

Az IEEE 802.15 szabványcsalád



ZigBee®



THREAD

WEAVE

Dr. Fazekas Péter

Balogh András

BME-HIT

A 802.15-ről általában

- PAN (Personal Area Network) szabványok
 - Kis adóteljesítmény, kis hatótáv
- IEEE 802.15.1
 - A Bluetooth (v1.2) technológia integrálása az IEEE szabványcsaládba
 - Eredetileg nem IEEE
- IEEE 802.15.2
 - Együtműködés 802.11 hálózatokkal
- IEEE 802.15.3
 - Nagysebességű PAN-ok definíciója
 - Max. 55 Mbps
 - 2.4 GHz-es sáv
 - Fizikai réteg hasonló az eredeti WiFi-hez
 - magasabb rendű modulációk

A 802.15-ről általában

- IEEE (P)802.15.3a
 - Adatsebesség további növelése volt a cél
 - Ultra-széles sávú kommunikáció (UWB)
 - Két alapvető fizikai hullámformát javasoltak
 - Multi-Band OFDM
 - WiMedia Alliance + Bluetooth SIG (Wireless USB)
 - Eredetileg ez lett volna az AMP a Bluetooth v3.0-ban
 - Direkt-Szekvenciális UWB
 - DecaWave + Xtreme Spectrum
 - Nem sikerült végleges konszenzusra jutni
 - Pedig voltak próbálkozások a DS-UWB „lobbi” részéről
 - CSM (Common Signaling Mode) bevezetése
 - Az MB-OFDM szerint csak egyetlen PHY-t tolerálna a piac
 - 2006-ban visszavonták

A 802.15-ről általában

- **802.15.3b**
 - MAC rétegbeli funkciók optimalizálása
- **802.15.3c**
 - Nagysebességű átvitel a mm-es hullámsávban (60 GHz környékén)
 - Háromféle hullámforma definiált
 - Single carrier (SC) mód (max 5.3 Gb/s)
 - High speed interface (HSI) mód (egyvivős, 5 Gb/s)
 - Audio/visual (AV) mód (OFDM, max 3.8 Gb/s)
 - Látható a hasonlóság a 802.11ad-vel
 - Elterjedése kérdéses, hiszen ott vannak a nagysebességű WiFi szabványok
 - Ezeket már számos gyártó implementálja

A 802.15-ről általában

- **802.15.4 - 2003**
 - Alacsony sebességű PAN-ok (LR-WPAN, Low-Rate Wireless PAN)
 - Fizikai réteg és MAC réteg szabványok
 - Ez jelentős különbség a Wi-Fi-hez képest
 - kisebb sávszélesség, más sávok
 - kis adóteljesítmény
 - jobban alkalmazkodik az alkalmazási igényekhez
 - Van erős gyártói támogatás
 - Hálózati protokollok egész hada épül a 802.15.4 fölé:
 - IEEE 802.15.5
 - ZigBee
 - 6LoWPAN (IPv6 over Low power WPAN - IETF)
 - Thread (Weave)
 - WirelessHART
 - A köznyelv (tévesen) ZigBee-ként emlegeti a 802.15.4 hálózatokat

A 802.15-ről általában

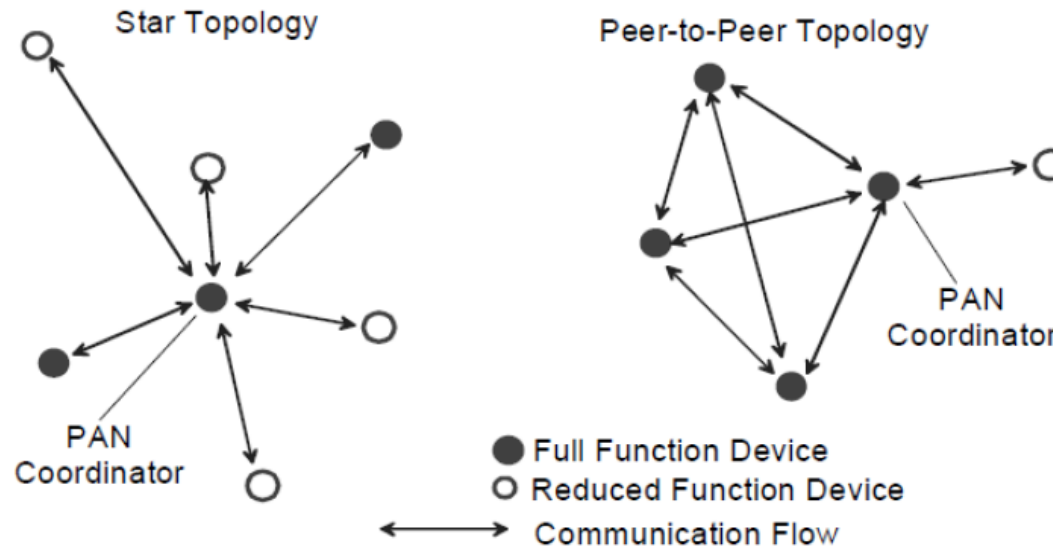
- **802.15.4a – 2007**
 - Új fizikai rétegek definíciója
 - Fókusz a távolságmeghatározáson (ranging): lokalizáció
 - Pulzus üzemű UWB és csiripelő moduláció
- **802.15.4e – 2011**
 - Ipari alkalmazások támogatása
- **802.15.4f**
 - Aktív RFID alkalmazásokhoz új fizikai réteg és MAC kiegészítések
- **802.15.4g**
 - Nagyon nagy kiterjedésű kontroll és adatgyűjtő hálózatok, elsősorban közműhálózatok támogatása
- **802.15.5**
 - Mesh hálózatok a 802.15.4 és 802.15.3 fölött
- **802.15.6**
 - BAN (Body Area Network) szabvány
- **802.15.7**
 - VLC (Visible Light Communications), aka LiFi

A 802.15.4-ről általában

- Célok: Egyszerű, olcsó, kis fogyasztású hálózat, kis adatsebesség-igény esetén
 - Egyszerű üzembe helyezés, megbízható átvitel
 - Egyszerű, rugalmas protokoll
- Néhány tulajdonság:
 - Csillag topológia, vagy pont-pont átvitel
 - 64 bites egyedi cím, vagy egyszerűsített 16 bites cím
 - Garantált átviteli időrések foglalásának lehetősége
 - CSMA-CA, vagy ALOHA közeghozzáférés
 - Nyugtázásos protokoll a megbízhatóság érdekében
 - Összeköttetés minőségének jelzése
- Különböző adatsebességek: 250, 40, 20 kbps
- Különböző frekvenciasávok támogatása:
 - 16 csatorna 2,4 GHz-en
 - 10 csatorna 915 MHz-en
 - 1 csatorna 868 MHz-en
- Alacsony késleltetésű eszközök támogatása, alacsony fogyasztás

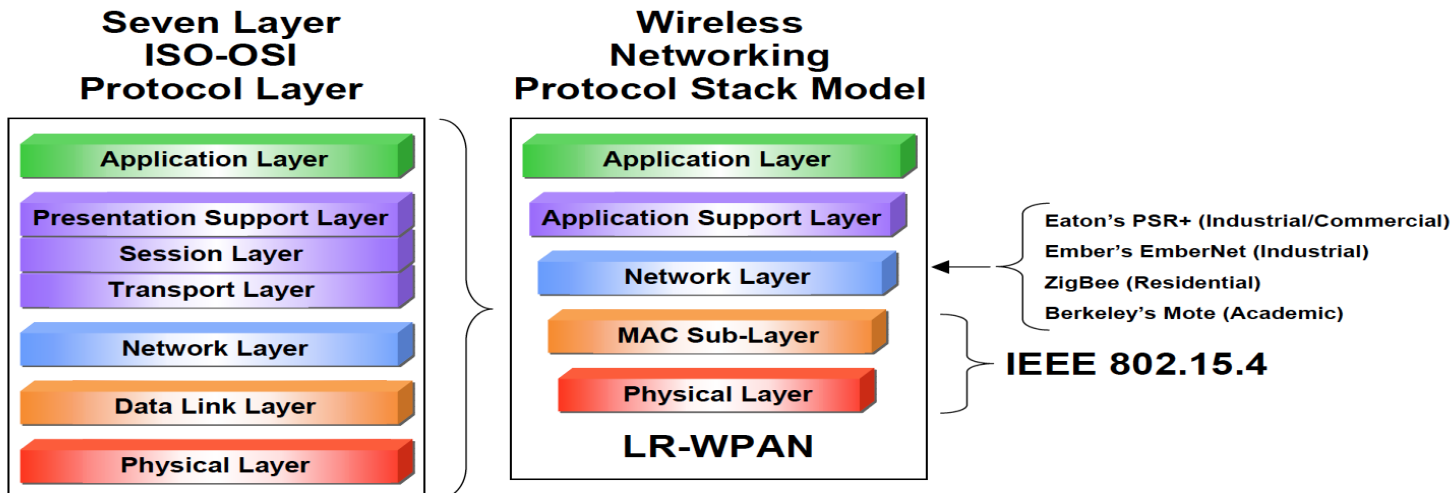
A 802.15.4 rendszer

- **A hálózat felépítése**
 - Full Function Device (FFD)
 - Koordinátor csak ilyen lehet
 - Több eszközzel is képes kapcsolatot létesíteni
 - Reduced Function Device (RFD)
 - Egy eszközzel képes kapcsolatot létesíteni
 - A PAN-nak egyedi azonosítója van
 - Megkülönbözteti a szomszédos PAN-októl



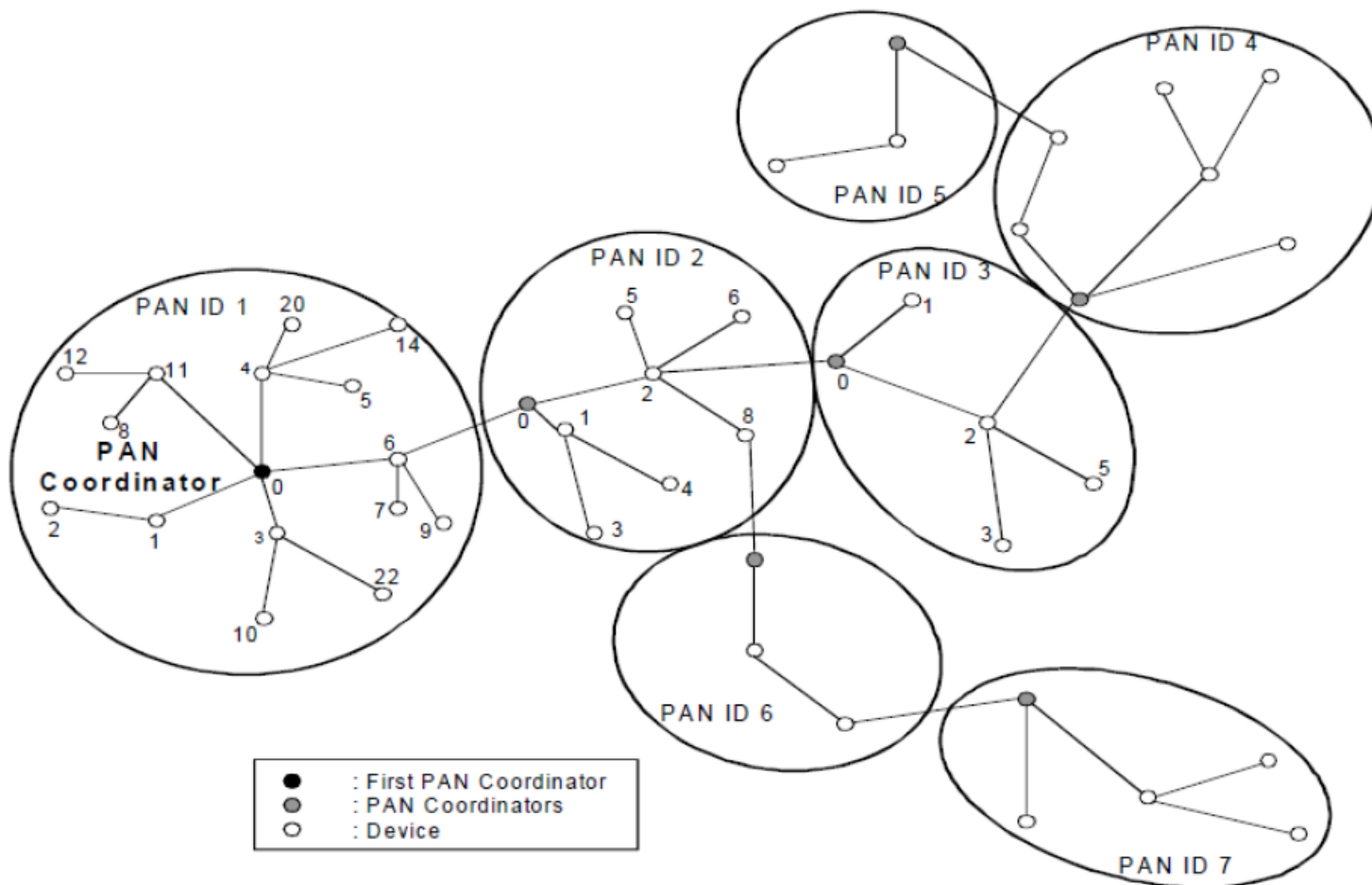
A 802.15.4 rendszer

- A protokoll alapvető mechanizmusokat biztosít több PAN összekapcsolására
 - Fa struktúra
 - Tulajdonképpen csak szerepeket és beacon kereteket definiál
- Számos mechanizmus szükséges azonban, amiket a szabvány nem tárgyal
 - Ki lesz koordinátor, mi van ha többen is akarnak, routing stb.
 - Ezt a korábban említett hálózati protokollok oldják meg



A 802.15.4 rendszer

- Több összekapcsolt PAN



802.15.4 protokollok

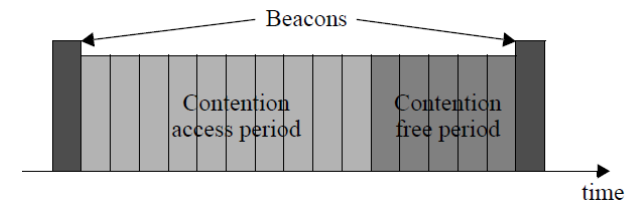
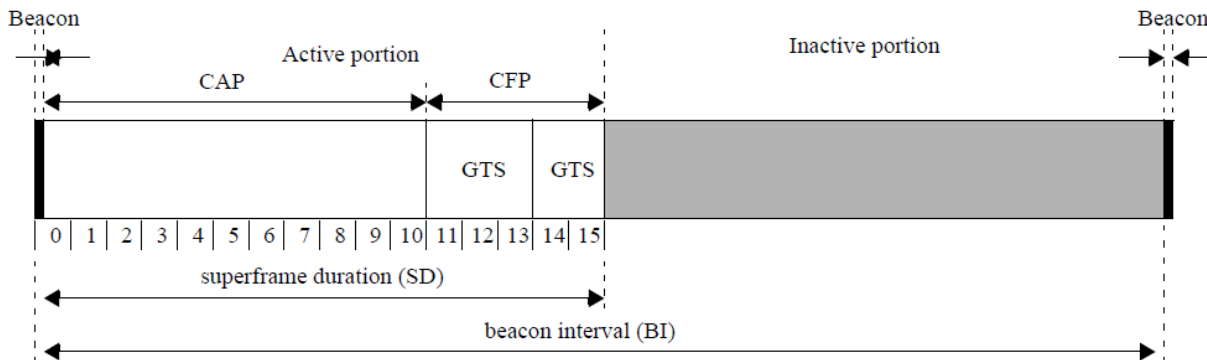
- **MAC funkciók**
 - Beacon keretek generálása és küldése
 - Beaconok-höz való szinkronizáció
 - PAN kapcsolódás/lecsatlakozás támogatása
 - Biztonsági funkciók
 - CSMA/CA megvalósítása
 - Garantált időrések biztosítása
 - Nyugtázás, megbízható összeköttetés nyújtása
 - Definiálva van a nyugtázatlan adatátvitel lehetősége

802.15.4 protokollok

- MAC funkciók

- Alapvető működési mechanizmus:

- A koordinátor által definiált a szuperkeret struktúra
 - Beacon-ökkel határolva
- Tartalmazhat inaktív periódust
 - Ilyenkor a koordinátor is alvó módban van
- Versenyzések és versenymentes időszakok itt is
- Versenymentes időszakban a koordinátor által allokált garantált időrésben (GTS) adhat egy másik eszköz



- **MAC funkciók**
 - Alapvető működési mechanizmus:
 - Beaconnel segített, vagy beacon-mentes átvitel
 - A WiFi-től eltérően nem hagyatkozik arra, hogy a csatornát mindig figyeli a terminál
 - Beacon periódusokra ébred fel, ebben szól neki a koordinátor, ha adás van számára
 - Vagy a terminál kérdezi le, hogy van-e adás a számára
 - Uplink irány
 - Itt is meg kell a beacont várni és a szuperkerethez szinkronizálva adni a koordinátor felé
 - A koordinátornak is lehet alvó állapota
 - Versenyzéses:
 - Hasonló a WiFi-hez, CSMA/CA
 - Meg van engedve az ALOHA is (nincs közegfigyelés)

802.15.4 protokollok

- **MAC funkciók**
 - Aktív, vagy passzív szkennelés itt is (beacon kikényszerítése)
 - A PAN azonosító generálásáról nem szól a szabvány, de ha valaki ütközést észlel, arra van üzenet
 - GTS request
 - Ezzel kérhet dedikált slot-ot egy terminál: egy, vagy kétirányút is, illetve kérheti a megszüntetését

802.15.4 protokollok

- MAC keretek

Command frame identifier	Command name	RFD		Subclause
		Tx	Rx	
0x01	Association request	X		5.3.1
0x02	Association response		X	5.3.2
0x03	Disassociation notification	X	X	5.3.3
0x04	Data request	X		5.3.4
0x05	PAN ID conflict notification	X		5.3.5
0x06	Orphan notification	X		5.3.6
0x07	Beacon request			5.3.7
0x08	Coordinator realignment		X	5.3.8
0x09	GTS request			5.3.9
0x0a–0xff	Reserved			—

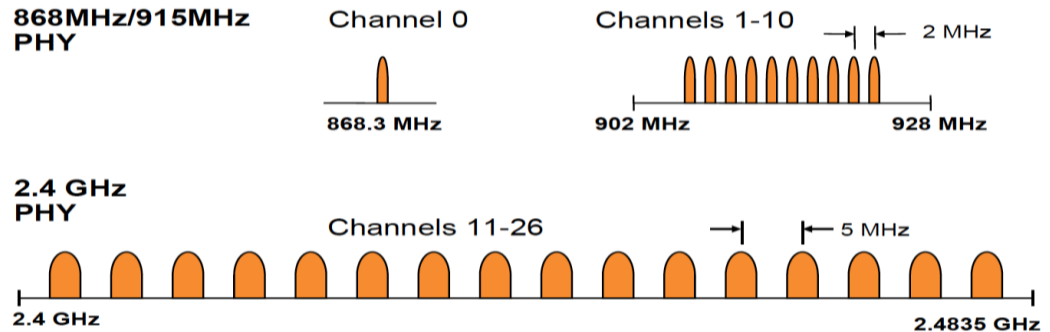
Frame type value b ₂ b ₁ b ₀	Description
000	Beacon
001	Data
010	Acknowledgment
011	MAC command
100–111	Reserved

Octets: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10/14	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address	Auxiliary Security Header	Frame Payload	FCS
Addressing fields								MAC Payload
MHR								

802.15.4 működési sávok

- **Frekvenciasávok**

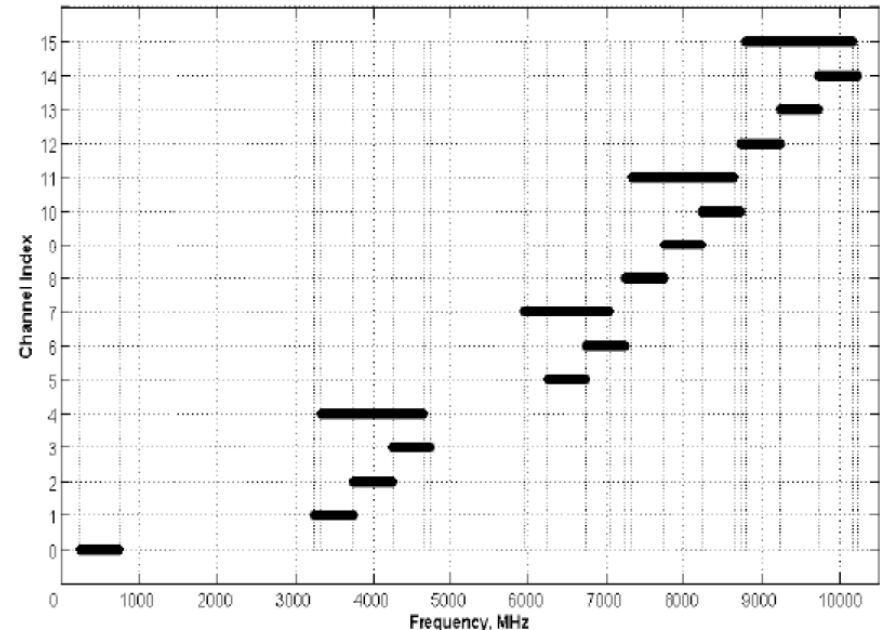
- 868–868.6; 902–928 MHz
- 2400–2483.5 MHz
- 314–316, 430–434,
- 779–787 MHz (Kína)
- 950–956 MHz Japán



- **Ultra-széles sávok (UWB)**

- Alacsony és magas tartomány
- Különböző sávsszélességű csatornák lehetősége
 - ~500 MHz
 - ~1300 MHz

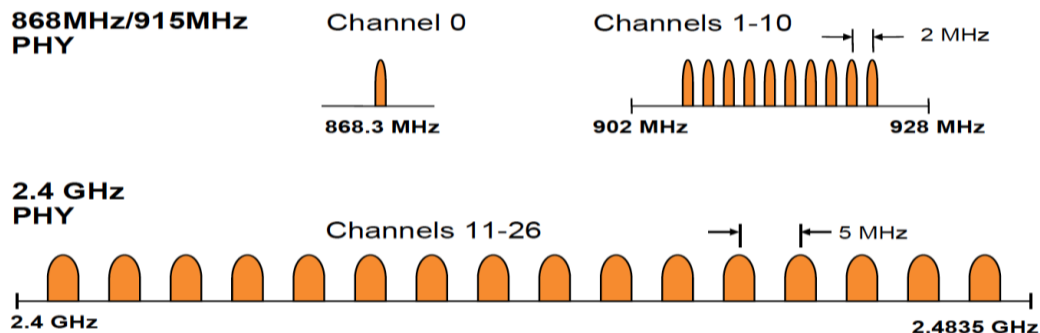
UWB low band (optional)	3244–4742
UWB high band (optional)	5944–10 234



802.15.4 működési sávok

- Frekvenciasávok**

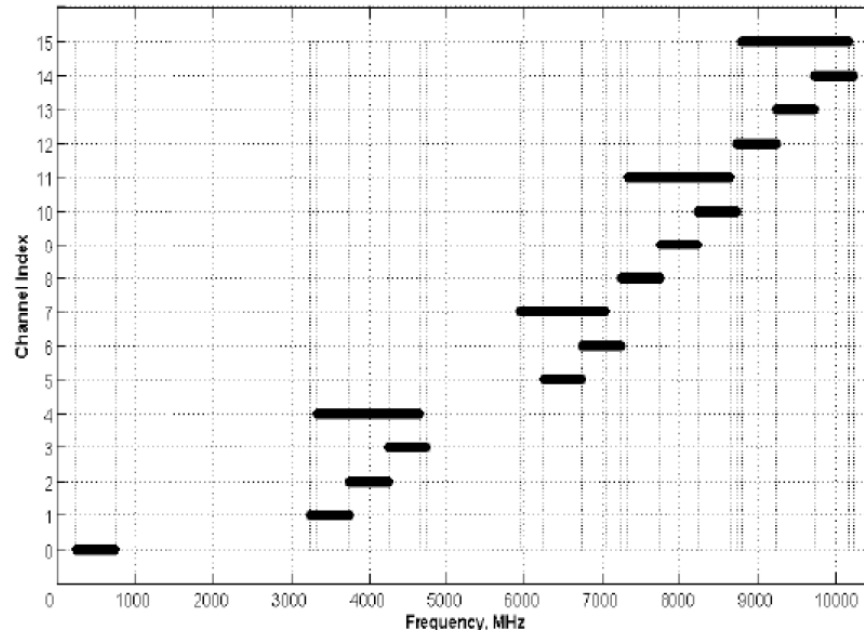
- 868–868.6; 902–928 MHz
- 2400–2483.5 MHz
- 314–316, 430–434,
- 779–787 MHz (Kína)
- 950–956 MHz Japán



- Ultra-széles sávok (UWB)**

- Alacsony és magas tartomány
- Különböző sávsszélességű csatornák lehetősége
 - ~500 MHz
 - ~1300 MHz

UWB low band (optional)	3244–4742	
UWB high band (optional)	5944–10 234	

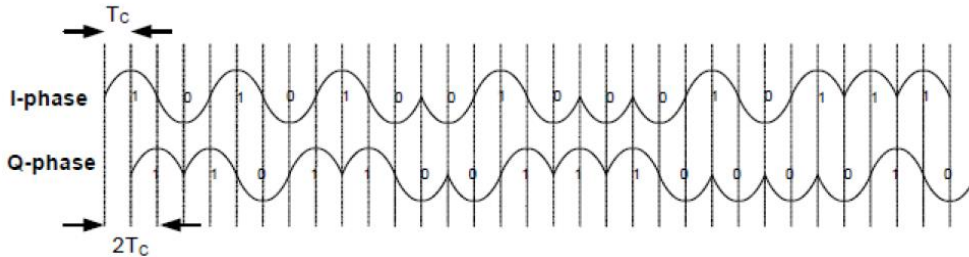


802.15.4 Fizikai rétegek

- **PSK alapú szórt spektrumú modulációk**
 - Offset-QPSK modulációt használó Direkt-szekvenciális szórt spektrum (O-QPSK DSSS)
 - A 780 MHz, 868 MHz, 915 MHz, és 2450 MHz környékén
 - BPSK DSSS
 - A 868 MHz, 915 MHz, 950 MHz sávokban
- **ASK alapú, párhuzamos sorozattal dolgozó szórt spektrum**
 - 868 MHz, 915 MHz
- **Frekvenciasöpréses (csiripelő) moduláció DQPSK-val**
 - 2450 MHz ISM sáv
- **UWB**
 - BPSK-val kombinált börszt-pozíció moduláció
- **M állapotú fázismoduláció**
 - 780 MHz-en
- **GFSK Gaussi frekvenciamoduláció**
 - 950 MHz-es sávban

802.15.4 Fizikai rétegek

- **O-QPSK DSSS**
 - 4 adatbit meghatároz egy táblázatból egyet a 16 hosszúságú sorozatok közül
 - A 2.4 GHz-es sávban 32 hosszú sorozatot választanak ki a 4 bit alapján
 - Ezt a 16 chipet kell átvinni
 - Zavartűrőbb
- **Offset-QPSK**
 - A modulátor két ágában időben elcsúsztatva a két sorozat
 - Félszínusz impulzus hordozza az információt
 - 100 kbps a 800-as sávban
 - 250 kbps a többiben az átviteli sebesség



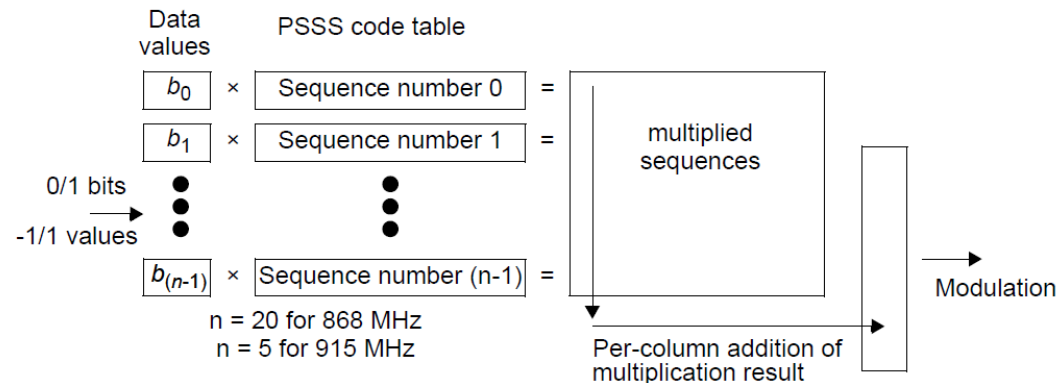
Data symbol	Chip values ($c_0 c_1 \dots c_{14} c_{15}$)
0	00111111000100101
1	01001111110001001
2	01010011111100010
3	10010100111111000
4	00100101001111110

802.15.4 Fizikai rétegek

- **Párhuzamos sorozat alapú szórt spektrum:**
 - 868 MHz sávban (915-ön más paraméterekkel, de hasonló)
 - A szabvány definiál 20 db 32 hosszúságú álvéletlen +/-1 sorozatot
 - A kódolás során 20 bit (+-1) beszorozza a 20 sorozatot
 - Az így létrejött 20 sorozatot összeadják és ezt, mint sokállapotú amplitúdómodulációt (ASK) viszik át
 - Előtte normalizálják:
 - Nulla körül szimm. legyen
 - 0...1 között legyen

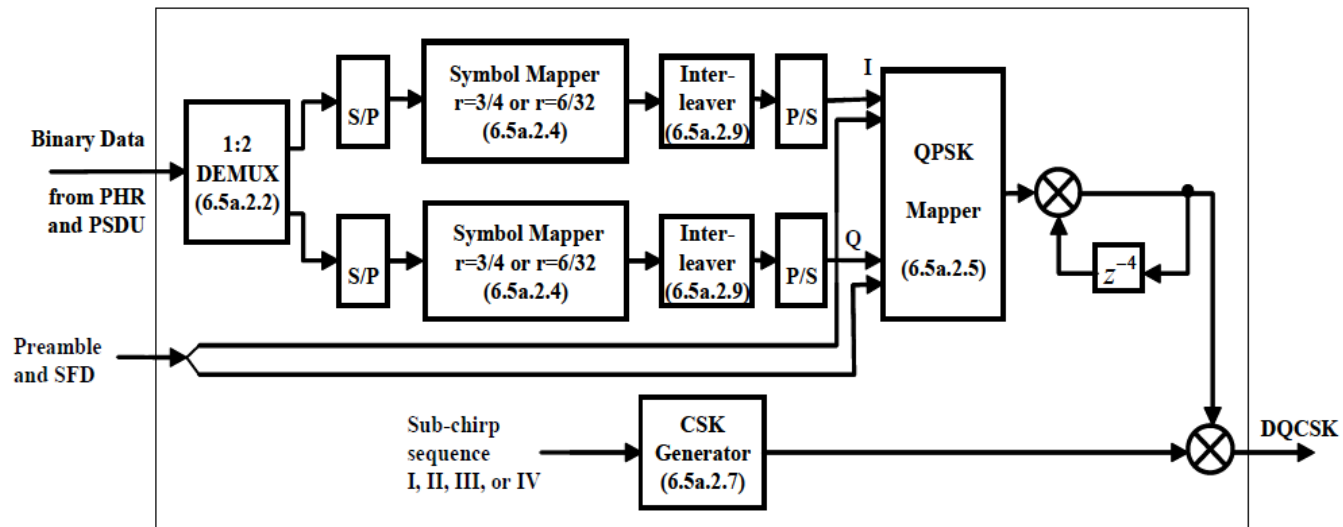
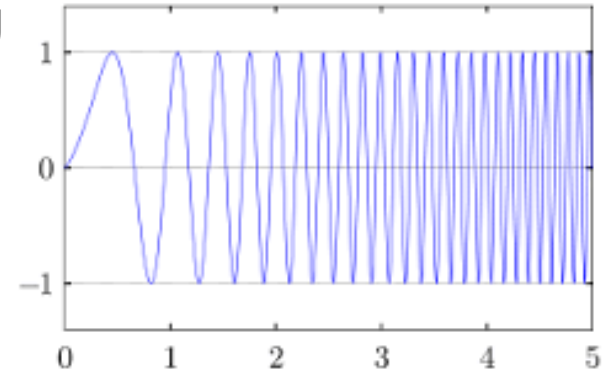
- **ASK PHY szimbólumarány**

- 12.5 ksymbol/s 868 MHz-en
- 50 ksymbol/s 915 MHz-en
- Ez összesen 250 kbps



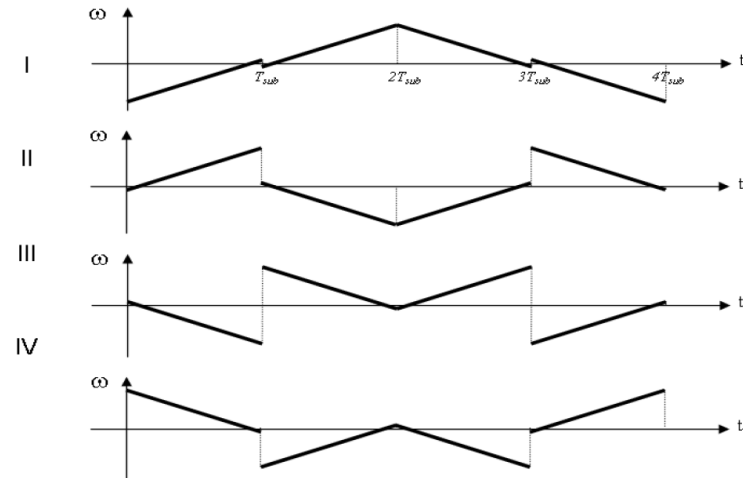
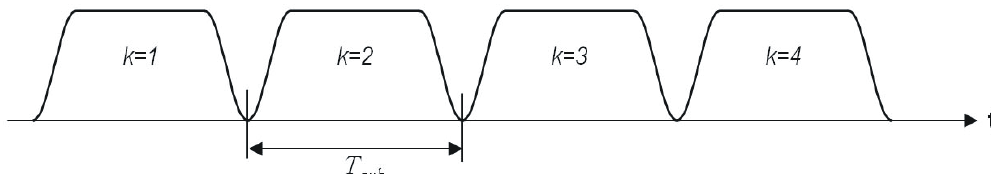
802.15.4 Fizikai rétegek

- **Frekvenciasöpréses fizikai réteg**
 - 250 kbps (opcionális) és 1 Mbps átviteli sebesség
 - Bonyolultabb jelalak
 - A chirpnek jó tulajdonságai vannak
 - Zavartűrő
 - Jól detektálható
 - Távolságmérésre jól használható
 - Bonyolultabb PHY



802.15.4 Fizikai rétegek

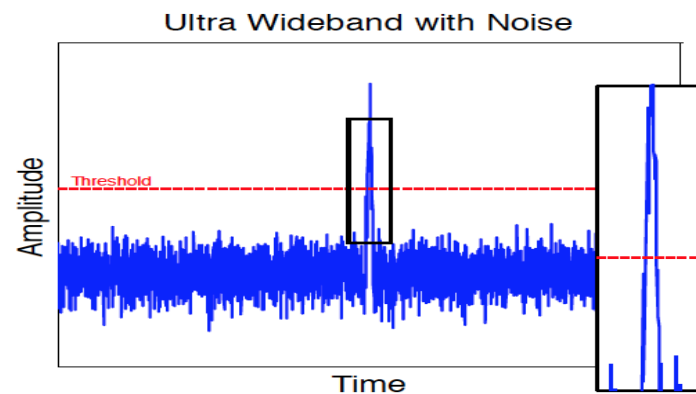
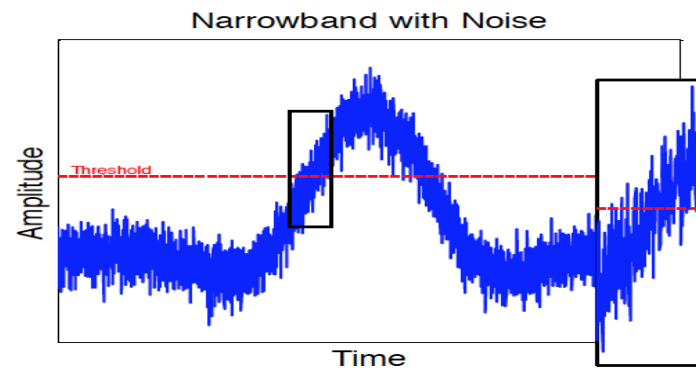
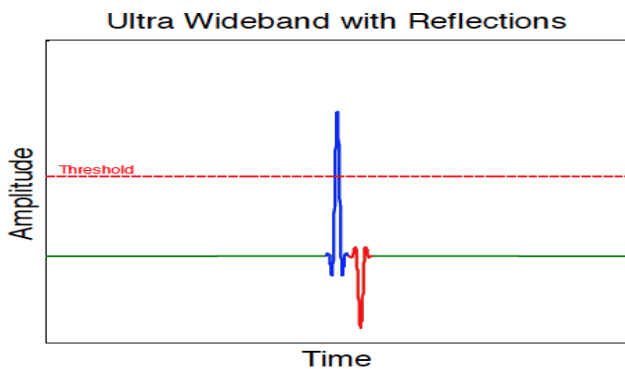
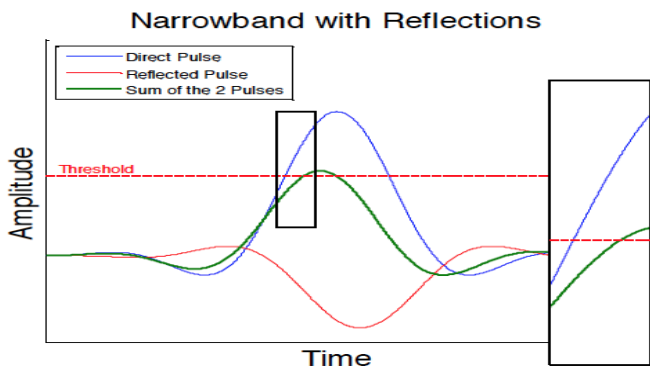
- **Frekvenciasöpréses fizikai réteg**
 - 1 Mbps: 3 bit leképezve egy 4 hosszú sorozatra (3/4)
(250 kbps: 6 bit esetén 2db 16 hosszú kódszó)
 - 4 chipenként egy QDPSK modulátorba
 - Egymás utáni szimbólumok fáziskülönbsége hordozza az információt
 - De erre még rá kell ültetni a chirp jelet
 - Ün. subchirp jelekből négyféle van definiálva (+ időeltolás)
 - Lényegében a négyféle chirp sorozat kódolja a QPSK információt
 - A frekvenciában ugrások
 - Rossz spektrális tulajdonságokat okoz
 - Szűrni kell időben
 - A rész-csiripecknél null a jelszint



- **UWB Bevezető**

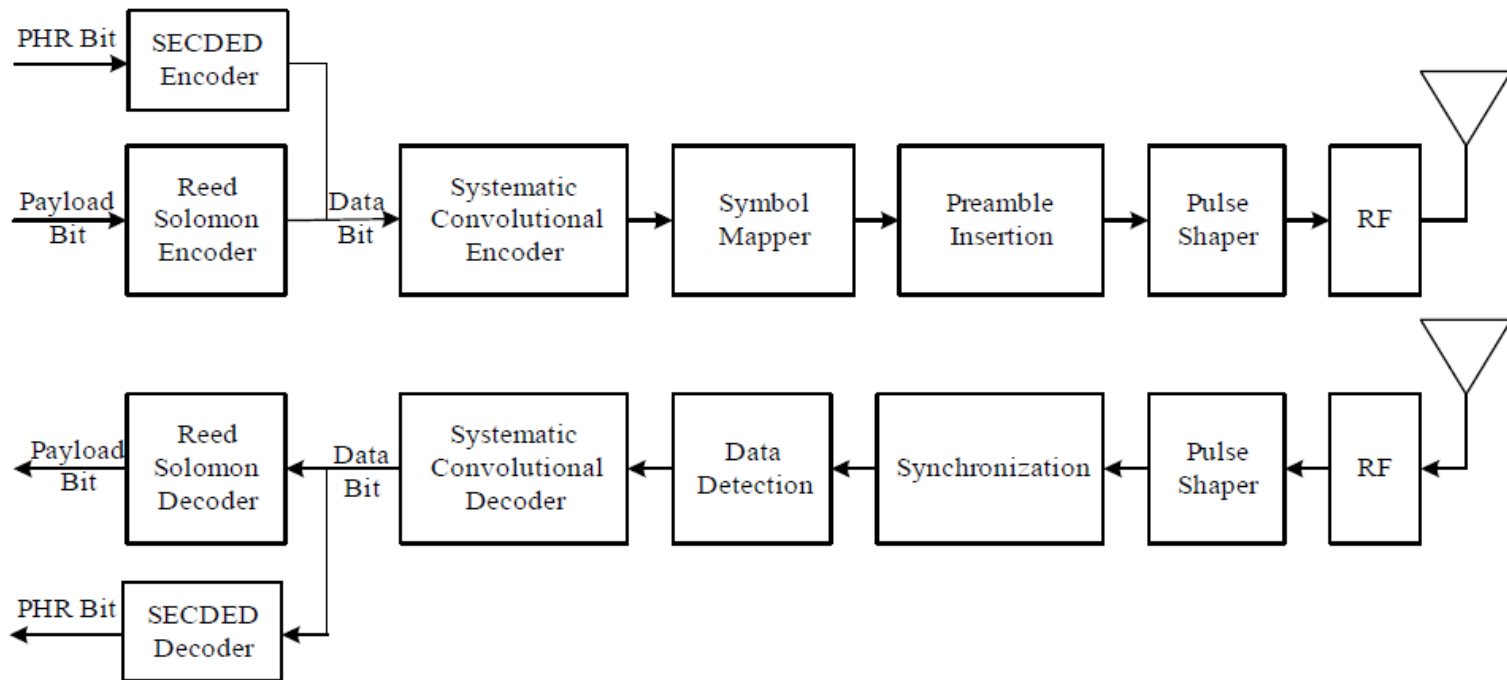
- Az UWB általában véve olyan rádiós technológia, mely
 - ...a sávközép frekvencia 20%-ánál nagyobb sáv szélességet használ
 - vagy a sáv szélesség nagyobb, mint 500 MHz
- Rövid impulzusok az információ átvitelére
- Az UWB által használt impulzusok nagyon keskenyek
 - A vevő nagy pontossággal szét tudja választani az egyes impulzusokat
 - A többutas terjedésből fakadó problémák kezelhetők
 - „időtartományban keskeny = frekvenciatartományban széles”
- Az UWB egyaránt alkalmas precíz helymeghatározásra és nagysebességű adatátvitelre
 - A rövid impulzus alkalmas jelterjedési idő mérésére

- UWB Bevezető

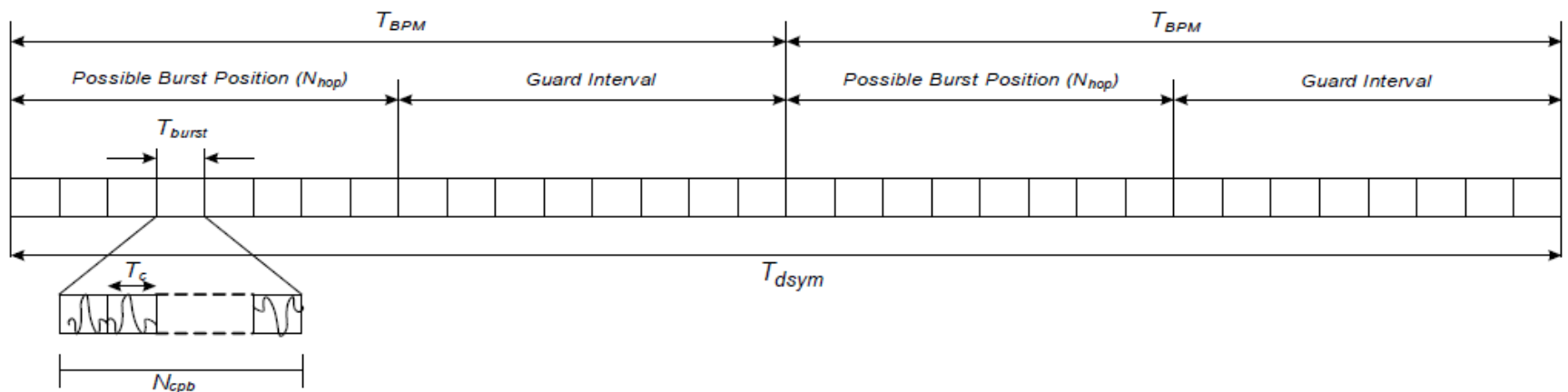


802.15.4a - UWB

- Az alapvető különbség az eddig tárgyalt összes rádiós technológiával, hogy nem a vivő fázisa/frekvenciája/amplitúdója viszi az információt
 - Hanem rövid impulzusokat sugárzunk
 - Burst Position Modulation
 - Az szállítja az információt, hogy **hol** van az impulzus

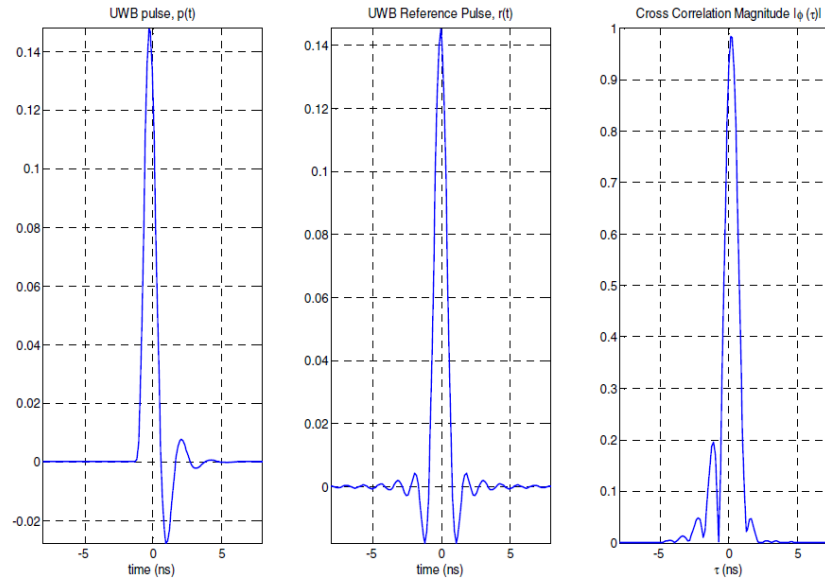


- Az alapvető különbség az eddig tárgyalt összes rádiós technológiával, hogy nem a vivő fázisa/frekvenciája/amplitúdója viszi az információt
 - Hanem rövid impulzusokat sugárzunk
 - Burst Position Modulation
 - Az szállítja az információt, hogy **hol** van az impulzus
 - Két bit információ: egy a pulzusok elhelyezkedése, egy pedig a pulzusok polarizációja (+-)
 - Az UWB szimbólumok felépítése



- Az alapvető különbség az eddig tárgyalt összes rádiós technológiával, hogy nem a vivő fázisa/frekvenciája/amplitúdója viszi az információt
 - Hanem rövid impulzusokat sugárzunk
 - Burst Position Modulation
 - Az szállítja az információt, hogy **hol** van az impulzus
 - Két bit információ: egy a pulzusok elhelyezkedése, egy pedig a pulzusok polarizációja (+-)
 - Időugratás
 - A szimbólum első felében nem ugyanakkor kerülnek kiküldésre a borsztök
 - Ez segít a más adóktól jövő esetleges interferencia elnyomásában
 - Többutas terjedés: a védőintervallum emiatt kell a szimbólumban
 - Alkalmazható bitsebességek különböző paraméterekkel
 - 110 kbps, 850 kbps, 6.81 Mbps, 27.24Mbps

802.15.4a - UWB



- **Pulzus-alak:**

- A szabvány egy referencia jelalakot ad meg
 - Valamint az ezzel való korrelációs követelményt
 - A vevő is korrelátor lesz

Channel number	Pulse duration, T_p (ns)	Main lobe width, T_w (ns)
{0:3, 5:6, 8:10, 12:14}	2.00	0.5
7	0.92	0.2
{4, 11}	0.75	0.2
15	0.74	0.2

802.15.4a - UWB

- Ranging = távolság becslés a cél és a forrás node-ok között
 - Time-of-Arrival (TOA) alapján
- Forrás node pozíciója ismert
 - Cél node pozíciója egy d sugarú körön helyezkedik el

$$d = c \times t$$

- Forrás és cél node szinkronizációja szükséges
 - TOA a forrás által küldött jel beérkezési idejét reprezentálja
 - Time of Flight (TOF) kell:
 - Tehát protokoll feldolgozási idők nélküli terjedési idő
- 802.15.4a az első szabvány, mely a vezeték nélküli ranging számára speciális PHY képességeket szolgáltat
 - Távolság alapján trilateráció, vagy egyéb módszerek

- Három különböző ranging protokollt definiáltak
 - Two Way Time of Arrival (TW-TOA)
 - Alap ranging protokoll
 - Kötelező implementáció
 - Symmetric Double Sided (SDS) TW-TOA
 - Még pontosabb pozicionálásra képes
 - opcionális
 - Private Ranging
 - A ranging üzenetcsere védelme, a hely információt harmadik fél ne tudja becsülni

802.15.4a - UWB

- Alap TOA

- A cél node jelzi a forrás által küldött jel beérkezési idejét
- A beérkezési idő alapján forrás node képes kiszámítani a TOF-ot
- Elengedhetetlen a két node szinkronizációja

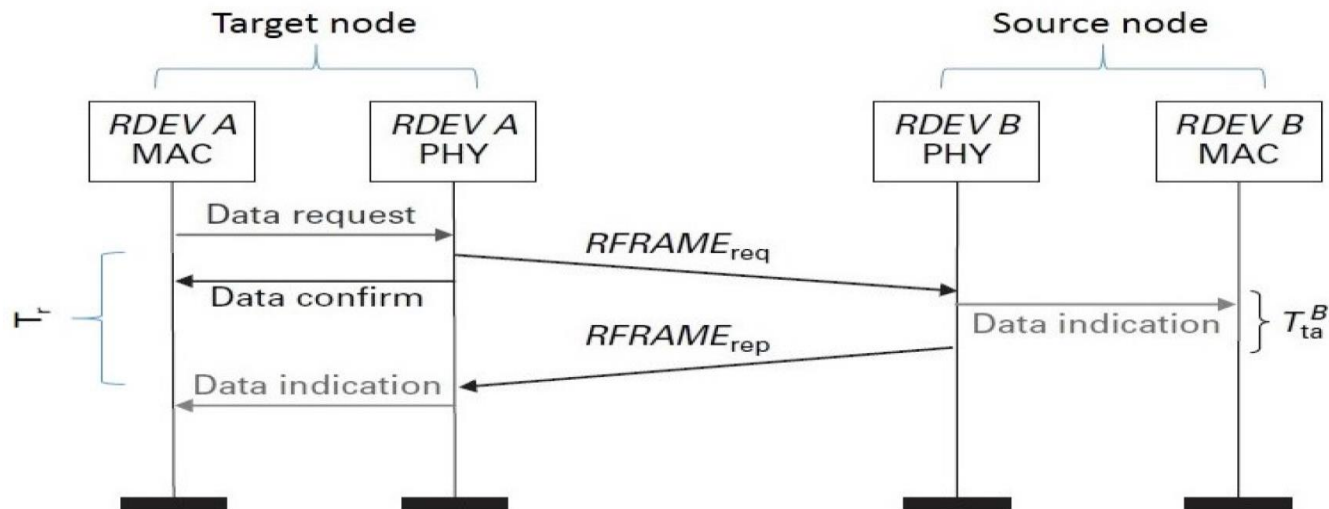
- TW-TOA

- Szinkronizáció nem szükséges a működéséhez
- Lépései:
 1. A cél node ranging kérést (RFRAMEreq) küld a forrás node-nak és feljegyzi a küldés időpontját (T_1)
 2. A forrás node ranging válasz (RFRAMERep) üzenettel felel a kérésre
 3. A cél node feljegyzi a válasz beérkezésének időpontját (T_2)
 4. A cél node kiszámolja a körülfordulási időt (T_r): $T_r = T_2 - T_1$
- Ez alapján a TOF a két node között: $T_{TW} = T_r/2$
- A két node közötti távolság pedig: $d = c \times T_{TW}$

802.15.4a - UWB

- TW-TOA

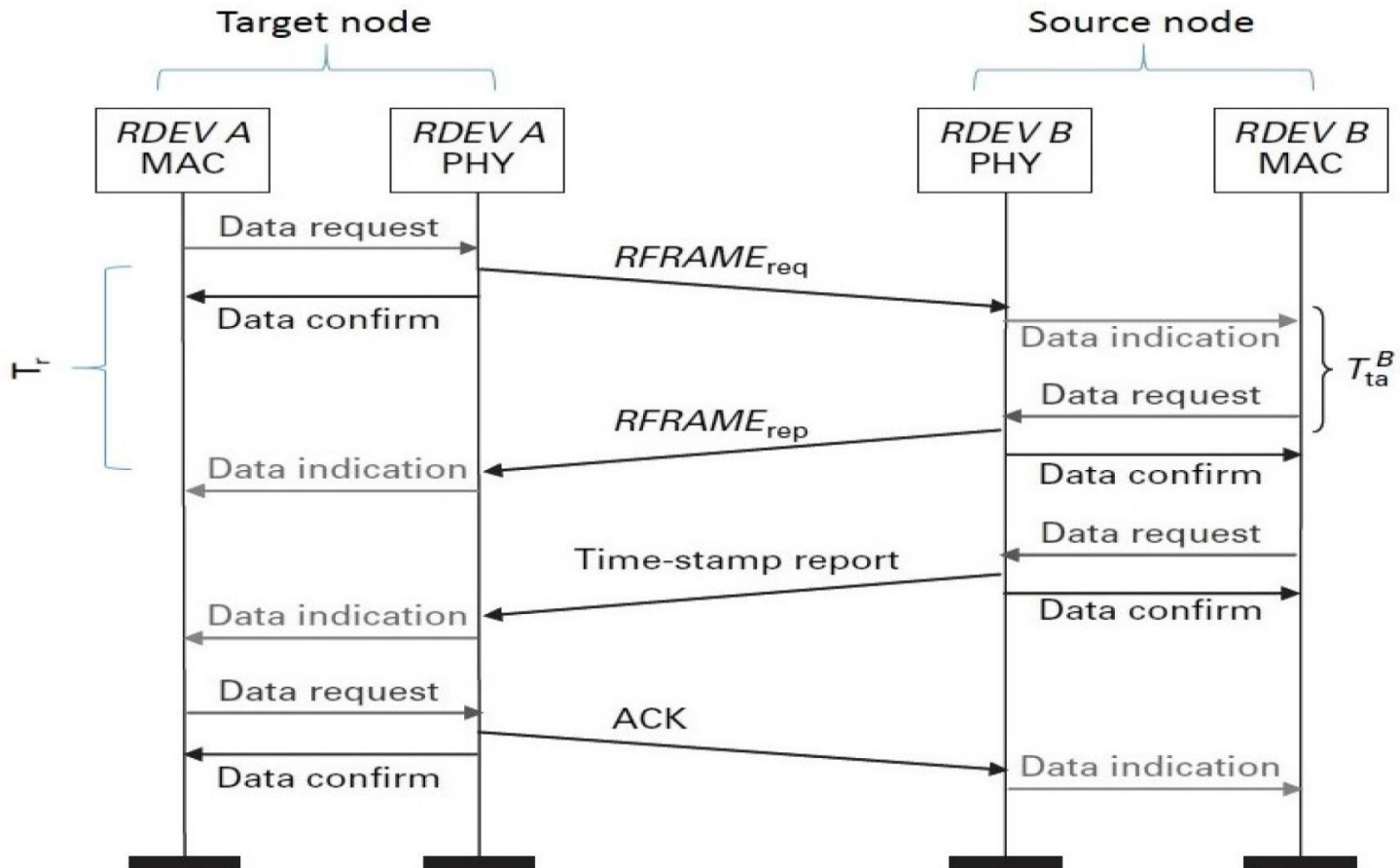
- 3 forrás node pozíciója és tőlük mért 3 távolság alapján a cél node pozíciója pontosan kiszámítható (idealizált esetben)
- A valóságban azonban a forrás node-nál van némi késleltetés az RFRAME_{req} üzenet vétele és az RFRAME_{rep} üzenet elküldése között (T_{ta}^B)
- T_{ta}^B a us tartományban van, de ns pontosságú becslése szükséges, ez nagyságrendileg 30 cm-es távolságbecslési hibát eredményez
 - Nagyon pontos becslése szükséges a pontos pozicionáláshoz



802.15.4a - UWB

- TW-TOA**

- A TOF így:
$$T_{TW} = \frac{T_r - T_{ta}^B}{2}$$

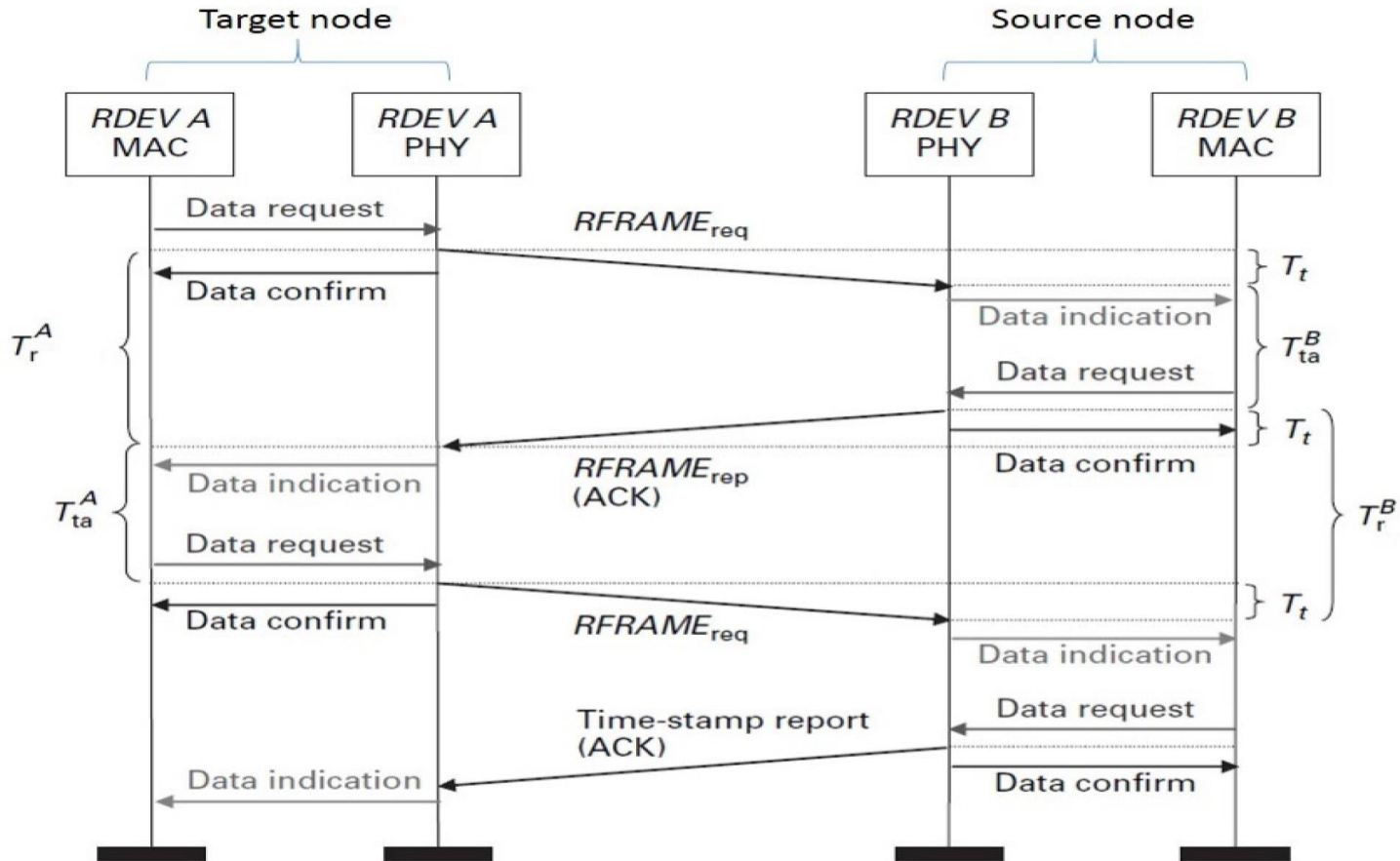


- **SDS (Symmetric Double Sided) TW-TOA**
 - A TW-TOA becslése során hibák keletkezhetnek:
 - Az eszközökben működő órák eltolódása, amit a kristály oszcillátorok apró, a névleges frekvenciától való eltérése okoz
 - Az SDS protokoll célja ezen offset hiba kiküszöbölése
 - A cél node az első RFRAMEREp üzenet vétele után küld egy második RFRAMEREq üzenetet is a forrásnak
 - Mindkét node becsli a T_r és T_{ta} időket
 - Végül, a forrás node elküld egy időbélyeget, mely tartalmazza az általa mért T_r és T_{ta} időket
 - Majd a cél node a következő módon becsli a TOF értékét:

$$T_{SDS} = \frac{(T_r^A - T_{ta}^A) + (T_r^B - T_{ta}^B)}{4}$$

802.15.4a - UWB

- SDS (Symmetric Double Sided) TW-TOA



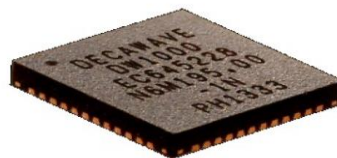
802.15.4a - UWB

- **Bizonyos esetekben fontos lehet a pozíció információk titkosítása**
 - Egy támadó lehallgathatja az üzenetváltásokat és meghatározhatja a pozíciót
 - Hamis adatokkal megzavarhatja a ranging folyamatot
- **Az IEEE802.15.4a szabvány több lehetőséget is biztosít:**
 - Az időbélyegek titkosítása kiküldés előtt
 - A timestamp üzenet nélkül egy támadó nem képes meghatározni a többi üzenet alapján a távolságot a két node között
 - Dinamikus preamble választás (DPS)
 - A rangingben részt vevő node-ok egy hosszabb preamble-t használnak (127 szimbólum)
 - A forrás és a cél node megállapodnak a preamble szekvenciában
 - 8 különféle lehetőség
 - Titkosítva továbbítják az üzeneteket
 - Minden ranging folyamat előtt meg kell változtatni a preamble szekvenciát

802.15.4a - UWB

- **UWB implementáció**

- PI. DecaWave DW1000 chipset
- Elvileg 10 cm-es pontossággal képes tárgyak helyzetét meghatározni



Rate	DW1000 IC		
	Channel 2 (4 GHz, 500 MHz)	Channel 5 (6,5 GHz, 500MHz)	Reported Range Variation (+/-3σ)
Long Range Configuration, 1pm XTAL Offset, 10% PER			
110 kb/s	249 m	153 m	10 cm
Default configuration, 10ppm XTAL Offset, 1% PER [Sensitivity, WSN Data]			
110 kb/s	144 m	89 m	10 cm
850 kb/s	135 m	83 m	10 cm
6800 kb/s	102 m	63 m	10 cm
Default configuration, 10ppm XTAL Offset, 10% PER [RTLS]			
110 kb/s	226 m	136 m	10 cm
850 kb/s	152 m	94 m	10 cm
6800 kb/s	115 m	71 m	10 cm