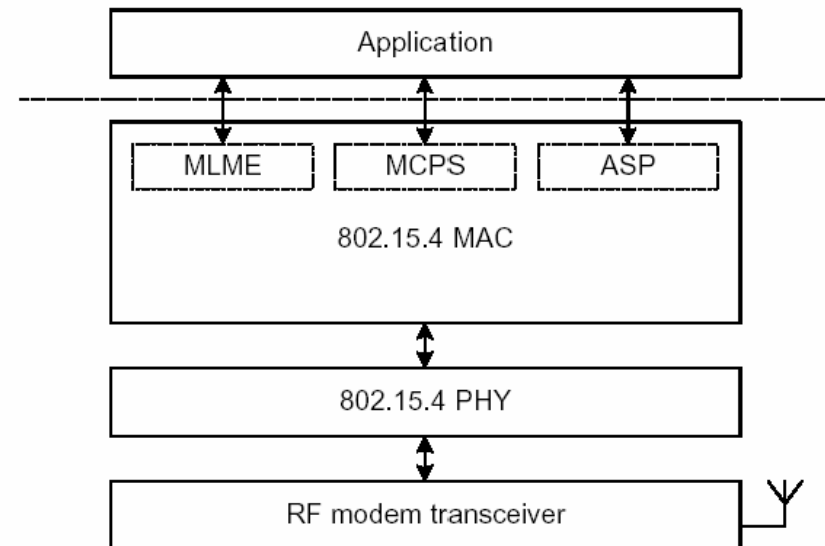
Synchronization header (SHR)		PHY header (PHR)		PHY payload
Preamble 32 bits	SFD 8 bits	Frame length 7 bits	Reserved 1 bit	PSDU

PPDU részeinek funkciói

- PPDU szinkronizációs fejléc (SHR)
 - 32 bit preamble: csupa nulla (Figyelem: nulla bitek nem nulla kisugárzott kódot jelentenek, mert a bitek chip-ekre képződnek le)
 - A chiphatárok és döntési küszöbszintek meghatározására szolgál
 - Start of Frame Delimiter: a preamble végét, és a keret elejét jelző bitsorozat (111001010)
- Fizikai réteg fejléce
 - 8 bit, az MSbit foglalt
 - Az alsó 7 bit az üzenet hosszúságát jelzi
 - A következő üzenethosszúságok foglaltak: 0...4, 6...7
 - 5 byte hosszúságú üzenet a Acknowledge üzenetre foglalt
 - 9-nél nagyobb üzenethossz a felsőbb MAC réteg üzeneteinek hosszát jelöli
- Fizikai réteg hasznos adat (payload)
 - A hasznos adat a PSDU (PHY Service Data Unit)
 - Változó hosszúságú lehet (lásd: üzenethossz)
 - A PSDU a MAC réteg adatait tartalmazza (MPDU): tartalmazza a MAC réteg adatait és keretezését

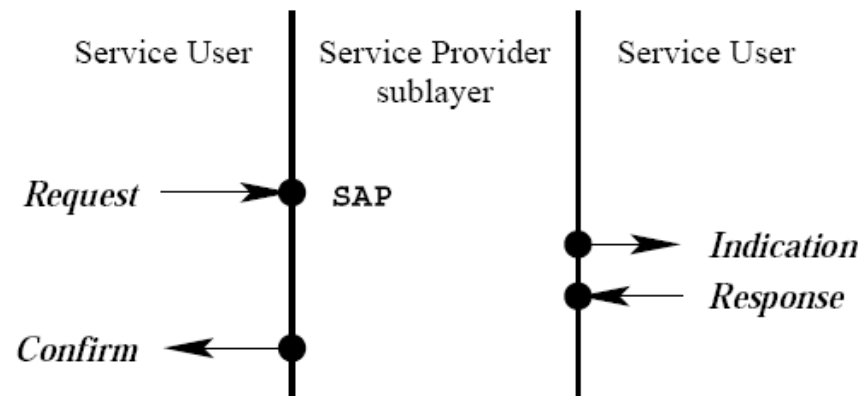
Fizikai réteg szolgáltatásai

- Fizikai réteg: MAC réteg és a rádiós adatátvitel közötti szolgáltató interfészt
- Két szolgáltatási primitív:
 - Fizikai réteg adatszolgáltatás
 - Hasznos adatok átvitele
 - Hozzáférési pont elnevezése: PHY layer Service Access Point (**PD-SAP**)
 - Fizikai réteg menedzsment
 - Kommunikáció felügyelete
 - Hozzáférési pont elnevezése: PHY layer Management Entity Service Access Point (**PLME-SAP**)
 - Emlékeztető: szolgáltatási primitív definíciója: egy alacsonyabb szint által nyújtott szolgáltatás, mely segítségével egy magasabb szint komplex feladatokat valósít meg



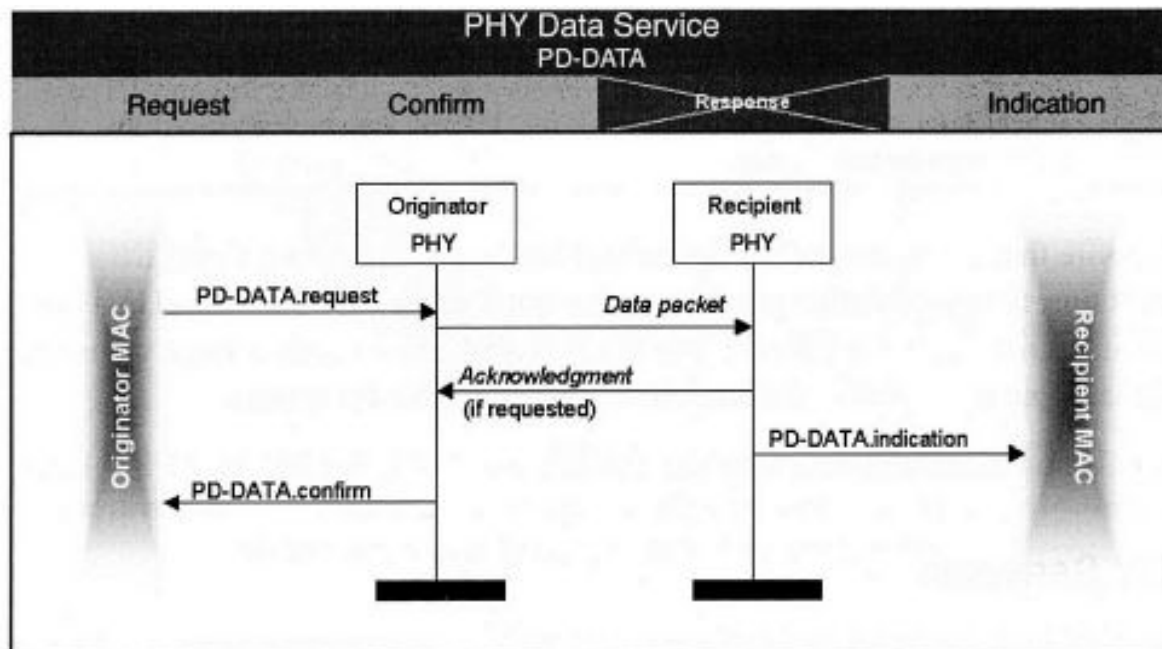
Fizikai réteg szolgáltatási primitívjei

- Az IEEE 802.15.4. fizikai rétege a következő szolgáltatásokat nyújtja
 - *Request*: egy szolgáltatás kérésére irányul egy felsőbb szinttől
 - *Indication*: egy alsóbb szinttől indul egy esemény jelzésére. Kapcsolódhat egy Request parancshoz, vagy egy független belső eseményhez.
 - *Response*: egy felsőbb szint felől jövő üzenet. Jelzi, hogy egy indication primitív által kezdeményezett folyamat befejeződött.
 - *Confirm*: egy vagy több Request üzenet eredményét továbbítja egy alsóbb szint a felsőbb szint felé
- SAP (Service Access Point)
 - Hozzáférési pontokon (SAP) keresztül kapcsolódnak a rétegek, és használják egymás szolgáltatási primitíveit
 - Információáramlás: diszkrét, pillanatszerű események



Fizikai réteg adatszolgáltatási feladatai

- Adatszolgáltatási primitívek:
 - data-request, data-confirm, data-indication
- Paraméterek: hossz + PSDU (hasznos adat)
- Az aszinkron jelleg nem igényli a data-response primitív meglétét: nincs információ, hogy az alkalmazás feldolgozta-e
- Confirm: sikerült vagy nem sikerült elküldeni
- PD-DATA.indication értékei: adat, hossz, LQI



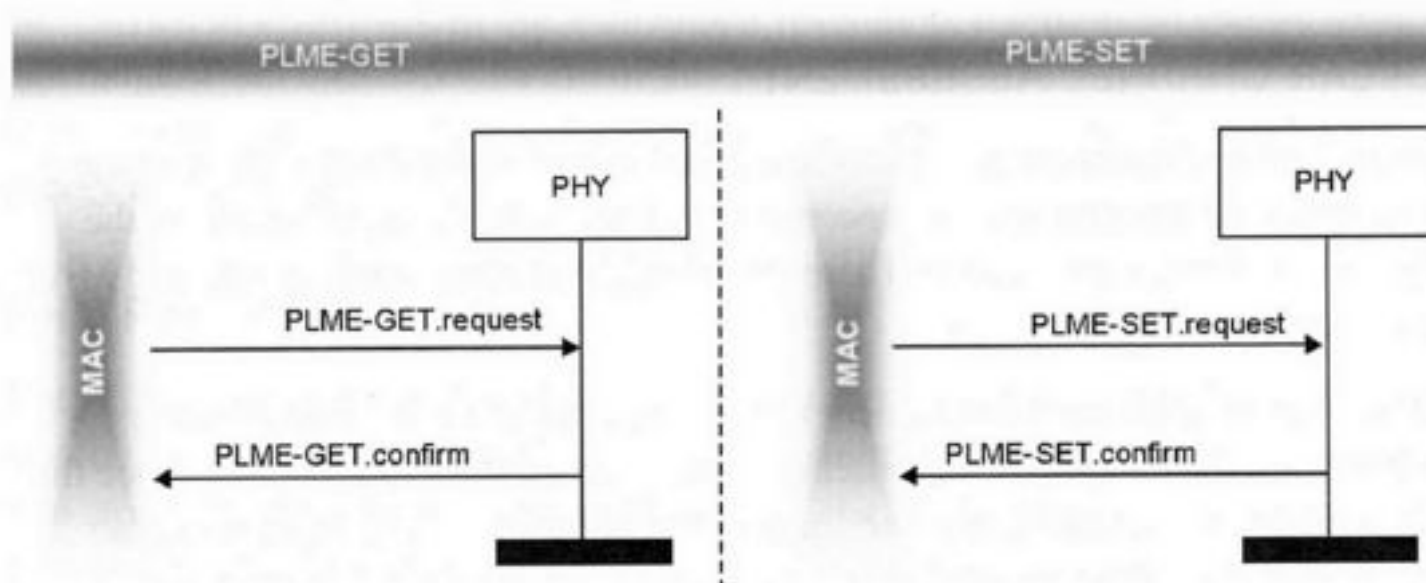
Fizikai réteg menedzsment szolgáltatások

- PLME: PHY Layer Management Entity
- Primitívek a kommunikáció beállítása és a rádió vezérlése céljából
- A primitívek különböző attribútumokat kapnak, illetve különböző attribútumokkal térnek vissza

Primitive	Category	Description	Type of primitive	
			Request	Confirm
GET	Communication settings	PHY PAN information base	x	x
SET		management	x	x
SET-TRX-STATE	Radio control	Enables/disables radio	x	x
CCA	RF energy sensing	Clear channel assessment	x	x
ED		Energy detection	x	x

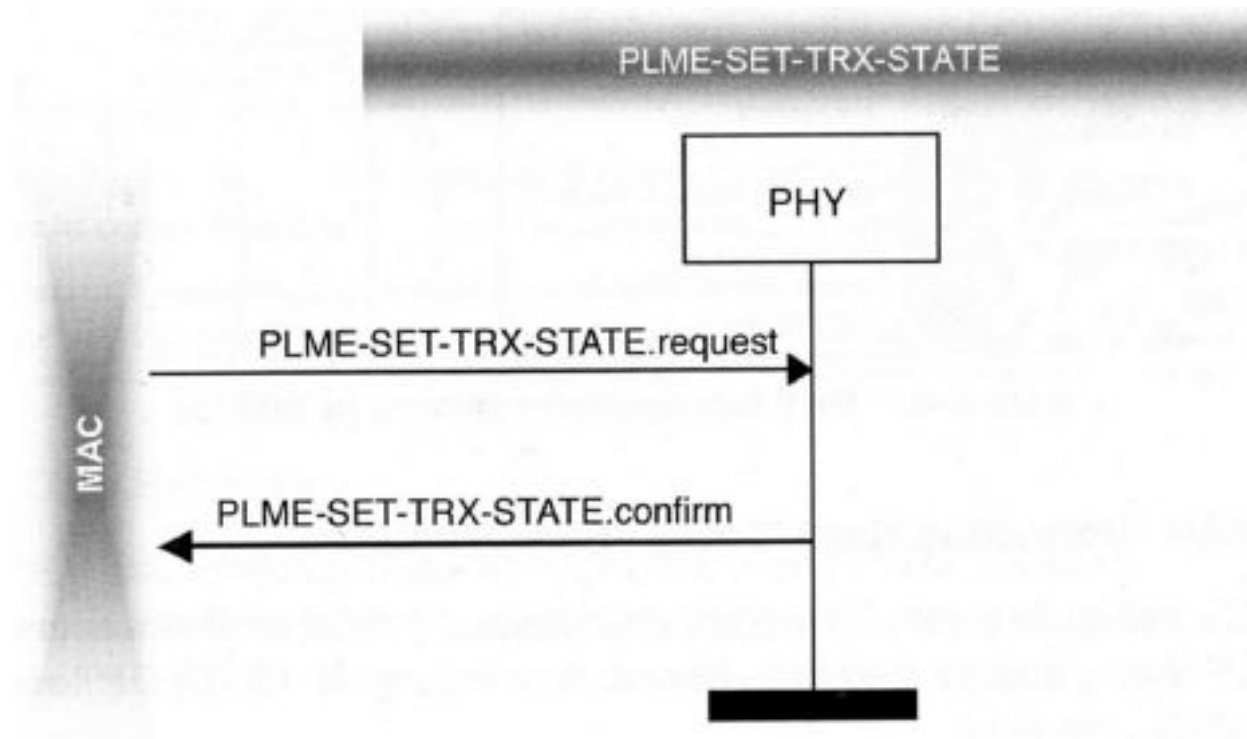
Fizikai réteg menedzsment szolgáltatások

- A fizikai réteg attribútumai a PLME-GET és PLME-SET primitívek segítségével írható és olvashatóak
- Lehetséges attribútumok
 - RF csatorna kiválasztása: 0...26
 - Támogatott kommunikációs csatornák (adott rádió milyen sávban üzemel)
 - Adóteljesítmény
 - CCA üzemmód
- Visszatérés (SET): SUCCESS, UNSUPPORTED_ATTRIBUTE, INVALID_PARAMETER



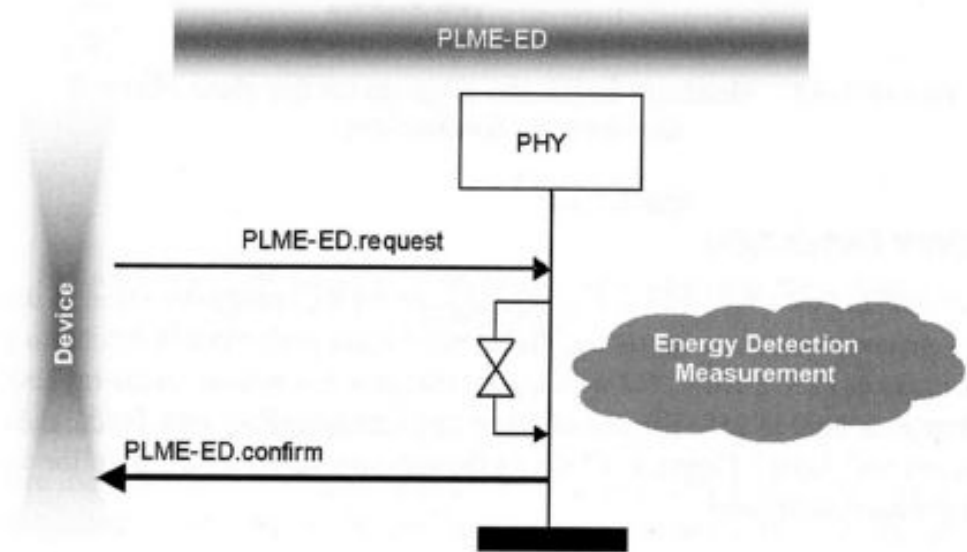
Fizikai réteg engedélyezése és tiltása

- PLME-SET-TRX-STATE primitívek a rádió engedélyezésére és tiltására használhatóak
- Request érvényes paraméterei: RX_ON, TRX_OFF, FORCE_TRX_OFF, TX_ON
- Energiatakarékosság: ha nem várható adatcsere, akkor a rádió kikapcsolható
- Amennyiben aktív üzenetcsere van, BUSY értékkel tér vissza



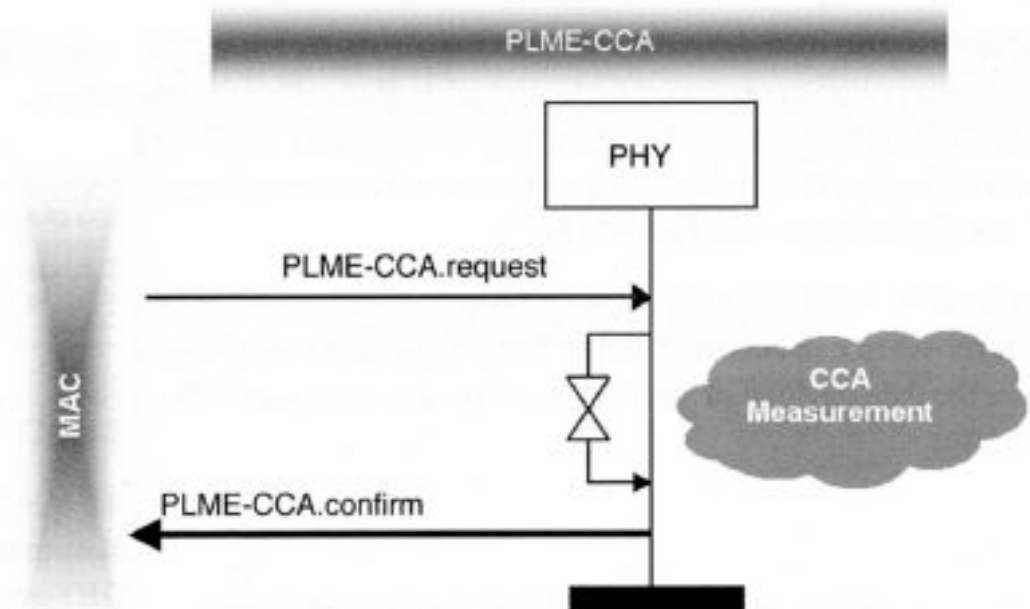
Energiaérzékelés

- ED: Energy Detection → PLME-ED
- A vett jel teljesítményét jellemzi az IEEE 802.15.4 adott sávjában
- Nincsen dekódolás, csupán teljesítménydetektálás (nem kell üzenetet feldolgozni)
- Legalább 8 szimbólum időre átlagolt teljesítmény kell
- A minimum ED szint (0) azt jelzi, hogy a vett jel vevő érzékenységénél maximum 10dB-el nagyobb
- Legalább 40dB-es dinamikájú (40dB-es sávot fed le)
- ED: 8 bites adat, míg a CCA bináris flag
- Aktív kommunikációs csatorna kiválasztása (channel discovery)
- Felhasználás pl. CSMA vagy csatornaválasztás



Csatornafoglaltság jelzése

- CCA: Clear Channel Assessment
 - Non-beacon-enabled üzemmódban, vagy beacon-enabled módban a CAP (Contention Access Period) során a MAC réteg kérésére hajtja végre a fizikai réteg
 - CCA kérésre a fizikai réteg bekapcsolja a rádiót, és elvégzi a mérést
 - A mérés elvégzése után a rádiót tiltja a fizikai réteg, és PLME-CCA.confirm primitív segítségével értesítést ad a mérés eredményéről (csatorna foglalt/szabad)
-
- CCA jelzés lehetséges típusai
 - 1) Energiaszint egy küszöbértéket túllép
 - 2) AZ IEEE 802.15.4. –nek megfelelő modulációjú jel vétele (érvényes csomag)
 - 3) 1) és 2) egyaránt teljesül



Vételi Minőség Jelzése (LQI)

- LQI: Link Quality Indicator
- Egy teljes csomagra számított, az adatátvitel minőségét jelző 8 bites érték
- A chip értékekből számítható: redundáns adatok, mivel egy bitet több chip kódol. Vételnél eldönthető, hogy egy chip-sorozat melyik mintázathoz hasonlít. Az eltérésekből lehet következtetni a vétel minőségére

Vivőérzékelés és ütközés elkerülés

CSMA-CA

- CSMA-CA: Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance
- Nem ütemezett (unslotted) üzemmódban (nonbeacon-enabled network)
 - 1) A PPDU előtt egy véletlen ideig vár az eszköz
 - 2) Szabad csatorna esetén egy újabb véletlen idő múlva (backoff-time) elkezd adni az eszköz
 - Foglalt csatorna esetén az 1)-es ponttól folytatja a csatornahozzáférést
 - Acknowledge üzenet CSMA-CA nélkül kerül elküldésre
- Ütemezett (slotted) üzemmódban (beacon-enabled network)
 - Ugyanaz mint az előző, de a várakozási idő ütemezési keretidőben (slot) értendő
 - Az időmérés a jelzőüzenetekhez (beacon üzenet) képest mérik az eszközök
- Nincsen ütközésetektálás
 - Beacon üzenet (periodusok kezdetének jelzése)