

# Szenzorhálózatok

Fizikai és adatkapcsolati réteg (2011.10.19)

Vidács Attila

Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

I.B.228, T:19-25, vidacs@tmit.bme.hu

# Tartalom

---




## □ Fizikai réteg

- létező és spec. WSN megoldások
- energiahatékonyság



## □ Adatkapcsolati réteg

## □ Vezetéknélküli MAC technikák

- ALOHA
  - CSMA – Vivőérzékeléses többszörös hozzáférés
  - Lekérdezés (Polling)
- 

# A fizikai réteg

## Fizikai réteg:

„Azok az eszközök és eljárások, mely az adatok átviteléhez, az adatkapcsolati entitások közti fizikai összeköttetés létrehozásához, fenntartásához, és bontásához szükségesek.”

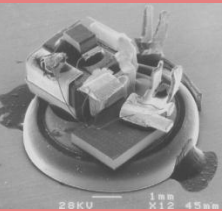
„Cross-layer design”

## ISO OSI

alkalmazási réteg
megjelenítési réteg
viszony réteg
szállítási réteg
hálózati réteg
adatkapcsolati réteg
<b>fizikai réteg</b>

# Jellemzők és követelmények

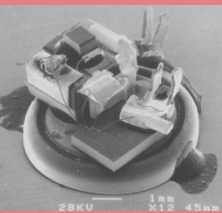
- Tipikusan nagyon kis átvitt adatmennyiség.
  - néhány bit/nap
- Inkább kisebb átviteli sebesség és nagyobb késleltetés az alacsonyabb árért és hosszabb élettartamért cserébe.
  - PI: Egy (vagy több) év üzemidő 750 mAh AAA elemmel
- Univerzális (globális), licenz nélküli üzemeltethetőség.
  - Nagyban limitálja a lehetséges frekvenciasávot és modulációt




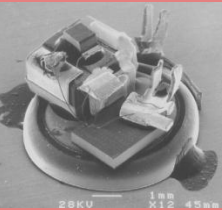

# Példák a fizikai rétegre

---

- Szenzorhálózatokban a kommunikáció történhet elektromágneses (RF, IR) vagy akusztikus úton.
- Létező rádiófrekvenciás (RF) megoldások:
  - Bluetooth
  - IEEE 802.11b (WLAN)
  - (IEEE 802.15.4)
- Speciális WSN megoldások
  - PicoRadio
  - WINS
  - $\mu$ AMPS



# Bluetooth

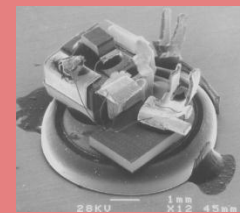
- 
- 
- 
- ❑ WPAN (Wireless Personal Area Network) megoldás
  - ❑ 2.4 GHz ISM sáv
  - ❑ Moduláció: 1 MBaud bináris GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)
  - ❑ frekvenciaugratásos szórt spektrumú (FHSS), 1600 ugrás/mp, 79 db 1-MHz-es csatorna (USA-ban)

## Problémák WSN alkalmazásnál:

- ❑ A hálózatfelderítés FHSS esetében hosszadalmas, mert a node-ok aszinkron működésűek.
- ❑ A viszonylag keskenysávú (1MHz) moduláció miatt a csatornaszűrő megvalósítása bonyolult és költséges.
  - (Az alacsony-frekvenciás áramkörti elemek nagy mérete és a nagy kapacitorok, valamint a nagy „warm-up” periódus miatt.)
- ❑ A közeli csatornák szétválasztása is bonyolult.

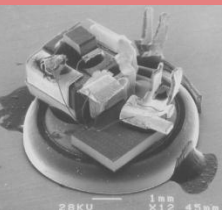
# IEEE 802.11b

- ❑ WLAN (Wireless LAN) szabvány
- ❑ 2.4 – 2.5 GHz ISM sáv
- ❑ 14 db 22 MHz-es átlapolódó csatorna, 5 MHz-enként (USA-ban csak az első 11 használható)
- ❑ 802.11 szabvány három 1 Mb/s (ill. 2 Mb/s) fizikai réteg opciót definiál:
  - infravörös (IR)
  - frekvenciaugratásos szórt spektrumú (FHSS)
  - direkt szekvenciális szórt spektrumú (DSSS)
    - ❑ 1 Mb/s esetén: különbségi bináris fázisugratás (DBPSK)
    - ❑ 2 Mb/s esetén: különbségi kvadratúra fázisugratás (DQPSK)
- ❑ 802.11**b**: kiterjesztés 5.5 Mb/s-ra ill. 11 Mb/s-ra
  - Complementary Code Keying (CCK), 11 Mc/s és DQPSK, 8 bit/szimbólum





# IEEE 802.11b

- Az eredeti 1 és 2 Mb/s-os direkt szekvenciális 802.11 fizikai réteg egy lehetséges megoldás WSN-ek esetében:
  - Egyszerű hardver.
  - Megfelelő adatátviteli sebesség.
  - A direkt szekvenciális kódolás mentes a frekvenciaugratásos módszerek hátrányaitól.
  - Hátrány: A 11 Mc/s-os chip-sebesség túlságosan magas egy alacsony fogyasztású eszköznek.
- A 11 Mb/s-os 802.11b kiterjesztés energiafelhasználása és ára (komplexitása) messze meghaladja egy WSN korlátait!





# PicoRadio

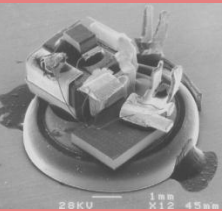
- 
- 
- 
- PicoRadio program
    - Uni California (Berkeley), 1999
  - DSSS, CSMA MAC protokól
  - UWB (ultrawide band)
    - Könnyen integrálható, a sávszélesség-hatékonyság nem annyira fontos.
    - Fontos tulajdonsága: „wake-up” rádió „sleep” móddal

## „Wake-up” rádióvevő:

- $1\mu\text{W}$  átlagos teljesítménnyel működik
- A „wake-up” jel vételekor „felébreszti” a fő rádiót.
- A „wake-up” jel tartalmazza az állomás ID-jét, így csak a szükséges csomópontok ébrednek fel.
- Nincs szükség a node-ok közötti szigorú időszinkronra.

# WINS

- WINS – Wireless Integrated Network Sensors Project
  - Uni California, Los Angeles és Rockwell Science Center
  - 1998-ban piacra vitték Sensoria Corp. néven (San Diego)
- Szórt spektrumú, 900 MHz vagy 2.4 GHz ISM sávban
- CMOS technológiára épült és optimalizált az alacsony előállítási költség miatt.



# $\mu$ AMPS

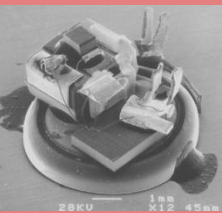
---

## □ $\mu$ AMPS Program

- Massachusetts Institute of Technology (Cambridge)
- Teljes WSN rendszer, hangsúly az energiatakarékosság.
- (LEACH – Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy protokoll kifejlesztése, ld. később)

## □ Cél a „sleep time” maximalizálása

- többszintű jelzés
- „start-up” energia problémája a sleep->aktív átmenet esetén



# Fizikai réteg tervezési kérdései

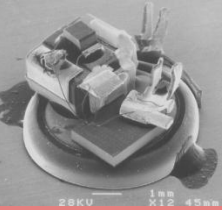
---

- A két legfontosabb követelmény:

**alacsony ár**

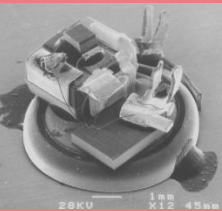
és

**hosszú élettartam.**



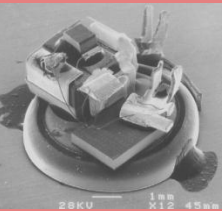
# Ár, mint tervezési kérdés...

- A fizikai réteg költsége elsősorban a hardver ára
  - chip-ek ára + külső alkatrészek ára
- Cél: egyetlen chip + antenna + elemek
  - (Az antenna és az elemek integrálása nem lehetetlen, de nehéz.)
- Az egyik legnehezebb feladat a referencia frekvenciához használt kvarc kristály integrálása.
  - Lehetséges alternatíva: MEMS (mikro-elektromechanikai) rezonátor
  - Egyenlőre azonban még nem kiforrott technológia, a pontossággal és stabilitással bajok lehetnek.
- Következmény: Olyan fizikai réteget tervezünk, amely nem követel meg túl szigorú előírásokat a rezonátorral szemben.



# Ár: analóg kontra digitális

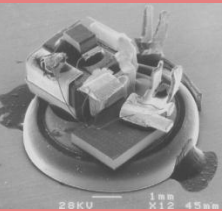
- A chip árát befolyásolja az analóg és digitális integrált alkatrészek aránya.
  - A digitális elemek mérete a litográfiai eljárások fejlődésével csökken.
  - Az analóg elemek mérete tipikusan nem csökken a technológia fejlődésével. (Pl. passzív komponensek paraméterei a fizikai méreteik függvénye, pl. kapacitor felület)
- A lehetséges két alternatíva:
  - Analóg elemek „nagy” dimenziójú „rég” (és ezért olcsó) technológiával.
  - Csak digitális komponensek, új technológia, így apró (és ezért olcsó) áramkörök.
- Hosszú távon a trend az „all-digital” technológiának kedvez.
  - Az RF áramkörök energiafogyasztása is a mérettel arányos.



# Ár: csatornaszűrő...

---

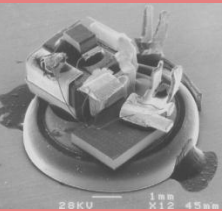
- Az RF adóvevők egyik legnagyobb alkatrésze a vevő-oldali csatornaszűrő.
  - Analóg esetben szükségesek nagy méretű kapacitorok.
  - Digitális esetben az AD konverter elé szükséges egy anti-alias szűrő.
- A csatornaszűrő mérete fordítottan arányos a szűrő sarokfrekvenciájával (azaz egyenesen arányos az árával).
- Következmény: Olyan fizikai réteget tervezzünk, ahol a szükséges vevőszűrő sarokfrekvenciája maximális (azaz nagy sáv szélességű).



# Ár: nagy darabszám...

---

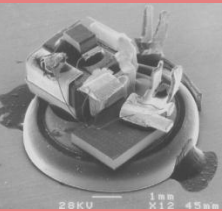
- Nagy darabszám csökkenti az egységárat.
- Következmény: Olyan fizikai réteget tervezzünk, amely összhangban van a lehető legtöbb ország szabályozási környezetével.
- Megoldás: ISM sáv használata
  - (De melyik? 2.4 GHz, 5.8 GHz vagy 24 GHz?)





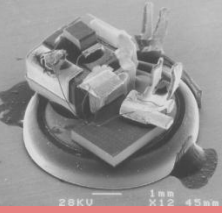
# Ár: rendelkezésre álló technológiák...

- Magas (pl. 60 GHz) frekvenciatartományban működő áramkörök gyártástechnológiája (pl. SoC szilikon CMOS) jelenleg még drága és nem energia-optimális.
- Alacsony (pl. 1 GHz) frekvencián a node mérete miatti kis antenna okoz problémát.
- A megfelelő ISM sáv kiválasztása egy kompromisszum az ár és energiafogyasztás, valamint a méret és antenna-hatékonyság között.
- Jelenlegi optimum: 2.4 GHz ISM sáv



## 2.4 GHz ISM sáv

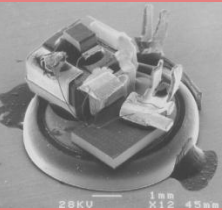
- A 2.4 GHz-es ISM sáv jelenleg egyáltalán nem „üres”:
  - Pl. IEEE 802.11b (Wi-Fi) WLAN, Bluetooth WPAN
  - A különböző technológiák más-más csatornahozzáférési stratégiát használnak -> erősen „unfair” lehet!
  
- A különböző szolgáltatások együttélése és kompatibilitása a fizikai réteg tervezésének kulcskérdése!
  - Pl: szórt spektrumú megoldások a robusztusság miatt
  
- Lehetséges alternatíva: 3.1-10.6 GHz UWB (ultra-szélessáv)
  - Helymeghatározási képesség nagyon jó (néhány cm).
  - Nagy node-sűrűség lehetséges.
  - Egyelőre csak az USA-ban szabványos.



# Energiafelhasználás (élettartam)

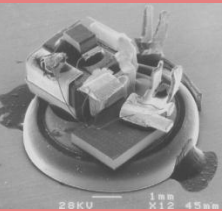
---

- Az energia-probléma két komponense:
  1. Az energiaforrás (elem)
  2. A rendszer energiafogyasztása.



# Energiaforrások

- A szenzorok alacsony energiafogyasztása ( $\sim 50 \mu\text{W}$ ) lehetővé teszi újszerű energiaforrások használatát
  - Pl: napenergia-cella, RF, mechanikus vibrációs eszközök
- A „hagyományos” szárazelemek mégis a legáltalánosabbak.
- Töltésmegújulás jelensége: Egy elem kapacitása sorozatos impulzusokkal kisütve jóval nagyobb, mint folyamatos állandó lemerítés esetében.
- WSN esetében a börsztös adatküldés mellett az alacsony átlagos energiafogyasztás kiválóan illeszthető a jelenséghez: a nagy fogyasztású komponensek (pl. rádióadó) aktiválása csak rövid időkre, megfelelően nagy időközönként.



# Energiafogyasztás - példa

- 2db AAA elem (750 mAh), 1 éves élettartam (8760 óra)

$$I_{avg} = 750mAh / 8760h = 86\mu A$$

- Átlagos felvett teljesítmény (1.8 V feszültségszabályozóval)

$$P_{avg} = 1.8V \cdot 86\mu A = 154.8\mu W$$

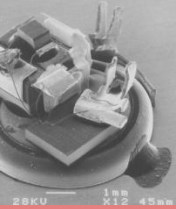
- Tipikus 2.4 GHz CMOS adóvevő 32 mW teljesítménnyel ad és 38 mW teljesítménnyel vesz. (átlag  $\sim 35$  mW)

$$I_{on} = 19.5mA \quad I_{stby} = 30\mu A$$

- Ekkor az

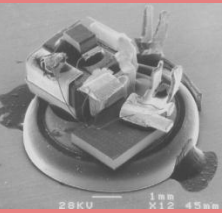
$$I_{avg} = T_{on} \cdot I_{on} + (1 - T_{on}) \cdot I_{stby}$$

- összefüggésből:  $T_{on} = 0.0029$



# Energiafogyasztás

- $T_{on}=0.0029$  praktikusan 4 perc naponta.
- A kevés információközlés ellenére az aktív kommunikáció időtartama alatt nagy bitsebességet követel meg.
- $T_{on}$  tartalmazza a „warm-up” periódust is.
  - Sok de rövid kommunikáció esetében a „warm-up” periódusokban elfolyó áram lehet a döntő!
- A DSSS rendszerek 250 kbps (nyers) adatátviteli sebességgel előnyösek.



# Tartalom

---




## □ Fizikai réteg

- létező és spec. WSN megoldások
- energiahatékonyság



## □ Adatkapcsolati réteg

## □ Vezetéknélküli MAC technikák

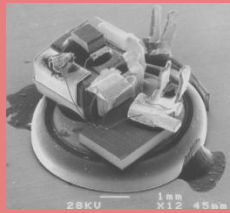
- ALOHA
  - CSMA – Vivőérzékeléses többszörös hozzáférés
  - Lekérdezés (Polling)
- 

# Adatkapcsolati réteg

## □ Adatkapcsolati réteg fő feladatai:

- keretképzés
- hibadetektálás és -javítás
  - pl Hamming kód, CRC, Go-Back-n
- forgalomszabályozás (flow control)
  - pl: ACK, Stop&Wait
- közeghozzáférés vezérlése  
**MAC – Medium Access Control**

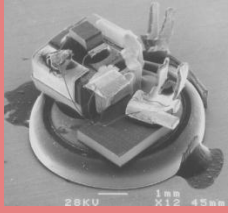
ISO OSI





# Közeghozzáférés vezérlése (MAC)

- A hálózatokat két csoportba oszthatjuk:
  1. **pont-pont** közötti összeköttetés bármely két csomópont között
  2. **üzenetszórásos** csatorna az összes csomópontnak
  
- Pont-pont összeköttetés esetén a csatorna dedikált, nincs szükség MAC-re.
  
- Üzenetszórásos csatorna esetében a fő kérdés:  
**„A közös csatorna hozzáférési jogáért folytatott küzdelemben ki lesz a győztes?”**
  
- *Alternatív elnevezések:*
  - *Többszörös hozzáférésű = Multiple Access*
  - *Véletlen hozzáférésű = Random Access*



# Közeghozzáférés vezérlése (MAC)

---

□ A csatornakiosztás lehet **statikus** vagy **dinamikus**

□ **Statikus** megosztási módszerek:

- frekvenciaosztásos (FDM – Frequency Division Multiplexing)
- időosztásos (TDM – Time Division Multiplexing)
- kódosztásos (CDM – Code Division Multiplexing)

Hátrány: Nagy állomásszám és/vagy nem egyenletes forgalom esetén a kihasználtság drasztikusan lecsökken.

□ **Dinamikus** csatornakiosztás esetén a változó igényeknek megfelelően oszthatjuk ki a csatornahozzáférés jogát.



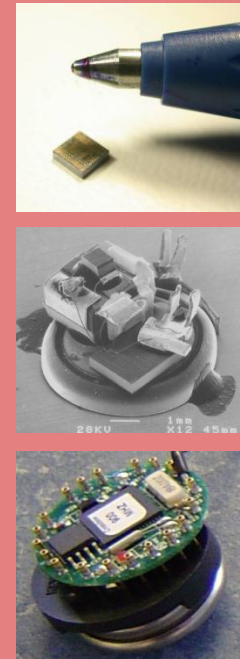
# MAC – Feltételélézések, követelmények

## □ **Feltételezések** a csatornakiosztás vizsgálatánál:

- $N$  független állomás, egymással kommunikálnak
- Egyetlen csatorna, minden állomás ezen ad és vesz
- **Ütközés: Ha két keretet időben átlapolódik, a jelek összekeverednek, ütközés lép fel.**
- Az ütközést az összes állomás érzékeli.
- Folyamatos idő vs. résekre osztott idő.
- Csatornafigyelés: Képesek-e az állomások adás előtt megállapítani, hogy a csatornát már használja-e valaki?

## □ Spec. WSN **követelmények**:

- A node-ok aktív részvétele csak az idő kis töredékében biztosítható. (energiatakarékosság)
- Az frekvenciagenerátorok (MEMS, olcsó kristály) pontossága csekély, így az időosztásos technikák nem hatékonyak.
- Egyszerűen implementálható (olcsó) megoldások.



# Közeghozzáférési (MAC) technikák

---

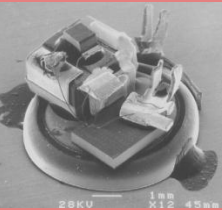
## □ Vezetéknélküli MAC technikák

- ALOHA
- CSMA – Vívőérzékeléses többszörös hozzáférés
- Lekérdezés (Polling)

## □ Szenzorhálózati megoldások

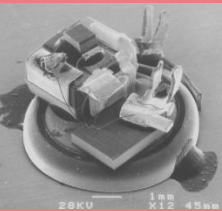
- WINS
- PicoRadio

## □ MD (Mediation Device) protokoll


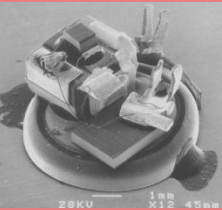



# ALOHA

- Az első, véletlen hozzáférésű vezeték nélküli MAC.
- Csillag hálózati topológia, a központban egy vezérlővel.
- Külön csatornák a be- és kimenő forgalomnak.
- Az állomások a csatornához aszinkron módon férnek hozzá.
- Ütközés után az állomások újra próbálkoznak egy véletlen várakozási idő után.
- Poisson érkezési folyamat esetén az áteresztőképesség:  $Ge^{-2G}$ , ahol  $G$  a felajánlott forgalom.
- Az elérhető maximális áteresztőképesség:  $1/(2e)=0.184$ .
- Spec: réselt ALOHA-val a csatornakihasználtság javítható
- WSN szempontból a csillag topológia a mester csomóponttal nem megfelelő.



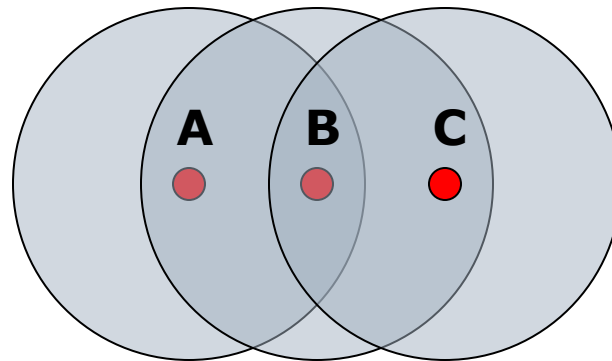
# CSMA – Vívőérzékeléses többszörös hozzáférés

- 
- 
- 
- CSMA alapú protokoll-család, az ALOHA csatorna-kihasználtságán próbál meg javítani.
  - Alapötlet: **Minden állomás az adás előtt belehallgat a csatornába, és csak akkor kezd el adni, ha a csatorna szabad.**
  - nem-perzisztens CSMA:
    - Ha a csatorna szabad, továbbítja a csomagot.
    - Ha a csatorna foglalt, egy véletlen ideig várakozik, majd újra próbálkozik.

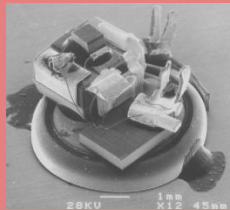
Hátrány:

    - A várakozás ideje alatt a csatorna kihasználatlan.
    - Ha a csatorna szabaddá válik, egyszerre többen is próbálkozhatnak adással.
  - $p$ -perzisztens CSMA:
    - Ha a csatorna szabad,  $p$  valószínűséggel azonnal ad,  $(1-p)$  valószínűséggel viszont várakozik.
    - A  $p$  paraméter optimális értéke a forgalom függvénye.

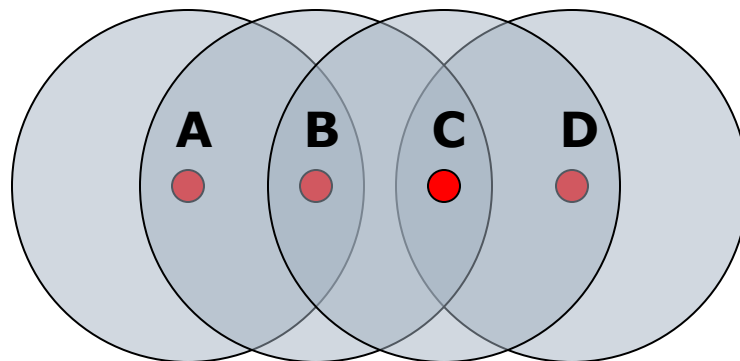
# CSMA – rejtett terminál problémája



- A éppen ad B-nek.
- C is szeretne adni B-nek. Belehallgat a csatornába, üresnek találja azt, ezért elkezd adni.
- B-nél interferencia lép fel, a csomagok elvesznek.



# CSMA – látható terminál problémája

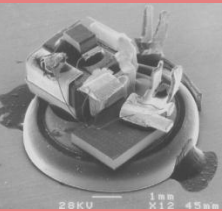


- ❑ B éppen ad A-nak.
- ❑ C szeretne adni D-nek. Belehallgat a csatornába, de foglaltnak találja azt, így nem kezd el adni.
- ❑ A C-D kommunikáció nem jöhet létre, pedig B nem okozna interferenciát D-nél.



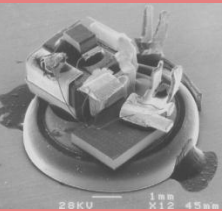
# CSMA foglalt jelzéssel

- A rejtett és látható terminál problémája jelentősen rontja a csatornakihasználást WLAN rendszerekben.
- Megoldás: „Foglalt jelzés” adása egy másodlagos csatornán
  - Az éppen csomagot fogadó állomás foglalt jelzést küld egy külön csatornán.
  - Minden állomás adás előtt ellenőrzi a foglalt jelet is.
- Hátrány:
  - A node-oknak képesnek kell lenniük egyszerre adni és venni. (Nagyobb komplexitás, nagyobb fogyasztás, magasabb ár)
  - Nagyobb sáv szélesség igény a két csatorna miatt.



# MACA – Többszörös hozzáférés ütközés elkerüléssel

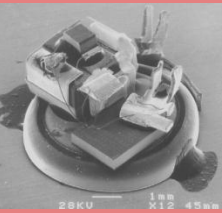
- MACA – Multiple Access with Collision Avoidance
- Ötlet: RTS-CTS („kérés küldéshez” – „szabad küldeni”) jelzéscsere a kommunikáció kezdetekor.
  - A küldő egy RTS csomagot küld a célnak.
  - Ha nem foglalt, a cél visszaküld egy CTS csomagot.
  - A küldő elkezd adni.
- További variációk RTS-CTS kézfogásra:
  - CSMA/CA (Collision Avoidance): IEEE 802.11 WLAN szabványban
  - MACAW: Xerox Palo Alto research Center
  - FAMA (Floor Aquisition Multiple Access)



# CSMA szenzorhálózatokban

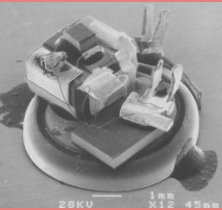
---

- ❑ CSMA alkalmazásakor probléma, hogy az állomásoknak adott ideig hallgatniuk kell a csatornát mielőtt adnának.
- ❑ Globális idősinkron hiányában, nagy szomszédszám esetén egy node különböző időkben kell figyeljen a különböző szomszédaira. (Nincs idő „alvásra“.)
- ❑ Globális idősinkron egy ad-hoc, multi-hop hálózatban tetszőleges fizikai topológia esetén egyáltalán nem triviális feladat.



# Lekérdezés (Polling)

- CSMA alternatívája lehet a lekérdezés (poll).
  - Lekérdezés esetén egy node csak akkor adhat, ha erre engedélyt kap egy mester node-tól.
  - Ez megköveteli, hogy időről időre a mester lekérdezze a node-okat, hogy kívánnak-e adni.
  - Ha egy node jelzi, hogy adni szeretne, a mester kijelöli, hogy mikor teheti ezt meg.
  - így a mester vezérli a csatorna-hozzáférést.
  
- Előnyök:
  - Determinisztikus időzítés, nincs véletlen késleltetés (azaz a késleltetés ingadozás kicsi).
  - A központosított csatornavezérlés lehetővé teszi a rugalmas, igény szerinti kiosztást (QoS biztosítása).
  - A fair csatornahozzáférés biztosítható.
  - Mentés a rejtett terminál problémától.

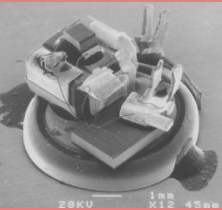


# Lekérdezés (Polling)

## □ Hátrányok WSN-ben:

- A mester node terhelése magas.
- A node-oknak figyelniük kell a lekérdezésekre, esetlegesen a nemleges választ is továbbítaniuk kell.
- A node-ok számával arányosan a lekérdezésre szánt idő is növekszik. (Több száz ill. ezer node esetében ez időtrabló!)
- Az architektúra feltételezi, hogy minden node a mester rádiókörnyezetén belül van (single-hop kommunikáció).

## □ Megj.: Léteznek kiterjesztések multi-hop esetre is.



# Lekérdezés (Polling)

- A **Bluetooth** is lekérdezéses algoritmust használ.
  - Single-hop,
  - maximum 7 slave node,
  - szinkron átvitel (pl. valós idejű hang)
  - Három energiatakarékos mód:
    - HOLD: adott fix ideig alszik, de szinkronban marad
    - SNIFF: időről időre felébred néhány lekérdezésre
    - PARK: hosszabb ideig alszik
  - A különböző módok menedzselése messze nem triviális feladat.

