

Vezeték nélküli technológiák energiaigényének számítása

Balogh András
BME-HIT

- Maxwell egyenletek

- Ampère-féle gerjesztési törvény: $\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
- Gauss-törvény: $\text{div}\mathbf{D} = \rho$

- Ezekből levezethető a kontinuitási-egyenlet:

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \rightarrow \text{div}\text{rot}\mathbf{H} = \text{div}\mathbf{J} + \frac{\partial \text{div}\mathbf{D}}{\partial t} \rightarrow 0 = \text{div}\mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

- Térben integrálva, majd felhasználva a Gauss-Osztrogradszkij tételt:

$$0 = \iiint \text{div}\mathbf{J}dV + \frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho dV \rightarrow 0 = \oiint \mathbf{J}d\mathbf{A} + \frac{\partial q}{\partial t} \rightarrow -\frac{\partial q}{\partial t} = I$$

- Mindezt idő szerint integrálva megkapható az adott idő alatt, adott térrészből a zárt felületen keresztül kiáramolt töltésmennyiség [As]

$$-q = \int_0^T I dt$$

Elméleti háttér

- A kiáramló töltésmennyiségből igen egyszerűen számolható az energia

$$-q = \int_0^T I dt \quad \rightarrow \quad -Uq = U \int_0^T I dt \quad \rightarrow \quad -E = \int_0^T P(t) dt$$

- **P időben nem állandó: a rádió a MAC szerint változtatja az állapotát**
 - A különböző állapotok és állapotátmenetek jellemzően különböző teljesítményszinteket igényelnek
 - Egy **P** mátrix segítségével ez egyszerűen leírható
 - Az állapotváltások nem zérus idő alatt történnek meg
 - Ezeket egy **D** (Delay) mátrixban foglalhatjuk össze
 - Minél nagyobb a rádió komplexitása, annál több állapota lehet
 - A **P** és **D** mátrixok dimenziója is ennek megfelelően növekszik
 - „i” a kiindulási állapot és „j” a célállapot

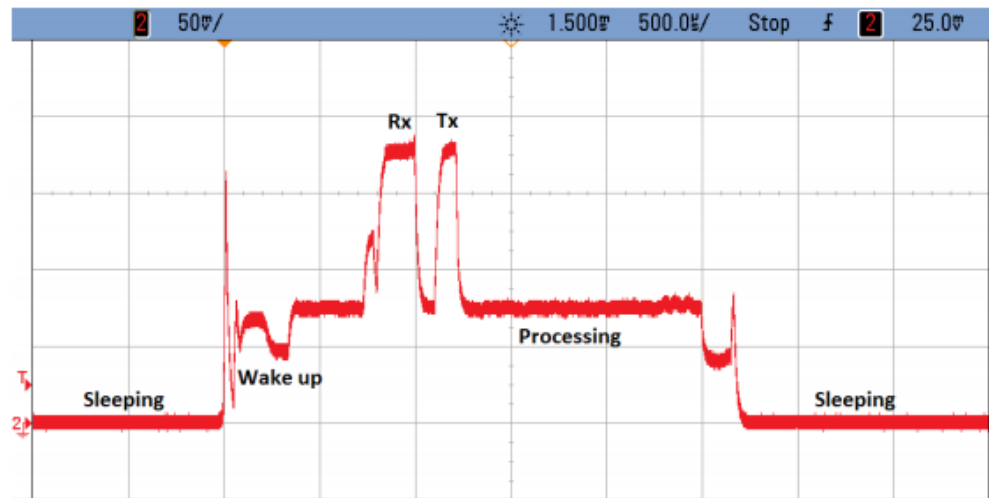
$$P = \{P_{ij}\} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}$$

$$D = \{D_{ij}\} = \begin{bmatrix} 0 & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & 0 & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & 0 \end{bmatrix}$$

Elméleti háttér

- Függően a vizsgált időperiódustól és az elvárt működéstől származtatható az energiaprofil
 - Azaz, hogy a $[0, T]$ időintervallumban mikor, milyen állapotban található a rádió, figyelembe véve az átmenetekhez szükséges időt
- Az energiaprofil ismeretében olyan időablakokra bontjuk az integrált, hogy azokon belül a teljesítmény már jó közelítéssel konstans legyen

- Illusztratív példa:
 - Bluetooth LE
 - Connection event
 - Slave szerep



$$-E = \int_0^T P(t)dt = \int_{t_1=0}^{t_2} P_{ij}dt + \int_{t_2}^{t_3} P_{ij}dt + \dots + \int_{t_{k-1}}^{t_k=T} P_{ij}dt \rightarrow$$

$$-E = \sum_{l=2}^k \int_{t_{l-1}}^{t_l} P_{ij}dt$$

Elméleti háttér

- Az abszolút idők általában irrelevánsak

- A relatív időtartamok egyszerűbben kezelhetők

$$-E = \dots + \int_{t_{l-1}}^{t_l} P_{ij} dt + \dots = \dots + P_{ij}(t_l - t_{l-1}) + \dots = \dots + P_{ij}\Delta t_l + \dots$$

- Hogyan kezelhetők a véletlen időtagok? (pl. backoff időtartamok)

- Pontosán: sehoggy

- Becslés: várható értékkel

- Minden várható értékből származtatott érték is becslés lesz (nyilván)

- Nagyobb számú T periódus esetén egyre pontosabbá válik

- Hiszen maga a T periódus is egy várható érték ilyenkor

$$-\mathbf{E}[E] = \mathbf{E}[E_{loss_T}] = E_{det} + \mathbf{E}[E_{rand}] = E_{det} + P_{ij}\mathbf{E}[\Delta t_{rand}] = E_{det} + P_{ij} \int_0^{\infty} f(t)t dt$$

- Így például egy akkumulátor várható élettartama a következőképpen számolható:

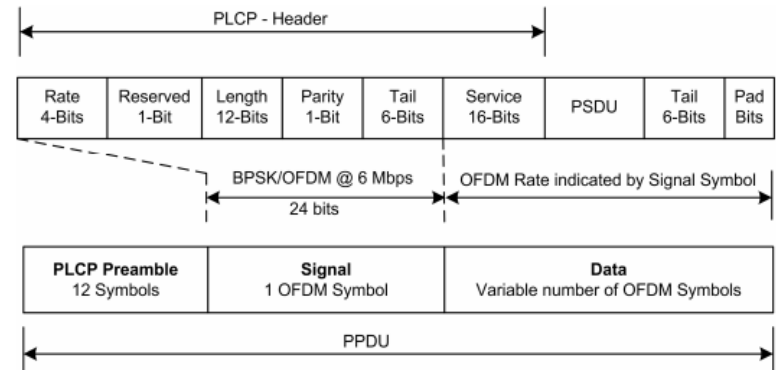
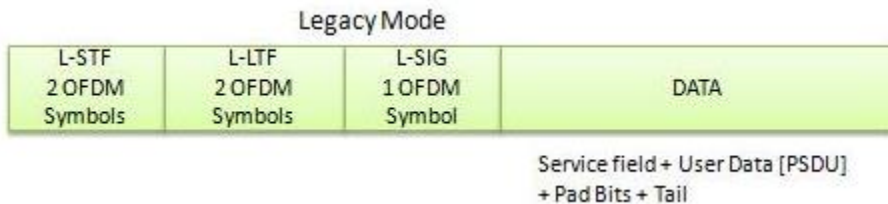
$$\mathbf{E}[T_{battery}] = \frac{E_{battery}}{\mathbf{E}[E_{loss_T}]} \mathbf{E}[T]$$

Példa: 802.11n és BLE

- **A 802.11n és BLE (Bluetooth v4.0) összehasonlítása**
 - Feladat: 100 bájt hasznos adat átvitele, majd fogadása
 - 802.11: AP és STA között
 - BLE: Central és Peripheral között
 - Az egyszerűség kedvéért:
 - Csak ezek az eszközök vannak a rendszerben
 - RTS Threshold > 100 (Nincs RTS/CTS)
 - A csomagfeldolgozási idő és a BER zérus
- **A vizsgált eszközök alaphelyzete:**
 - 802.11 STA szinkronban van az AP-val
 - Beacon interval = 100 ms
 - BLE Peripheral Connection állapotban Slave szerepben
 - connInterval = 50 ms
 - Azonos adási teljesítmények (+4dBm)
- **A becslések alapját képező modulok**
 - Texas Instruments CC3200 (802.11n STA)
 - Nordic Semiconductors nRF51822 (BLE Peripheral)

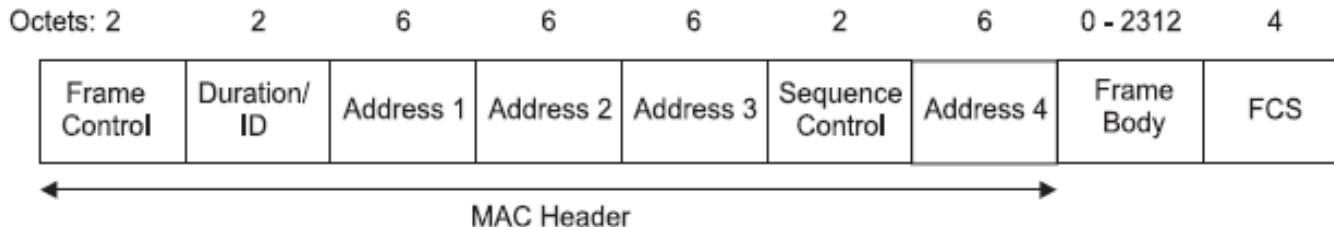
Példa: 802.11n és BLE

- A 802.11n STA (TI CC3200) által alkalmazott PHY keret
 - 20 MHz, Csak Non-HT üzemmódot támogat
 - Gyakorlatilag egy 802.11g eszköz
 - Ekkor a 802.11n-nek megfelelő PHY keretben a következők állnak
 - L-STF (Short Training Field) és L-LTF (Long Training Field)
 - 802.11a/g PLCP preambulummal ekvivalens
 - L-SIG
 - Kvázi megegyezik a 802.11a/g PLCP headerrel
 - DATA
 - Ez így a 802.11a/g ERP-OFDM PPDU-nak felel meg
 - Azaz a DSSS (802.11b) most nem támogatott (nem is kell)



Példa: 802.11n és BLE

- A 802.11n STA (TI CC3200) által alkalmazott PHY keret
 - Alap jelzési sebességen (OFDM/BPSK @ 6Mbps):
 - A preamble küldése/fogadása 16 μ s-ot vesz igénybe
 - Az L-SIG további 4 μ s-ot
 - Az adat a Rate mezőnek megfelelően
 - Legyen ez 64-QAM @ 54 Mbps
 - 2 bájt Service mező
 - PSDU (Service Data Unit) = 802.11 MAC keret
 - Ennek mérete 34 bájt + hasznos adat (100 bájt)
 - Ez így $136 \cdot 8 / 54 \approx 20 \mu$ s
 - A hasznos keret kb. 40, az ACK 25 μ s-ot igényel
 - A fogadás és a küldés is



Példa: 802.11n és BLE

- A 802.11n STA (TI CC3200) P és D mátrixai
 - Jelen IC adatlapjában nem tüntették fel az állapotátmenetekhez szükséges időket, így feltételezzük, hogy a szabvány által előírtaknak megfelelően megy végbe
 - SIFS = 10 μ s
 - Tx @ 6-54 átmenet = max. 1 μ s (Signal tail)
 - Az állapotátmenetekhez tartozó teljesítmények sincsenek feltüntetve, így azokat a kiinduló (i. sor) és a célállapotok (j. oszlop) átlagával közelítjük

Pij [mW]	Idle	Rx	Tx @ 6	Tx @ 54
Idle	3	133	360	-
Rx	0	212	439	-
Tx @ 6	0	439	666	631
Tx @ 54	0	439	-	597

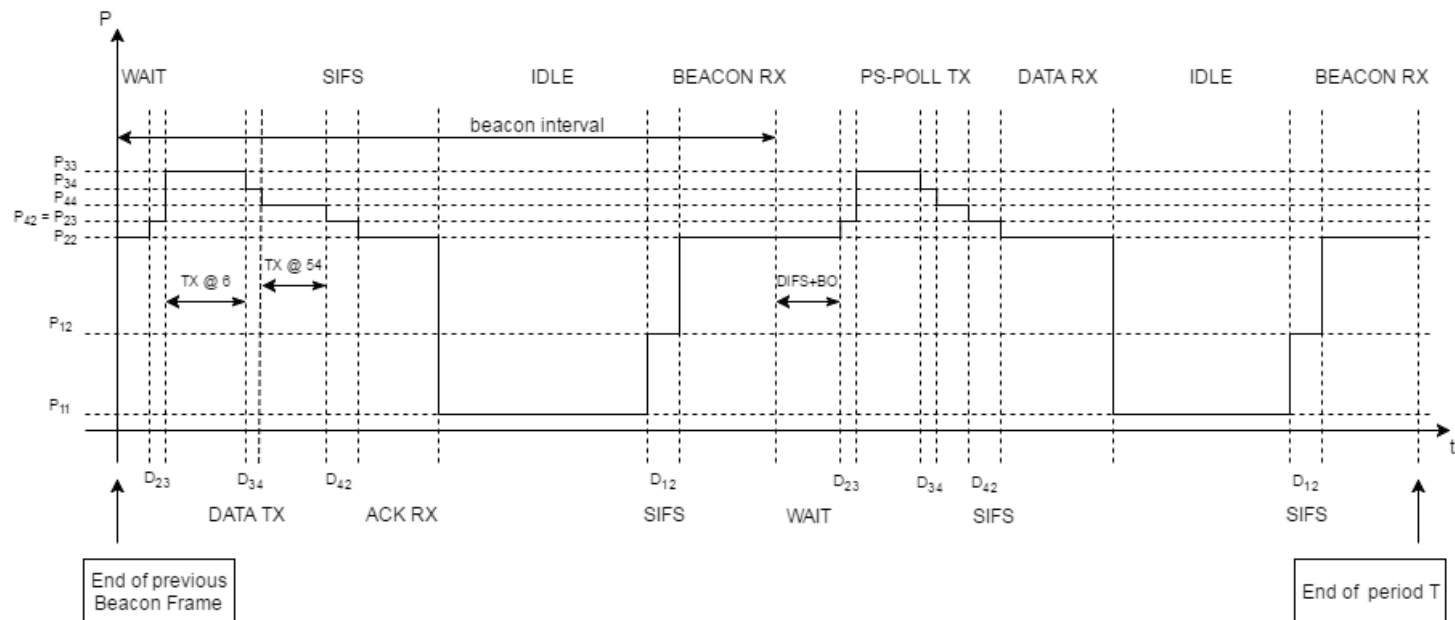
Dij [μ s]	Idle	Rx	Tx @ 6	Tx @ 54
Idle	0	SIFS	SIFS	-
Rx	0	0	SIFS	-
Tx @ 6	0	SIFS	0	1 μ s
Tx @ 54	0	SIFS	-	0

Példa: 802.11n és BLE

- **A 802.11n STA (TI CC3200) kommunikációs folyamata**
 1. A beacon csomag vételének végétől indul
 2. DIFS idő után véletlen backoff, majd adás
 3. SIFS idő után az AP nyugtájának vétele
 4. Idle állapot amíg az AP nem jelzi (beacon), hogy van a csomag számára (energiatakarékos üzemmód)
 - Legyen ez az időpont a következő beacon frame
 5. STA felébred a beacon frame-re és kivárja, amíg be nem érkezik
 - Ez szintén csak DIFS+backoff idő múlva történik meg
 6. DIFS+backoff idő elteltével PS-Poll csomag küldése
 7. Erre az AP egyből a hasznos adatot küldi SIFS idő után
 8. Idle állapot a következő beacon csomag vételéig

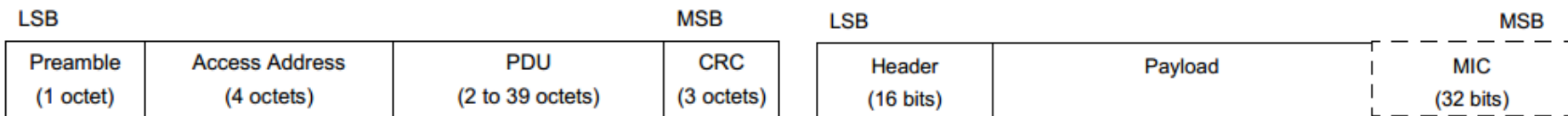
Példa: 802.11n és BLE

- A 802.11n STA (TI CC3200) energiaprofilja
 - Az előbb vázolt folyamatnak megfelelően
 - További egyszerűsítés: $\Delta t_{ack_rx} = \Delta t_{ps_poll} = \Delta t_{beacon_rx}$
 - Nem léphet fel csomagvesztés (BER = 0 és nincs más STA)
 - Így CW = 7 minden esetben
 - Azaz a Backoff várható értéke $3,5 \cdot \text{slot} = 3,5 \cdot 9 \mu\text{s}$
 - Mivel DIFS = SIFS + 2 * slot = 28 μs , a várakozási idők (Δt_{wait}) várható értéke minden esetben kb. 60 μs



Példa: 802.11n és BLE

- A BLE Peripheral (nRF51822) által alkalmazott Data PDU
 - Fix. 1 Mbps-os jelzési sebesség
 - Connection állapot, Data csatornák, Data PDU-k
 - Preamble + AA + Header + CRC + MIC = 14 bájt (14*8 µs)
 - A hasznos adat maximuma 27 bájt (a MAC szintjén)
 - V4.0-ban csak 5 bites a length mező a Headerben
 - Egyetlen PDU-ban nem tudjuk átküldeni: 4 db 25 bájtos szelet
 - A Data PDU Header MD bitjével jelezhető, ha ugyanabban a Connection eventben további forgalmazást szeretnénk végezni
 - Ennek támogatása IC-nként eltér (opcionális)
 - Az nRF51-es sorozat esetében max. 3 oda-vissza forgalmazás történhet egy CE-n belül
 - Így 2-2db CE alatt megtörténhet az adat átvitele (oda-vissza)
 - A hasznos adat fogadása ugyanannyi idő után, mint az STA-nál



Példa: 802.11n és BLE

- **A BLE Peripheral (nRF51822) P és D mátrixai**
 - Jelen IC adatlapjában minden paramétert feltűntettek
 - Mégis az egyszerűség kedvéért T_IFS idővel számolunk
 - Láthatóan lényegesen alacsonyabbak a teljesítmények az STA-nál
 - Az Idle teljesítmény több nagyságrenddel
 - A jelzési sebesség ugyanakkor 6-od, ill. 54-ed része a 802.11-nek
 - Az állapotváltások több nagyságrenddel hosszabb időt igényelnek
 - A csomagok is kisebb payload-ot tartalmazhatnak

Pij [mW]	Idle	Rx	Tx @ 1
Idle	0.0078	27	21
Rx	0	29	21
Tx @ 1	0	27	35

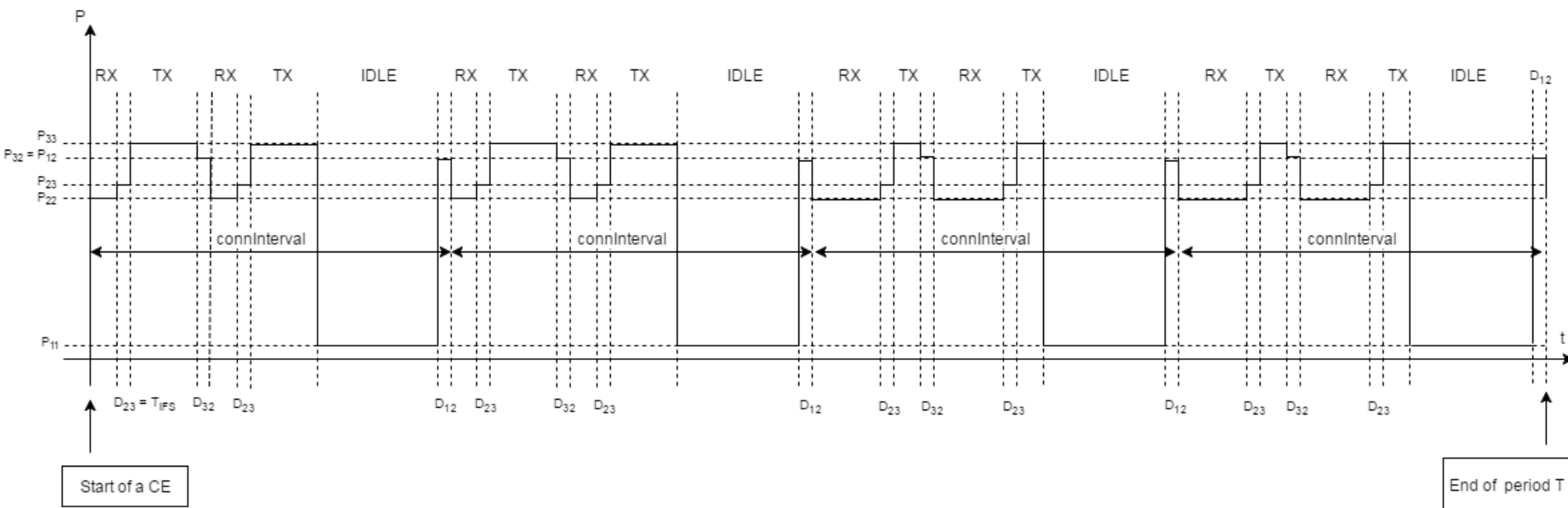
Dij [μs]	Idle	Rx	Tx @ 1
Idle	0	130	130
Rx	0	0	130
Tx @ 1	0	130	0

Példa: 802.11n és BLE

- **A BLE Peripheral (nRF51822) kommunikációs folyamata**
 1. A master első (üres) csomagjának elejétől indul (CE kezdete)
 2. A csomag vétele után $T_IFS = 150 \mu s$ -mal adás (25 bájtos szelet)
 3. Az adás vége után T_IFS idővel vétel (következő Master csomag)
 4. A csomag vétele után T_IFS idővel adás (25 bájtos szelet)
 5. Az adás vége után Sleep a következő CE-ig
 6. 1-5. lépések ismétlése a Master első nem üres csomagjáig
 7. A master első nem üres csomagjának vétele (25 bájtos szelet)
 8. A csomag vétele után T_IFS idővel adás (üres csomag)
 9. Az adás vége után T_IFS idővel vétel (következő Master csomag)
 10. A csomag vétele után T_IFS idővel adás (üres csomag)
 11. 7-8. lépések ismétlése a Master első üres csomagjáig

Példa: 802.11n és BLE

- A BLE Peripheral (nRF51822) energiaprofilja
 - CE-k között eltelt időközök: $\text{connInterval} = 50 \text{ ms}$
 - Az üres csomagokhoz szükséges idő = $112 \mu\text{s}$
 - A hasznos csomagok $(14+25)*8 = 312 \mu\text{s}$ időt igényelnek
 - Egyszerűsítés: $D_{12} = D_{13} = D_{23} = D_{23} = T_{IFS}$
 - Nincsenek a MAC-ből fakadó véletlen tagok (!)
 - A Master (Central) ütemezi a kommunikációt



Példa: 802.11n és BLE

- 802.11n STA energiaigénye (200 ms periódus)

$$\begin{aligned} \Delta t_{idle} &= 2T_{beacon} \\ &- \left(4\Delta t_{wait} + 6T_{SIFS} + 2\Delta t_{head} + \Delta t_{data} + \Delta t_{ack_{rx}} + \Delta t_{ps_{poll}} \right. \\ &\quad \left. + \Delta t_{data_{rx}} + 2\Delta t_{beacon_{rx}} \right) = 200 \text{ ms} - 380 \mu\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E[E_{loss_T}] &= P_{22}\Delta t_{wait} + P_{23}T_{SIFS} + P_{33}\Delta t_{head-1us} + P_{34}D_{34} + P_{44}\Delta t_{data} \\ &+ P_{42}T_{SIFS} + P_{22}\Delta t_{ack_{rx}} + P_{12}T_{SIFS} + P_{22}(2 * \Delta t_{wait} + \Delta t_{beacon_{rx}}) \\ &+ P_{23}T_{SIFS} + P_{33}\Delta t_{head-1us} + P_{34}D_{34} + P_{44}\Delta t_{ps_{poll}} + P_{42}T_{SIFS} \\ &+ P_{22}\Delta t_{data_{rx}} + P_{12}T_{SIFS} + P_{22}(\Delta t_{wait} + \Delta t_{beacon_{rx}}) + P_{11}\Delta t_{idle} \\ &= E_{active} + E_{idle} = 125 \mu\text{Ws} + 600 \mu\text{Ws} \end{aligned}$$

- BLE Peripheral energiaigénye (200 ms periódus)

$$\Delta t_{idle} = 4T_{conn} - (8(\Delta t_{empty} + \Delta t_{data}) + 16T_{IFS}) = 200 \text{ ms} - 5,8 \text{ ms}$$

$$\begin{aligned} E_{loss_T} &= 4(P_{22} + P_{33})\Delta t_{empty} + 4(P_{22} + P_{33})\Delta t_{data} + 8(P_{32} + P_{23})T_{IFS} \\ &+ P_{11}\Delta t_{idle} = E_{active} + E_{idle} = 160 \mu\text{Ws} + 1,5 \mu\text{Ws} \end{aligned}$$

Példa: 802.11n és BLE

- **Összehasonlítás:**
 - A 802.11n STA annál hatékonyabb, minél több adatot kell átvinni
 - Csak 2 nagyságrend a különbség az idle és az aktív állapotokhoz képest
 - „Nem szeret aludni”
 - A BLE Peripheral ennek éppen a fordítottja
 - 4 nagyságrend különbség az idle és az aktív állapotokhoz képest
 - „Szeret aludni”
 - Annak ellenére, hogy a BLE ugyanazt a feladatot nagyobb overheaddel (több idő, azaz energia) oldja meg, összességében lényegesen alacsonyabb energiafelvételt produkál
 - Mindezt lényegében a MAC tulajdonságai/előírái okozzák:
 - Lazább időzítésekkel és egyszerűbb funkciókkal csökkenthető a komplexitás, s ebből fakadóan az energiaigény is
 - Ennek ugyanakkor ára az átviendő adatok mennyiségére való rossz skálázódási képesség

Példa: iBeacon

- **Bluetooth LE Advertising Eventek energiaigénye**
 - Feladat: iBeacon funkcionalitás CR2032-es gombelemről
 - Közelség érzékelés közepes adási teljesítményen (-12 dBm)
 - 20 ms advInterval (ez az alsó korlát)
 - Non-connectable Advertising PDU-k mindhárom csatornán
 - Nincs RX ablak az adások után, ahova CONN_REQ-t lehetne küldeni
 - A rádiónak csak két állapotát érintjük (feldolgozási idő = 0)
 - Az előbbi példában megismert nRF51822 IC-t alkalmazzuk
 - A CR2032-es gombelemből kinyerhető energia: 720 mWh
- **P és D mátrixok**

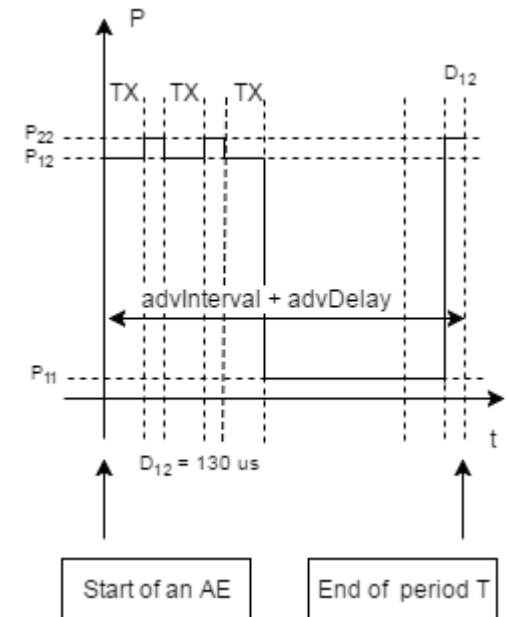
P _{ij} [mW]	Sleep	Tx @ 1
Sleep	0,0078	21
Tx @ 1	0	19

D _{ij} [μs]	Sleep	Tx @ 1
Sleep	0	130
Tx @ 1	0	0

Példa: iBeacon

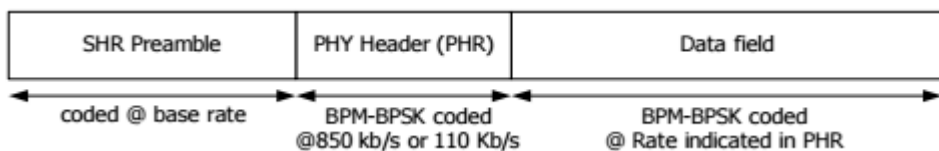
- **Bluetooth LE Advertising Eventek során alkalmazott PDU-k**
 - Az Advertising PDU-k max. 47 bájt hosszúak = 376 μ s
 - Egy iBeacon esetében ez csak 46 bájt = 368 μ s
- **Bluetooth LE Advertising energiaprofil**
 - 20ms advInterval + random advDelay 0 és 10 ms között
 - Ennek a várható értéke 25 ms
 - Átkapcsolás a frekvenciák között:
 - Jelen esetben a rádió ki és bekapcsolásával közelítjük (130 us)
 - Advertising üzemmódban nincs T_IFS (véletlen hozzáférés)
- **Várható elemélettartam (CR2032): kb. 25 nap**
 - Ha advInterval = 100 ms, akkor kb. 100 nap

$$E[T_{battery}] = \frac{E_{battery}}{E[E_{loss_T}]} E[T] = \frac{720 \text{ mWh}}{30 \mu\text{Ws}} 25 \text{ ms} = 600h$$



Példa: UWB alapú pozicionálás

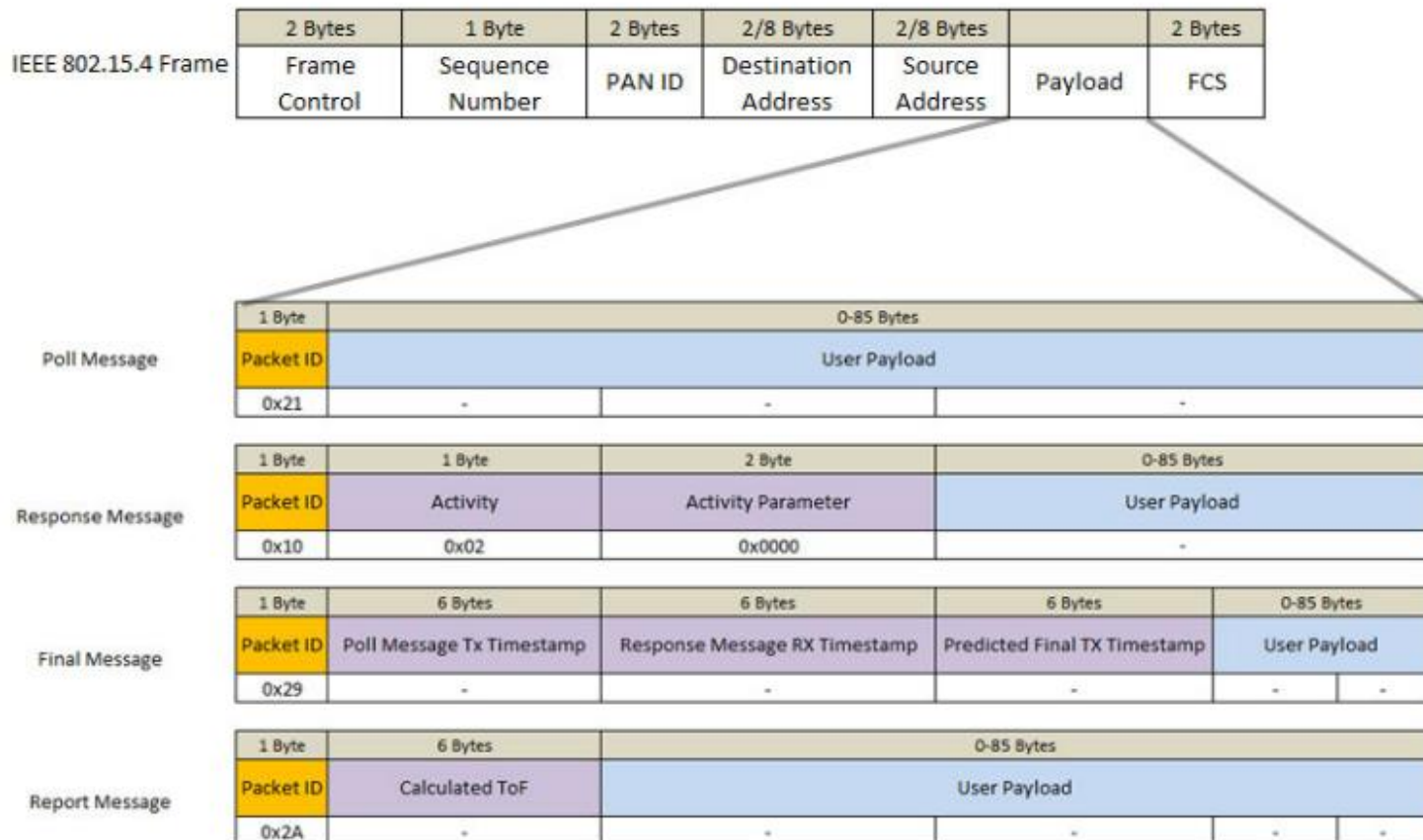
- **UWB ranging folyamat fogyasztása**
 - 1db SDS-TW-TOA 1/3 másodpercenként
 - Így 1 mp alatt származtatható a pozíció 3D-ban
 - A feldolgozási időt továbbra is zérusnak tekintjük
 - Csak egy Tag van a rendszerben (Tag: amit követünk)
- **A becslés alapjául a DecaWave DW1000-es IC-je szolgál**
- **Az UWB ranging során alkalmazott keretek: UWB PPDU (802.15.4)**
 - SHR preambulum időtartam: 72 μ s
 - A PRF (Pulse Repetition Frequency) = 16 MHz
 - ...és sok egyéb paraméter függvénye
 - PHR: 19bit/110kbps = 173 μ s
 - RNG (Ranging) bit = 1
 - Rate = 850 kbps



Bit 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
R1	R0	L6	L5	L4	L3	L2	L1	L0	RNG	EXT	P1	P0	C5	C4	C3	C2	C1	C0
Data Rate	Frame Length								Ranging Packet	Header Extension	Preamble Duration		SECDED Check Bits					

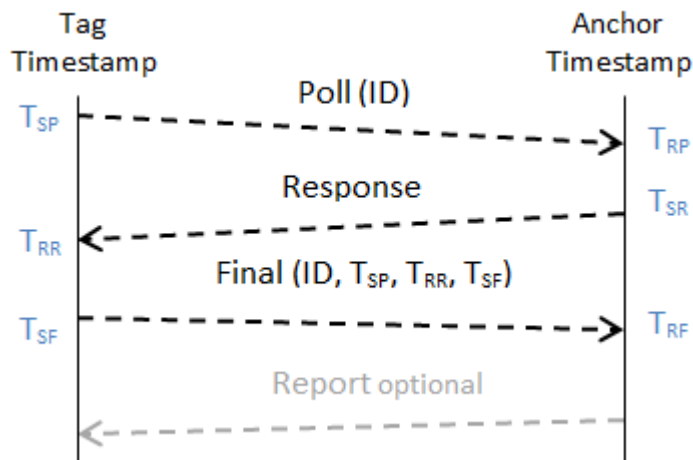
Példa: UWB alapú pozicionálás

- Az UWB ranging során alkalmazott keretek: UWB PPDU (802.15.4)
 - Data = 802.15.4 MAC Frame: 4 féle üzenettel (@ 850kbps)
 - Ezekből a Report message alkalmazása opcionális



Példa: UWB alapú pozicionálás

- Az UWB SDS-TW-TOA Ranging folyamat
 1. A Tag Poll üzenetet (12 bájtos MAC keret) küld
 - Aloha esetén egyből küld, egyből átmegy (nincs más eszköz)
 2. A küldés után megvárja a Response (15 bájt) üzenet beérkezését
 - SIFS (12 preamble szimbólum = 12 μ s) idő után érkezik
 3. SIFS idő elteltével Final Message (30 bájt) küldése
 4. Report üzenet (20 bájt) fogadása
 - Min. SIFS idő után érkezik



Példa: UWB alapú pozicionálás

- A DW1000 P és D mátrixai
 - Adás 9,5dBm/500MHz teljesítménysűrűséggel

P _{ij} [mW]	Idle	Rx	Tx
Idle	0,0036	286	253
Rx	0	528	495
Tx	0	495	462

D _{ij} [μs]	Idle	Rx	Tx
Idle	0	SIFS	SIFS
Rx	0	0	SIFS
Tx	0	SIFS	0

- Az SDS-TW-TOA energiaprofilja
 - Véletlen időtag forrása: maga a távolság, amit mérünk
 - Tételezzünk fel egyenletes eloszlást 0 és 10 m között
 - Ennek várható értéke éppen 5 m, azaz kb. 17 ns
 - Ez kb. 1000-ed része még a legkisebb (SIFS) időnek is
 - Jelen becslésből elhagyható

Példa: UWB alapú pozicionálás

- Az SDS-TW-TOA energiaprofilja:

- Poll üzenet: 245 + 113 μ s
- Response: 245 + 141 μ s
- Final: 245 + 282 μ s
- Report: 245 + 188 μ s

- Egy SDS-TW-TOA folyamat energiaigénye:

$$\begin{aligned} \Delta t_{idle} &= T_{ranging} - (\Delta t_{poll} + \Delta t_{resp} + \Delta t_{final} + \Delta t_{report} + 4 T_{SIFS}) \\ &= 333,3 \text{ ms} - 1,7 \text{ ms} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{loss_T} &= P_{33} (\Delta t_{poll} + \Delta t_{final}) + P_{22} (\Delta t_{resp} + \Delta t_{report}) + 4P_{32}T_{SIFS} \\ &+ P_{11}\Delta t_{idle} = 863\mu Ws + 1,19 \mu Ws \end{aligned}$$

- Az előbbi példában számolt gombelemet kb. 11 nap alatt meríti le

- Mivel az idle energia mértéke marginális, jó közelítéssel 3-ad ennyi időt bírna 3x ekkora gyakorisággal (pl. átlagoláshoz)

