

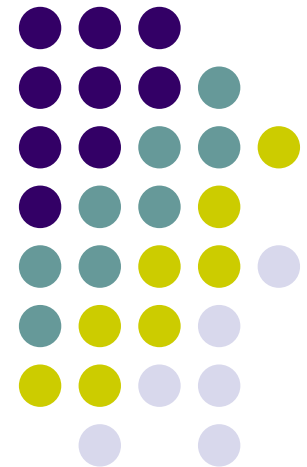
Beágyazott információs rendszerek

Szenzorhálózatok I.

Bevezetés. HW architektúrák. Alkalmazások

2005. március 30.

Simon Gyula



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

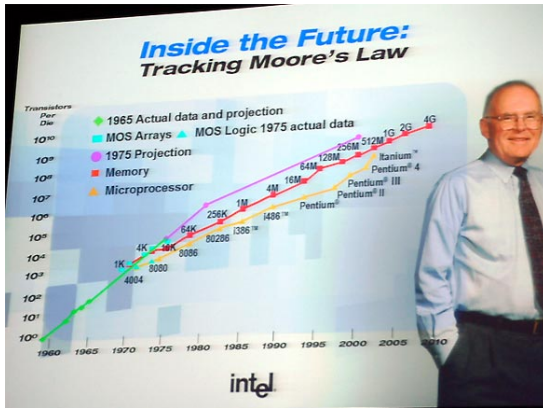
© 2004 Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Tartalom



- A szenzorhálózatok fogalma
 - *A smart dust*
 - Kihívások
 - Tipikus platformok
- A Berkeley Mica2 mote HW felépítése
 - Processzor
 - Rádió
 - Szenzorkártyák
- Tipikus szenzorhálózatos alkalmazások
- Demo
 - Orvlövész lokalizálása szenzorhálózattal

Út a szenzorhálózatokhoz



Moore törvénye:

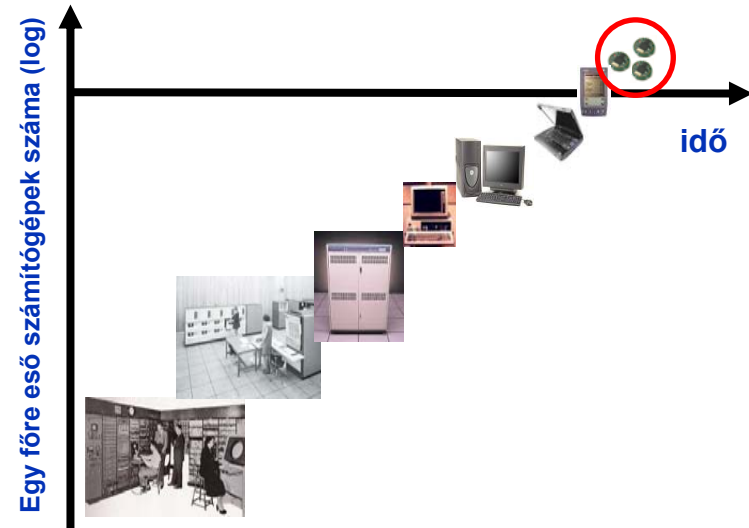
Tranzisztorok sűrűsége 1.5 évente megduplázódik

- méret ↓
- teljesítményfelvétel ↓
- sebesség ↑

Folyománya (Bell törvénye):

Az elemsűrűség növekedésével új platformok alakulnak ki (kb. 10 évente)

- új platform
- új alkalmazások
- új HW/SW standardok



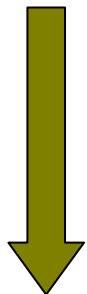
Számítási modellek



egy felhasználó – egy számítógép

egy felhasználó – sok számítógép

Interaktív



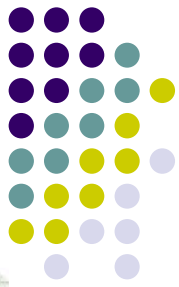
felhasználói szándék
bevitel
számítás
(eredmény)
akció

Proaktív



felhasználói szándék
érzékelés
számítás
akció

Az internet és a szenzorhálózatok



Internet:
távoli információ-elérés



Szenzor hálózatok:
távoli kapcsolat a fizikai valósággal

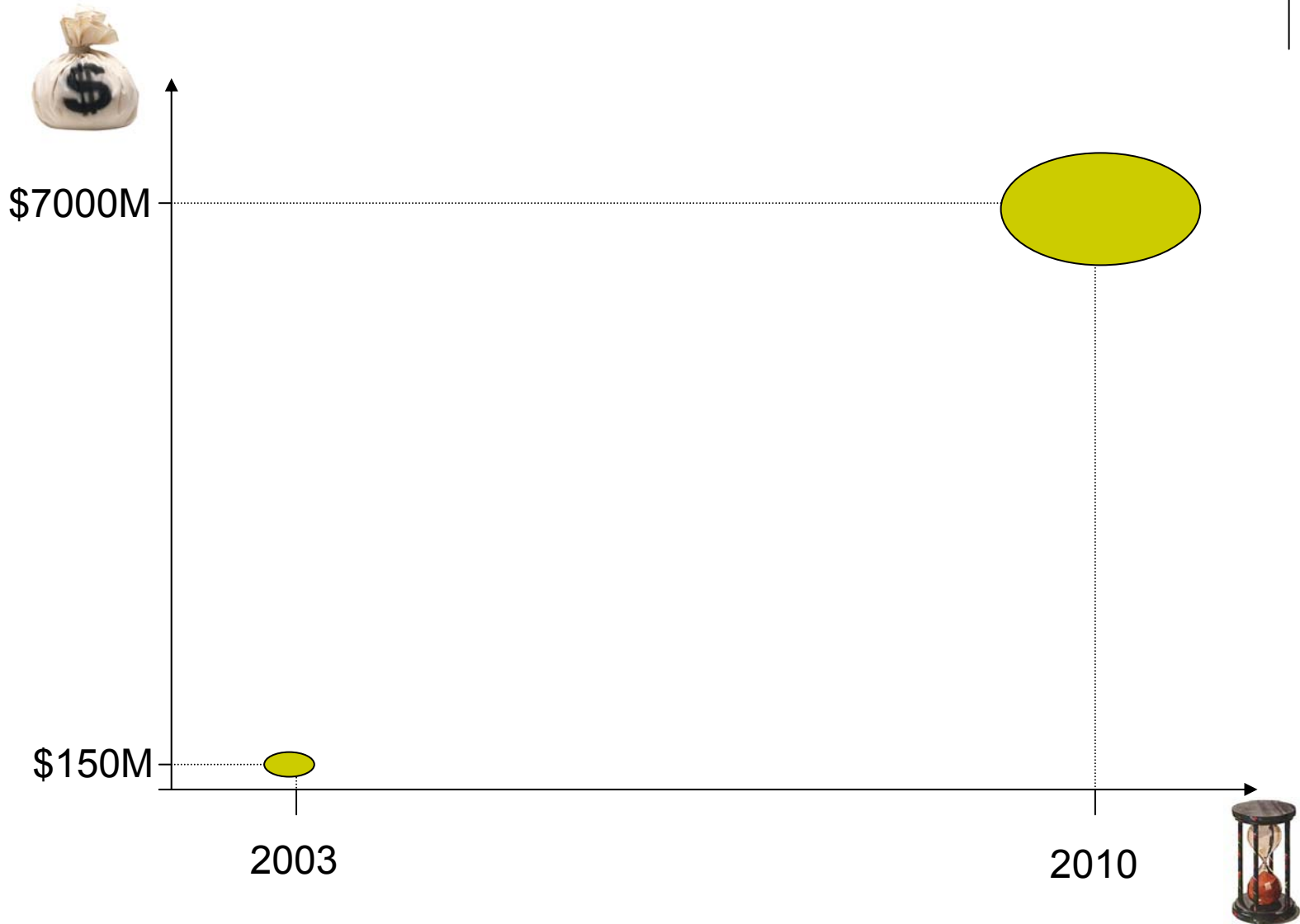
Szenzorhálózat paradigma



Szoros kapcsolat a külvilággal: folyamatos jelenlét, érzékelés, beavatkozás

- HW platform:
Processzor + rádió + szenzorok
 - Alapvető követelmény: **SOK**
 - Sok ($10^2 \dots 10^3 \dots ?$)
 - Olcsó
 - Kis méret
 - Egyéb elvárások:
 - Robosztus
 - Hosszú élettartam
 - Következmény
 - Korlátos erőforráskészlet
 - Korlátos teljesítőképesség
- SW:
 - Új absztrakciók szükségesek
 - OS szinten
 - alkalmazás szinten
 - Elosztott alkalmazások, „elosztott OS”
 - Fejlesztés, tesztelés, karbantartás
 - Szimuláció

Piaci trend



Intelligens porszemek (Smart Dust)



Szép új világ...

Kihívások, feladatok



- Vezeték nélküli kommunikáció
 - Kis sávszélesség ($\approx 10\text{kbps} \dots 100\text{kbps}$)
 - Ad hoc hálózat: sűrűség, hatótávolság, mobilitás, linkminőség
- Szenzor-adatok fúziója
 - Centralizált
 - Elosztott, hálózaton belül
- Limitált erőforrások
 - Tipikus processzor < 10 MIPS
 - Tipikus memória $\approx 4\text{kbyte}$
- Limitált energiaellátás \Leftrightarrow hosszú élettartam
 - pl.: AA elem $\approx 3000\text{mAh}$, napenergia $\approx 5\text{mA}/\text{cm}^2$
 - Élettartam ≈ 1 év
 - Nagyon alacsony kitöltési tényezővel üzemeltethető

Esettanulmány: energia



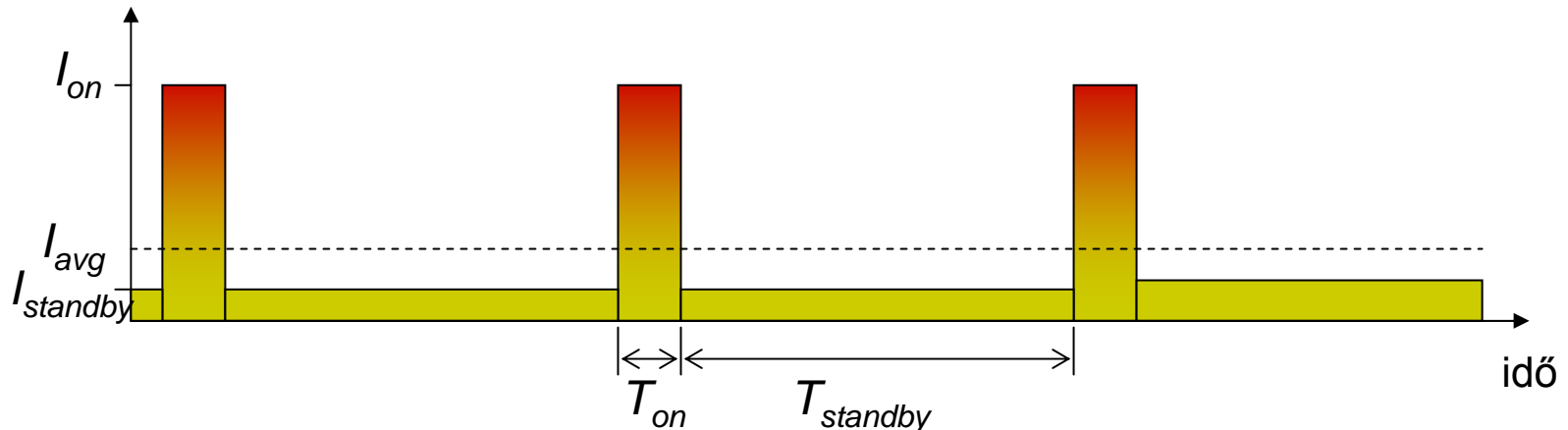
Tápellátás: 2db AA elem (3000 mAh)

Üzemidő: min 1 év (8760 óra)

$P_{on} = 150\text{mW}$ ($I_{on} = 50\text{mA}$)

$I_{standby} = 50\mu\text{A}$

áramfelvétel



$$I_{avg} = I_{on} * T_{on} / (T_{on} + T_{standby}) + I_{standby} * T_{standby} / (T_{on} + T_{standby}) = I_{on} * \lambda + I_{standby} * (1 - \lambda)$$

$$I_{avg\ max} = 3000\text{mAh} / 8760\text{h} = 342\mu\text{A}$$

$$\lambda = (I_{avg\ max} - I_{standby}) / (I_{on} + I_{standby}) = 0.0058 \approx 0.6\% \quad (\approx 8\ \text{min/nap})$$

Szenzorhálózat platformok








- Berkeley/Crossbow: mote
- Intel: XScale node
- MIT/ember: EmberNet
- Millenial Net: i-Bean
- BME: mitmót



Kísérleti platform: Berkeley mote

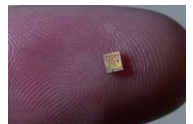


A Berkeley mote-család néhány tagja

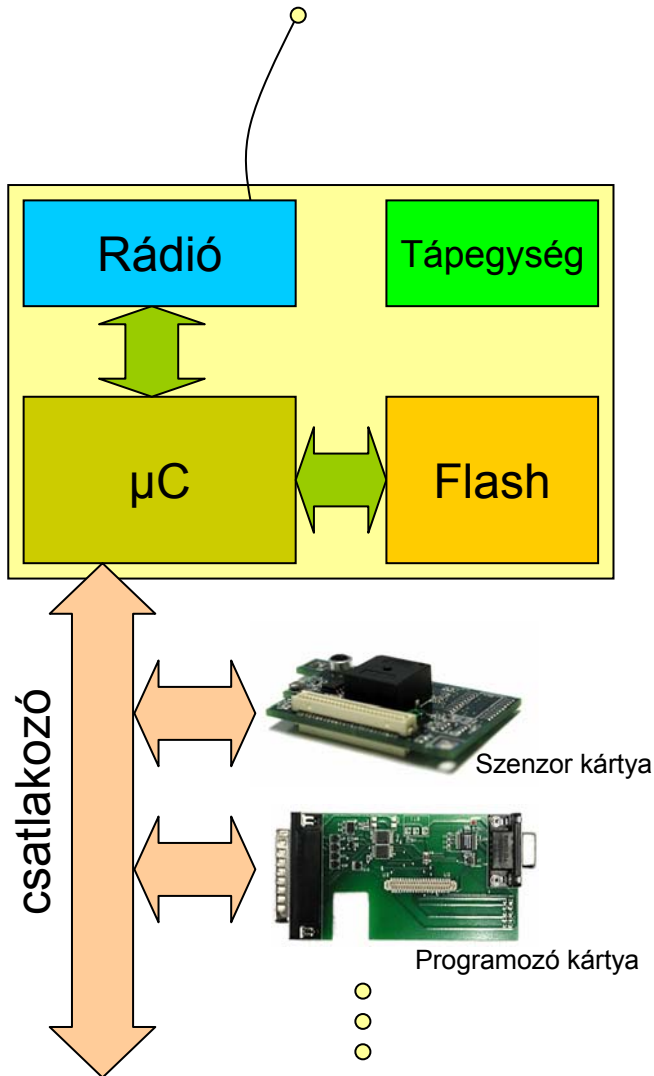
Photo	Crossbow Part ID	Commonly Used Name	Frequency Range	Processor	Radio Transceiver	Nonvolatile Memory
	MPR300 (discontinued) MPR310 (discontinued)	MICA (sometimes referred to as MICA1)	902 to 928 MHz 433.1 to 434.8 MHz	Atmel ATMega128L	RFM TR1000	Atmel AT45DB041B (512 kB)
	MPR400 MPR410 MPR420	MICA2	868 to 870; 902 to 928 MHz 433.1 to 434.8 MHz 313.9 to 316.1 MHz	Atmel ATMega128L	Chipcon CC1000	Atmel AT45DB041B (512 kB)
	MPR500 MPR510 MPR520	MICA2DOT	868 to 870; 902 to 928 MHz 433.1 to 434.8 MHz 313.9 to 316.1 MHz	Atmel ATMega128L	Chipcon CC1000	Atmel AT45DB041B (512 kB)
	MPR2400	MICAz	2400 to 2483.5 MHz	Atmel ATMega128L	Chipcon CC2420 (802.15.4)	Atmel AT45DB041B (512 kB)
	MCS400CA	Cricket	433.1 to 434.8 MHz	Atmel ATMega128L	Chipcon CC1000	Atmel AT45DB041B (512 kB)



Forrás: Crossbow

Spec: 5mm²



Hardver felépítés



	Mica2 	Telos 
Microcontroller		
Típus	ATmega128	TI MSP430
Program memória / RAM	128 kB / 4 kB	60 kB / 2 kB
Teljesítmény felvétel (active/sleep)	33 mW / 75 µW	3 mW / 6 µW
Feléledési idő	180 µs	6 µs
Flash		
Típus	AT45DB041B	ST M24M01S
Méret	512 kB	128 kB
Rádió		
Típus	CC1000	CC2420
Sebesség	38.4 kbps	250 kbps
Moduláció	FSK	Offset QPSK
Teljesítményfelvétel (adás/vétel)	29 mW / 42 mW	38 mW / 35 mW
Fogyasztás		
Min. tápfeszültség	2.7 V	1.8 V
Max. teljesítményfelvétel	89 mW	41 mW

Processzorok



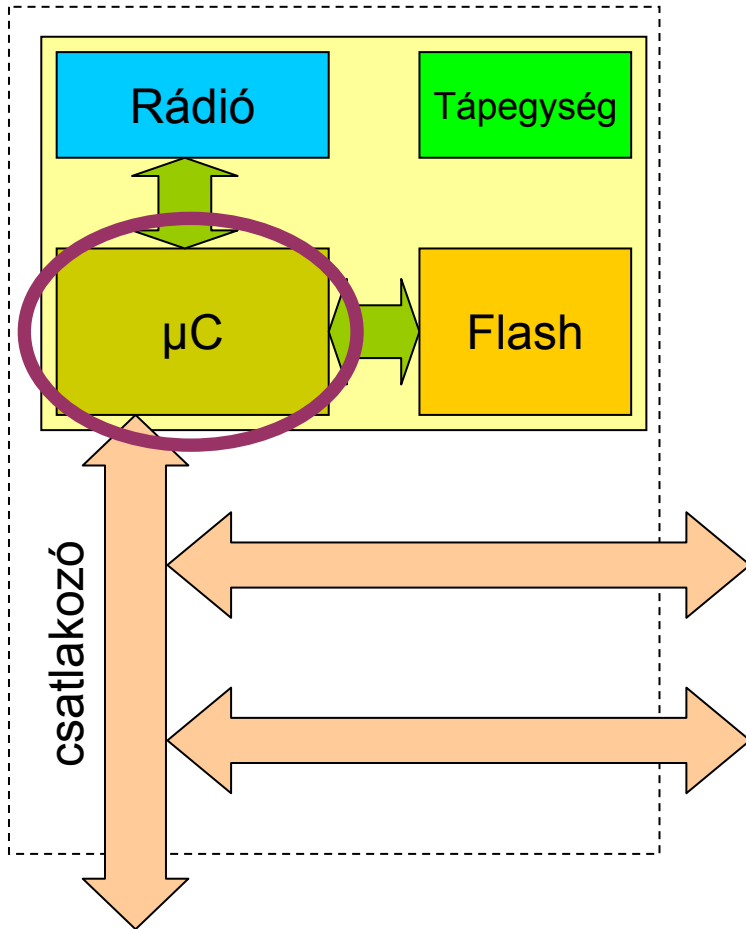
Alacsony fogyasztás



- Standby-sleep módok
- Alacsony órajel
- Kis számítási kapacitás
- (gyakran kis memória)

<i>Példák</i>	ATmega128	TI MSP430
Program memória / RAM	128 kB / 4 kB	60 kB / 2 kB
Teljesítmény felvétel (active/sleep)	33 mW / 75 μ W	3mW / 6 μ W
Feléledési idő	180 μ s	6 μ s

Mikrokontroller (Mica): Atmel ATmega128L (103L)



128kB programmemória (flash)

4kB EEPROM

4kB SRAM

32 általános I/O vonal

8 bemeneti-, 8 kimeneti vonal

32 általános célú regiszter

RTC (real time counter)

4 timer/counter/PWM

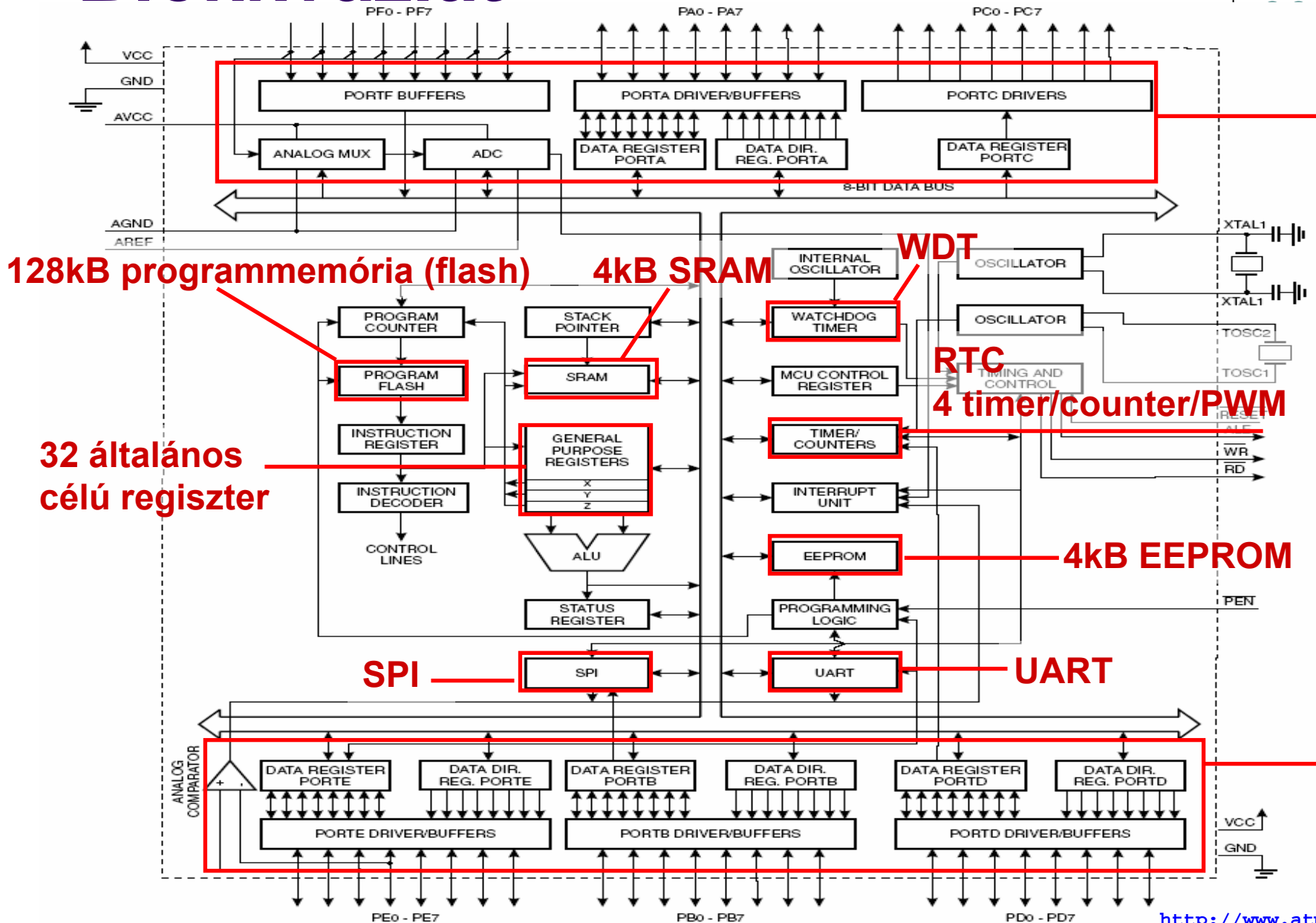
UART

WDT (watchdog timer)

SPI port

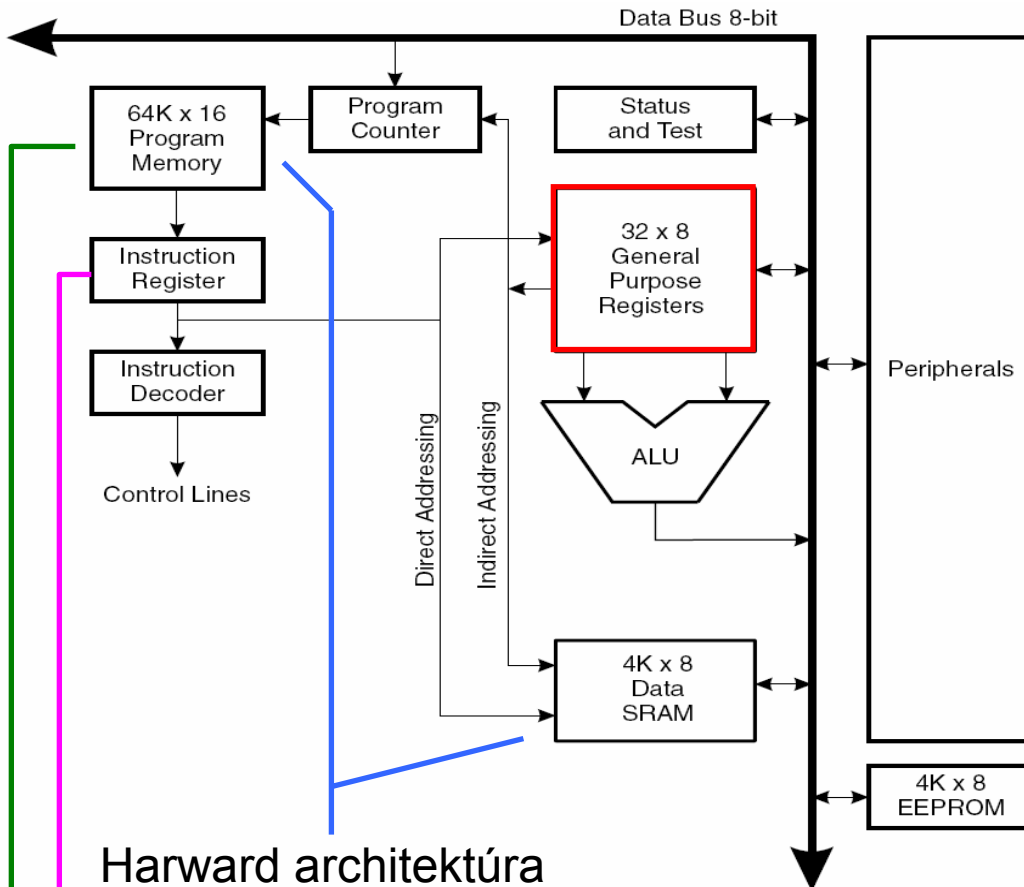
3 energiatakarékos üzemmód

Blokkvázlat



32 általános I/O vonal 8 bemeneti-, 8 kimeneti vonal

RISC architektúra



General Purpose Working Registers

7	0	Addr.
R0		\$00
R1		\$01
R2		\$02
...		
R13		\$0D
R14		\$0E
R15		\$0F
R16		\$10
R17		\$11
...		
R26		\$1A
R27		\$1B
R28		\$1C
R29		\$1D
R30		\$1E
R31		\$1F

X-register low byte
 X-register high byte
 Y-register low byte
 Y-register high byte
 Z-register low byte
 Z-register high byte

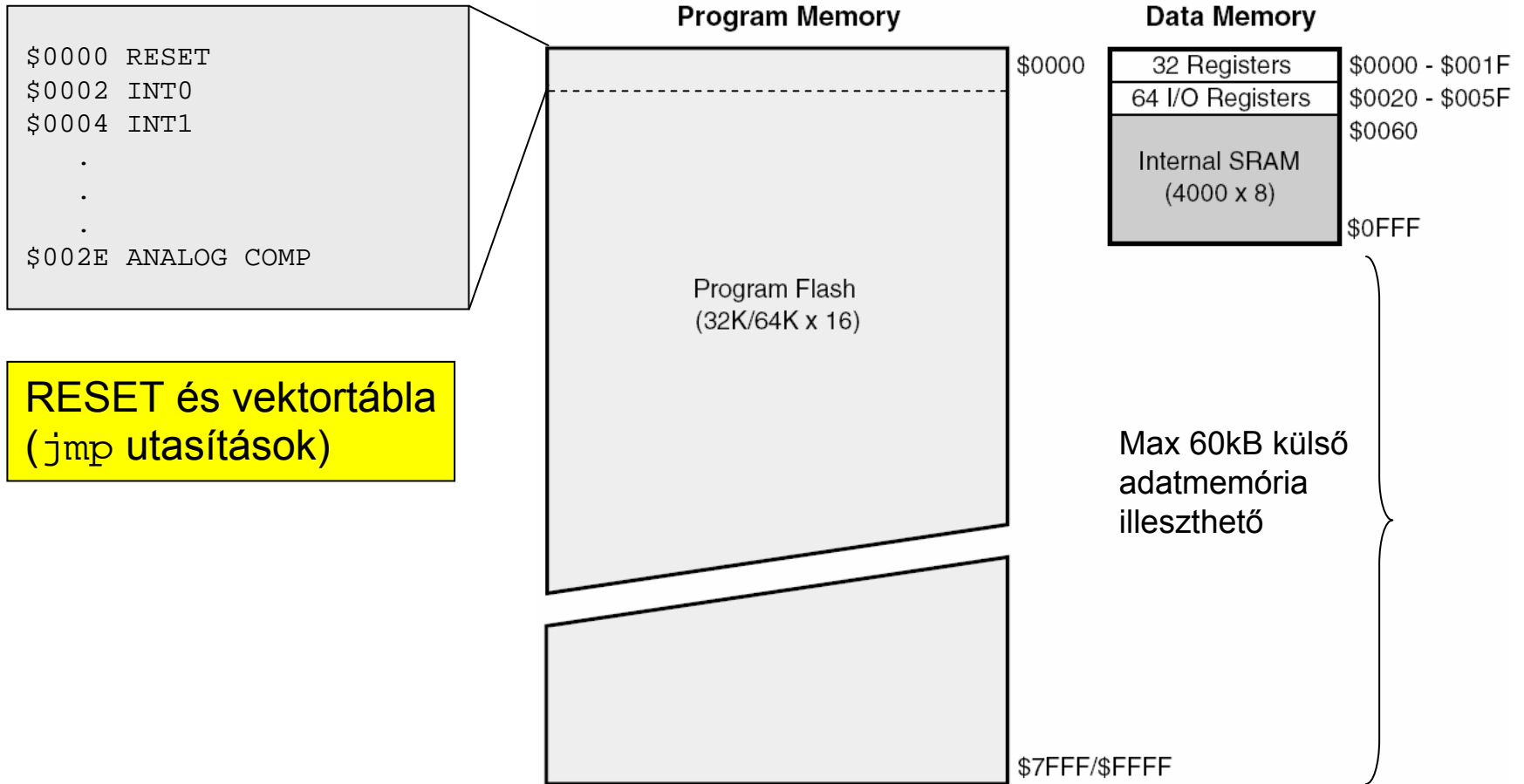
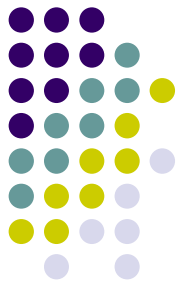
Harward architektúra

Legtöbb utasítás 16 bites

1 elemű pipeline

Legtöbb utasítás 1 órajel ciklus alatt végrehajtható

Memória konfiguráció



Címzési módok



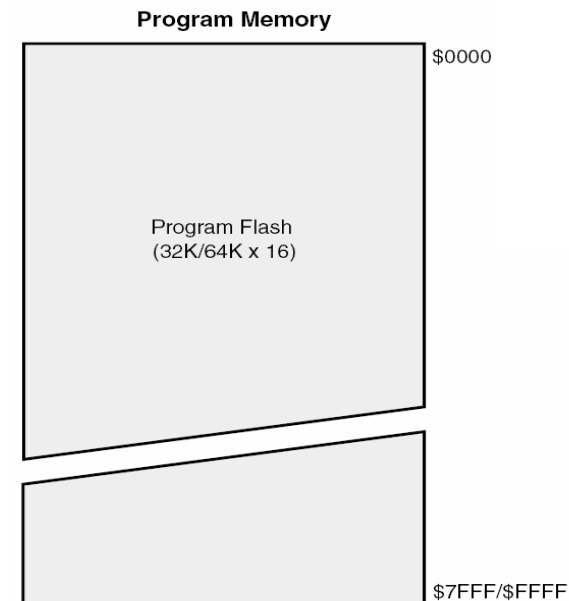
Öt adatmemória-címzési mód

- ❖ Direkt
- ❖ Indirekt eltolással
- ❖ Indirekt
- ❖ Indirekt pre-dekrement
- ❖ Indirekt post-inkrement

Data Memory	
32 Registers	\$0000 - \$001F
64 I/O Registers	\$0020 - \$005F
	\$0060
Internal SRAM (4000 x 8)	\$0FFF

Négy programmemória-címzési mód

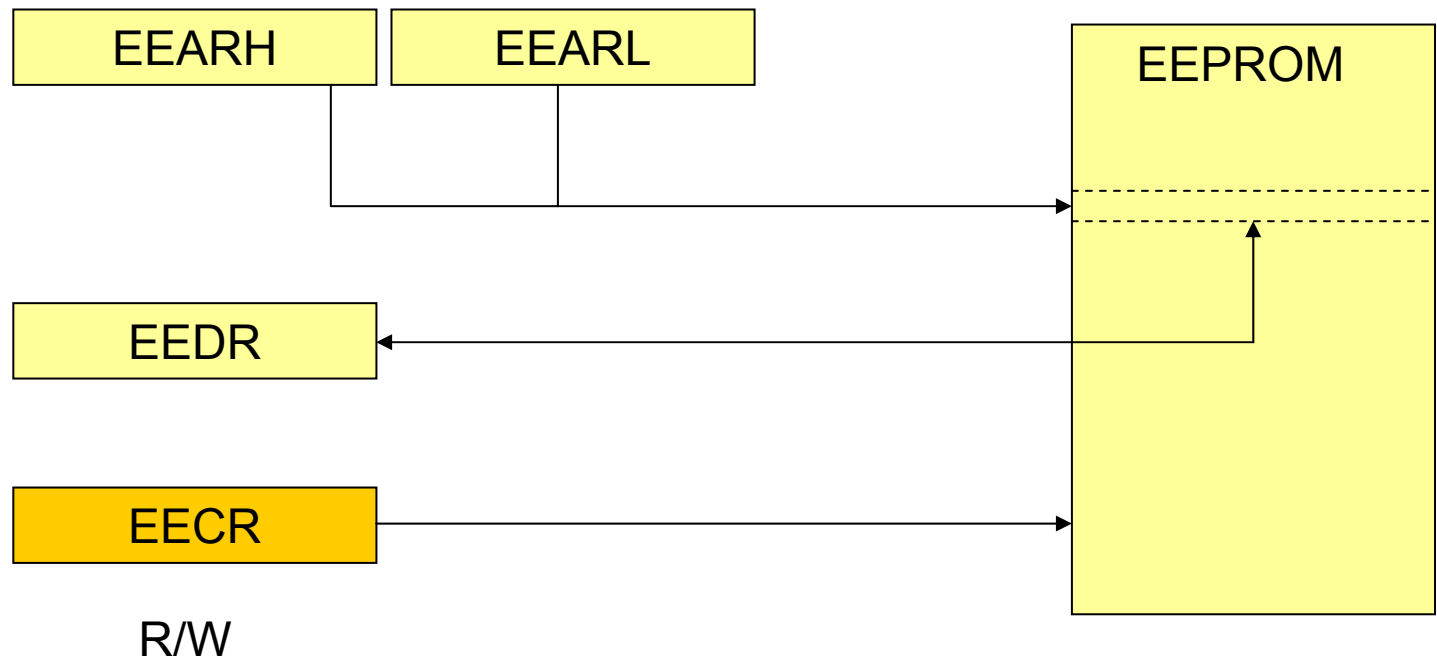
- ❖ Konstans címzés (adattöltés, Z reg)
- ❖ Direkt (JMP, CALL)
- ❖ Indirekt (IJMP, ICALL, Z regiszter)
- ❖ Relatív (RJMP, RCALL)



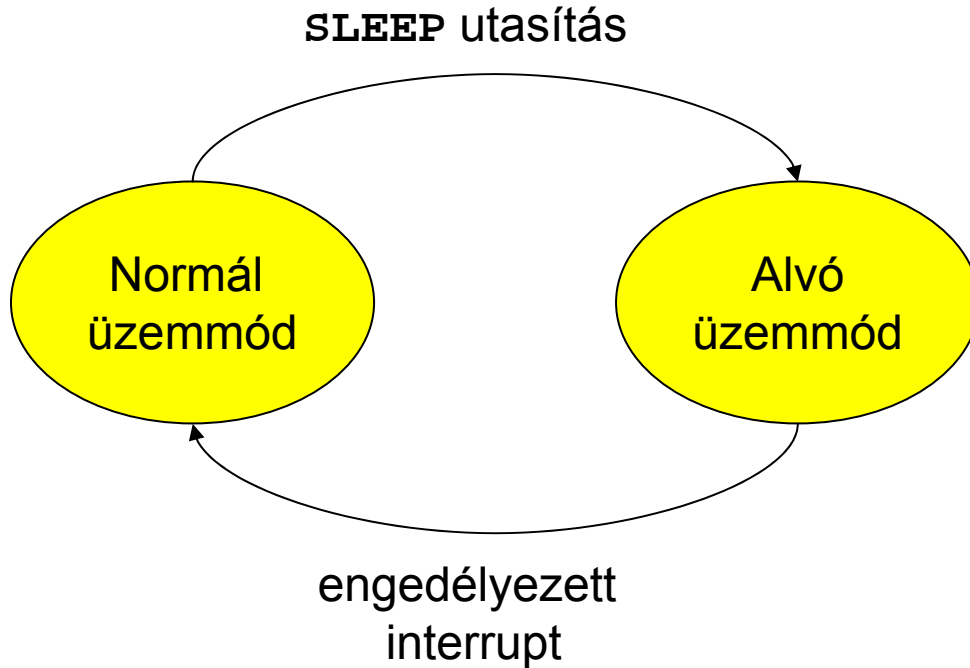
EEPROM címzés



- ❖ EEPROM Address Register: EEARH, EEARL
 - ❖ EEPROM Data Register: EEDR
 - ❖ EEPROM Control Register: EECR
- ❖ Írási idő: 2.5-4ms



Energiatakarékos üzemmódok



Alvó üzemmódok

❖ Idle

- ❖ CPU leáll, perifériák működnek
- ❖ Bármilyen IT ébreszt

❖ Power-down, Power-save

- ❖ Oszcillátor leáll
- ❖ Külső IT és WDT működik
- ❖ RESET, külső IT, WDT ébreszt

Perifériák



- **UART** (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)
 - Programozható átviteli sebesség
 - 8 vagy 9 bites adatszélesség
 - Zajsűrítés, hibadetektálás
 - IT:
 - TX complete
 - TX Data Register Empty
 - RX Complete
- **SPI** (Serial Peripheral Interface)
 - 3 vezetékes full-duplex szinkron átvitel
 - Programozható átviteli sebesség
 - IT: End of Transmission
- **Analóg komparátor**
 - PE2 és PE3 bemeneteket komparálja
 - Trigger:
 - timer/counter
 - IT
- **ADC**
 - 10 bit felbontás
 - Max 14kSPS
 - 8 multiplexelt input csatorna
 - IT: ADC Conversion Complete

Hálózati kommunikáció



Vezetékes

Rádió

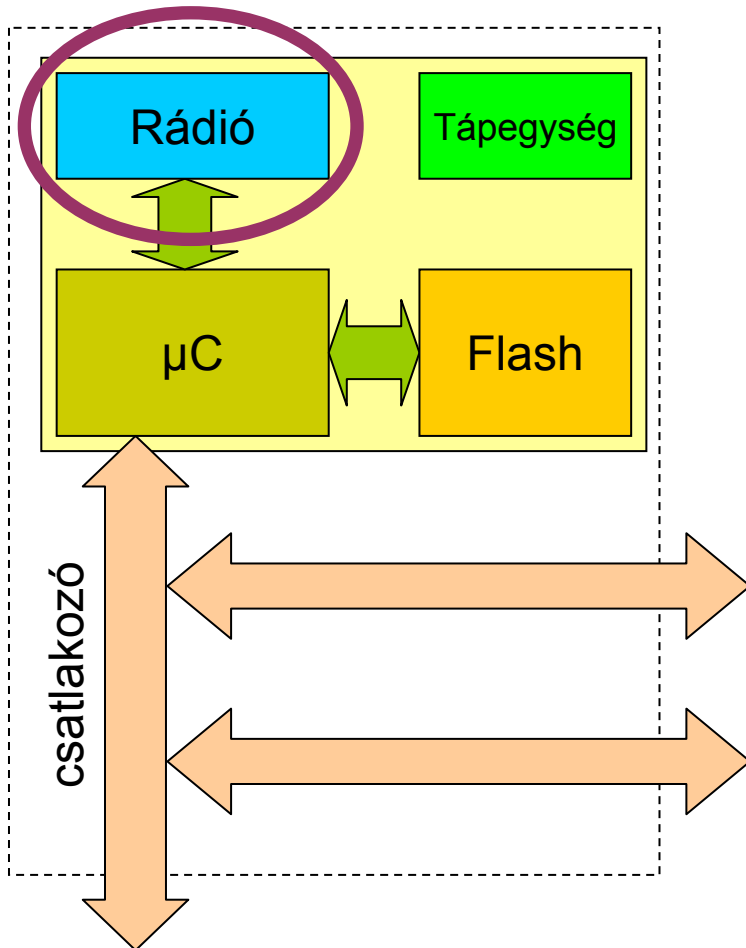
Fény

Hang

- Kritikus szempontok:
 - adatátviteli sebesség
 - teljesítményfelvétel (adás/vétel/standby)
 - feléledési idő
- Keskenysávú (pl. CC1000)
 - + kis teljesítményfelvétel
 - kis adatátviteli sebesség
 - egyszerű csatornakódolás
 - + gyors feléledés
- Szélessávú (pl. CC2420)
 - nagyobb teljesítményfelvétel
 - + nagyobb adatátviteli sebesség
 - + nagyobb zajérzékenység
 - lassabb feléledés



Rádió: Chipcon CC1000



Alacsony fogyasztás

- Vétel: 7.4mA
- Adás: 5.3-26.7mA
- Power-down: 0.2uA

Nagy érzékenység

FSK moduláció

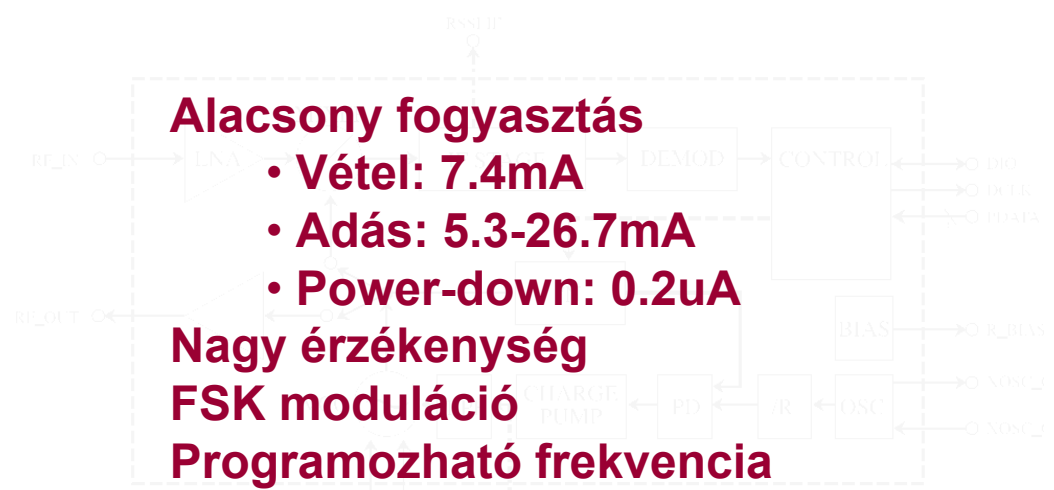
Programozható frekvencia

Programozható kimenőteljesítmény

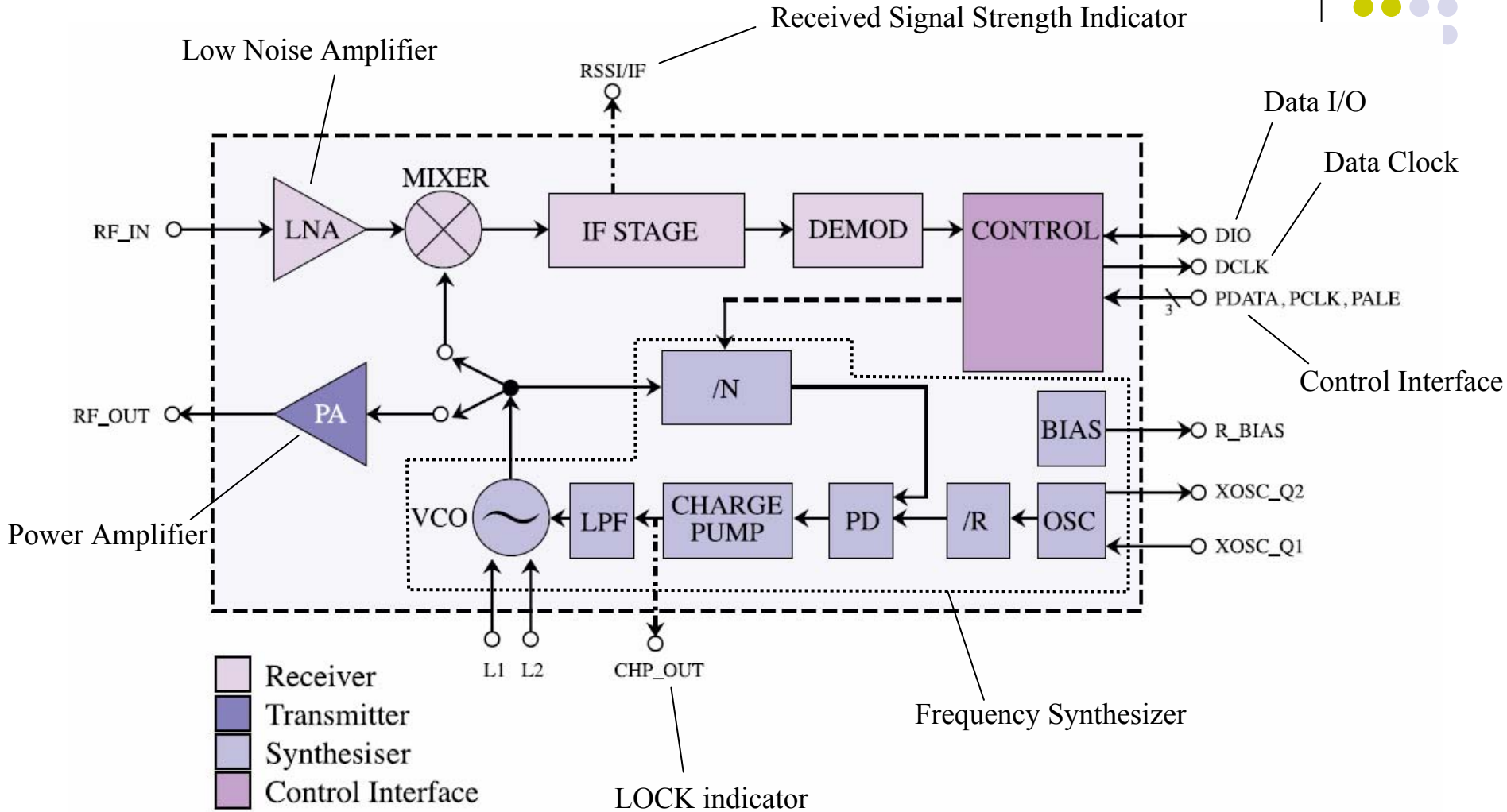
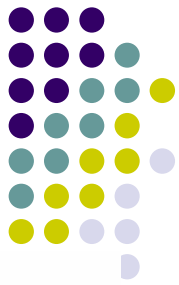
Max 76.8kbps átviteli sebesség

Kevés külső elemet igényel

NRZ / Manchester kódolás



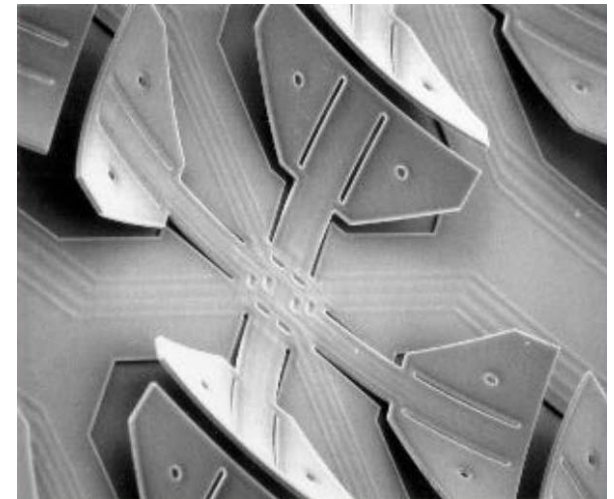
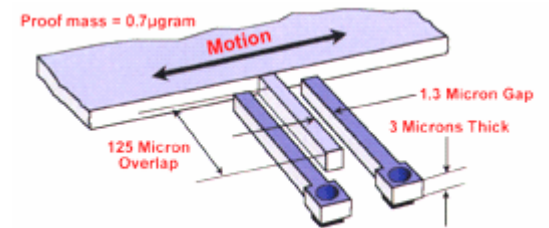
Chipcon CC1000



Szenzorok



- MEMS: Micro Electro-Mechanical Systems
- Érzékelők
 - Nyomás
 - Gyorsulás
 - Giroszkóp
 - Gázérzékelés és -elemzés
 - Íz- és szagérzékelés
 - Mikrofon
- Beavatkozók
 - Kapcsolók, relék
 - Hangolható elektronikai elemek (pl. antenna)
 - Aktív felületek
 - Mikrocilló
 - Intelligens felületek
 - Optikai
 - Mozdó tükrök



Szenzorkártyák

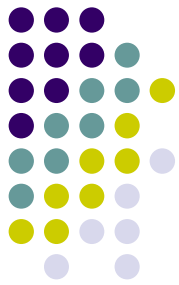





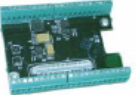
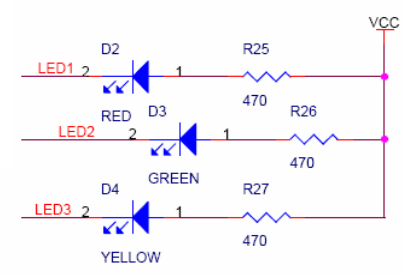
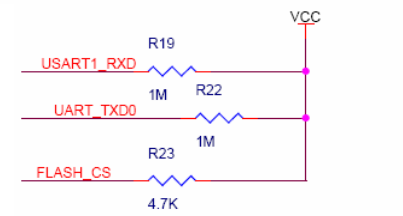
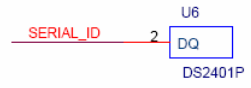
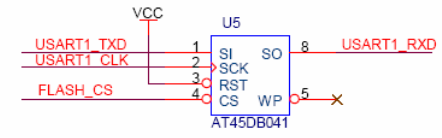
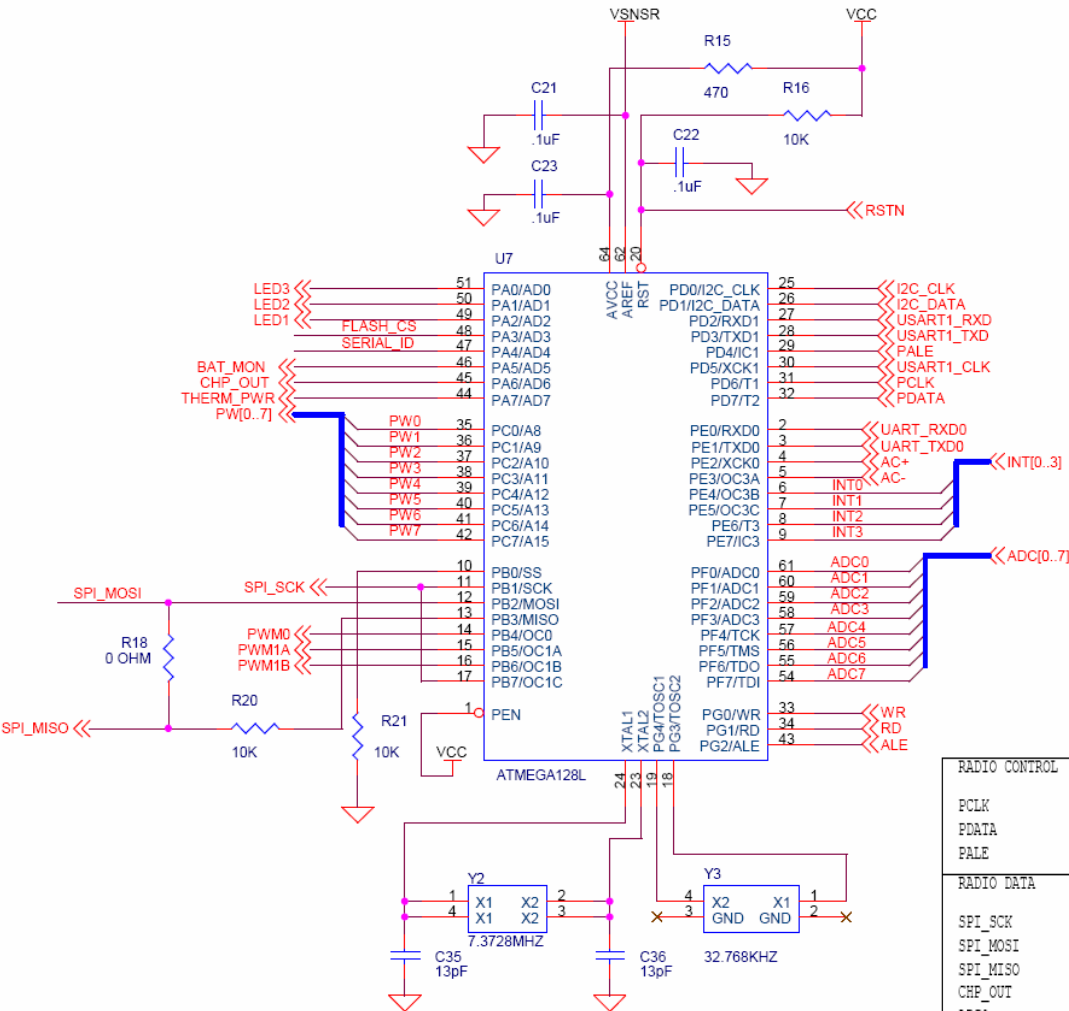


Photo	Crossbow Part ID	Commonly Used Name	Sensor and Functions												
			Accelerometer (2-axis)	Barometer (built-in ADC)	Buzzer	External/Analog Sensor Inputs	GPS	Light	Microphone	Magnetometer (2-axis)	Photo-sensitive Light	Rel. Humidity & Temperature (built-in 12-bit ADC)	Relays	Thermistor	
MICA-Compatible															
	MTS101	basicsb				✓ (Six 10-bit ADCs)		✓							✓
	MTS300	micasb			✓			✓	✓						✓
	MTS310	micasb	✓		✓			✓	✓	✓					✓
	MTS400	mica2wb	✓	✓							✓	✓			
	MTS420	fireboard		✓				✓			✓	✓			
	MDA300	sensor1B				✓ (Ten 12-bit ADCs)						✓		✓	



Mica2 hardver: microcontroller

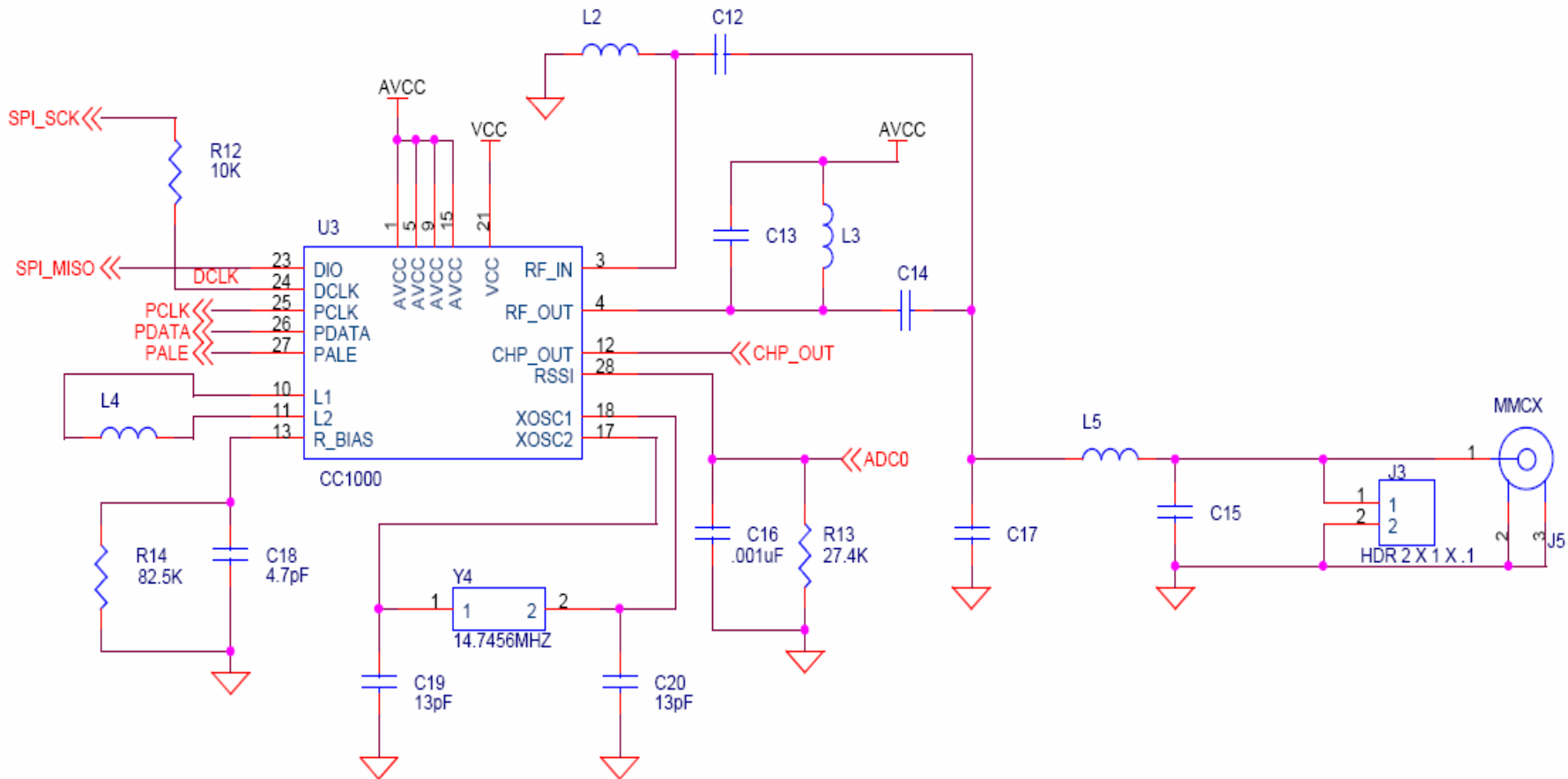
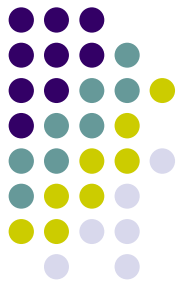


RADIO CONTROL	
PCLK	
PDATA	
PALE	
RADIO DATA	
SPI_SCK	
SPI_MOSI	
SPI_MISO	
CHP_OUT	
ADC0	
(RSSI)	

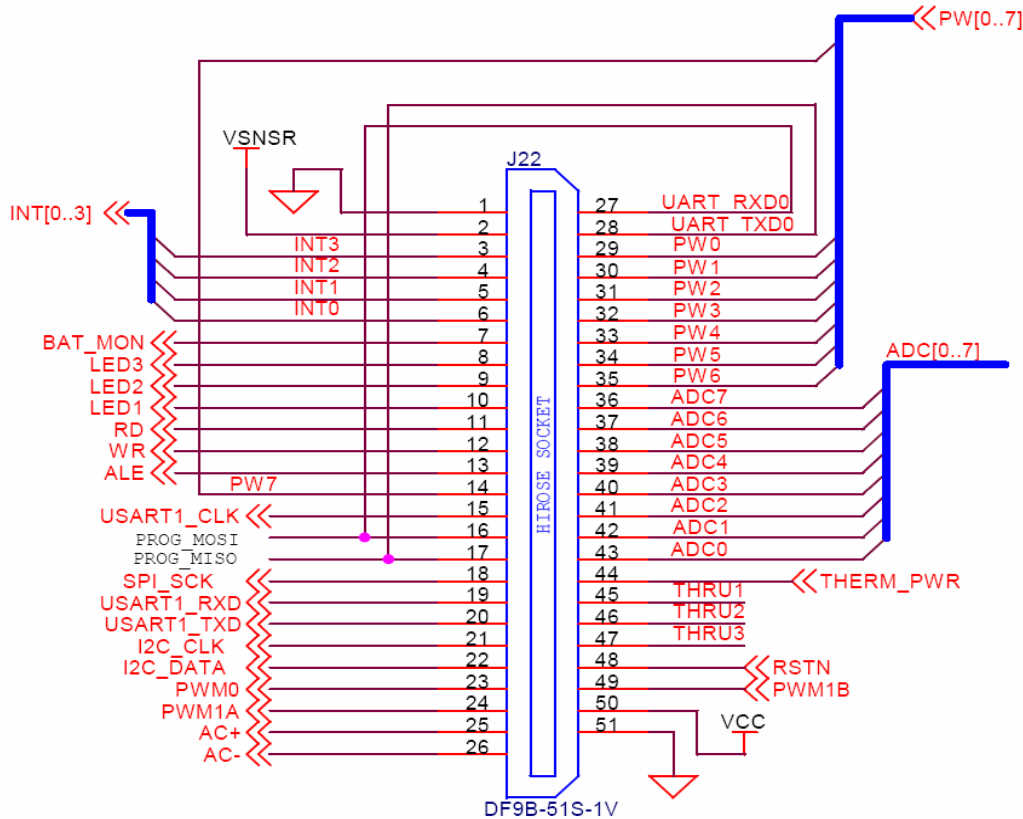
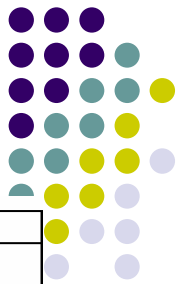
FLASH INTERFACE	
FLASH_SI	
FLASH_SO	
FLASH_CLK	
SERIAL_ID	
UART INTERFACE	
UART_RXD0	
UART_TXD0	
CONTROL INTERFACE	
I2C_CLK	
I2C_DATA	

SENSOR INTERFACE	
PW[0..7]	
ADC[1..6]	
VCC MONITOR	
ADC7	

Mica2 hardver: rádió



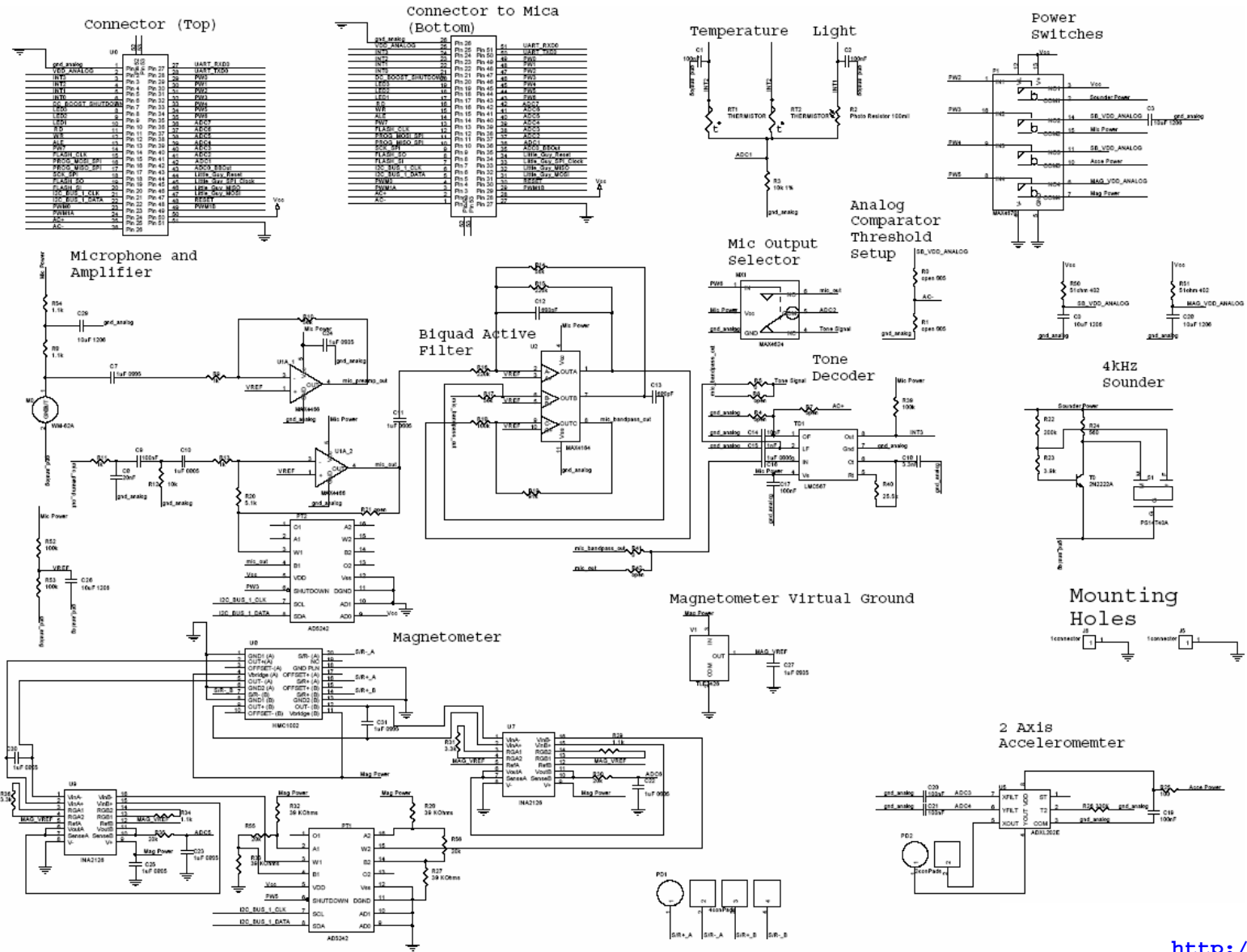
Mica2 hardver: csatlakozó



PIN	NAME	DESCRIPTION
1	GND	GROUND
2	VSNSR	SENSOR SUPPLY
3	INT3	GPIO
4	INT2	GPIO
5	INT1	GPIO
6	INT0	GPIO
7	BAT_MON	BATTERY VOLTAGE MONITOR ENABLE
8	LED3	LED3
9	LED2	LED2
10	LED1	LED1
11	RD	GPIO
12	WR	GPIO
13	ALE	GPIO
14	PW7	POWER CONTROL 7
15	USART1_CLK	USART1 CLOCK
16	PROG_MOSI	SERIAL PROGRAM MOSI
17	PROG_MISO	SERIAL PROGRAM MISO
18	SPI_SCK	SPI SERIAL CLOCK
19	USART1_RXD	USART1 RX DATA
20	USART1_TXD	USART1 TX DATA
21	I2C_CLK	I2C BUS CLOCK
22	I2C_DATA	I2C BUS DATA
23	PWM0	GPIO/PWM0
24	PWM1A	GPIO/PWM1A
25	AC+	GPIO/AC+
26	AC-	GPIO/AC-

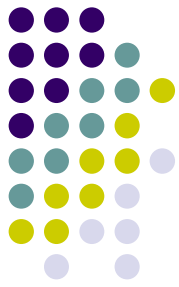
PIN	NAME	DESCRIPTION
27	UART_RXD0	UART_0 RECEIVE
28	UART_TXD0	UART_0 TRANSMIT
29	PW0	POWER CONTROL 0
30	PW1	POWER CONTROL 1
31	PW2	POWER CONTROL 2
32	PW3	POWER CONTROL 3
33	PW4	POWER CONTROL 4
34	PW5	POWER CONTROL 5
35	PW6	POWER CONTROL 6
36	ADC7	ADC INPUT 7 - BATTERY MONITOR/JTAG TDI
37	ADC6	ADC INPUT 6 / JTAG TDO
38	ADC5	ADC INPUT 5 / JTAG TMS
39	ADC4	ADC INPUT 4 / JTAG TCK
40	ADC3	ADC INPUT 3
41	ADC2	ADC INPUT 2
42	ADC1	ADC INPUT 1
43	ADC0	ADC INPUT 0 / RSSI MONITOR
44	THERM_PWR	TEMP SENSOR ENABLE
45	THRU1	THRU CONNECT 1
46	THRU2	THRU CONNECT 2
47	THRU3	THRU CONNECT3
48	RSTN	RESET (NEG)
49	PWM1B	GPIO/PWM1B
50	VCC	DIGITAL SUPPLY
51	GND	GROUND

Mica Sensor board

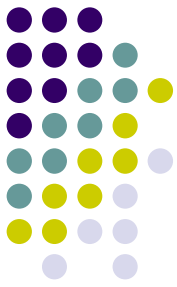


Tipikus alkalmazások

- **Egészségügy**
 - Kórházi menedzsment
 - Katasztrófa elhárítás
 - Idősek, fogyatékosok felügyelete, otthoni betegellátás
- **Gyártás, raktározás**
 - Gyártósor monitorozás
 - Készletnyilvántartás
- **Környezetvédelem**
 - Élőhely monitorozás
 - Katasztrófa előrejelzés
- **Mezőgazdaság**
 - „Precíziós mezőgazdaság”
- **Mérnöki alkalmazások**
 - Épületek, műtárgyak statikai monitorozása
 - Közlekedésfelügyelet
- **Intelligens épületek**
 - Intelligens otthon
 - Intelligens munkahely
- **Védelmi alkalmazások**
 - Megfigyelés, követés, detektálás
 - Orvlövész lokalizálás
- **Űrkutatás**
 - Mars szondák



Példák



- Aktív zajcsökkentés űrrakétákban
- Akusztikus lövés lokalizálás

Aktív zajcsökkentés űrrakétákban



Cél:

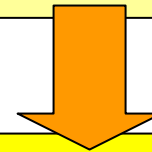
Rakomány megóvása a rázkódástól

Passzív megoldás:

nagy haszontalan tömeg

Aktív megoldás:

jelentős megtakarítás



Aktív rezgéscsökkentés
érzékelő- és beavatkozó hálózattal

- CORBA kommunikáció
- Rögzített topológia
- Szigorú időkorlátok (2kHz)

Akusztikus orvlövész lokalizáció



Feladat:

Lövészek pozícióinak meghatározása akusztikus mérések segítségével

Megoldás:

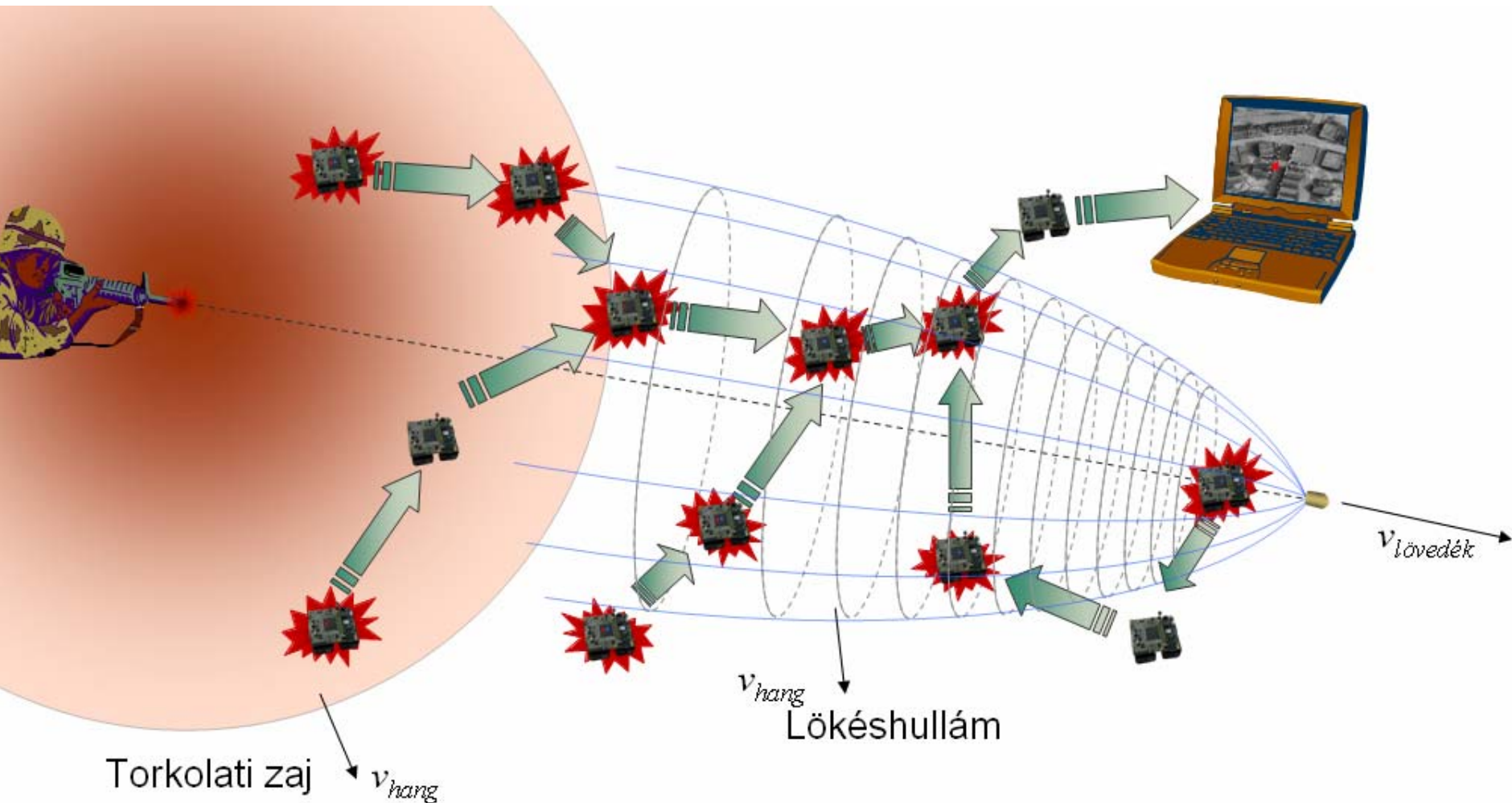
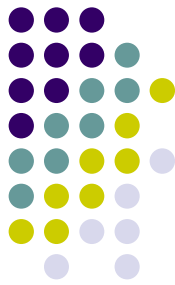
Sok szenzor érzékeli a lövés által kibocsátott hangokat. Az érzékelések időpontjaiból a lövés helye meghatározható („háromszögelés”).

Két akusztikus jelenség:

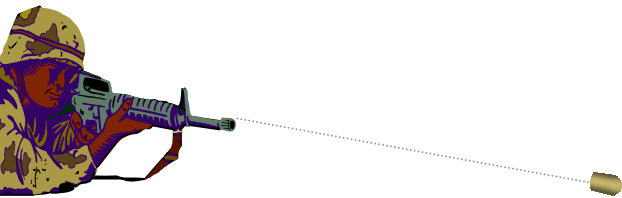
Torkolati zaj

Lökéshullám (N-hullám)

AOL: Működési elv



AOL: Részfeladatok



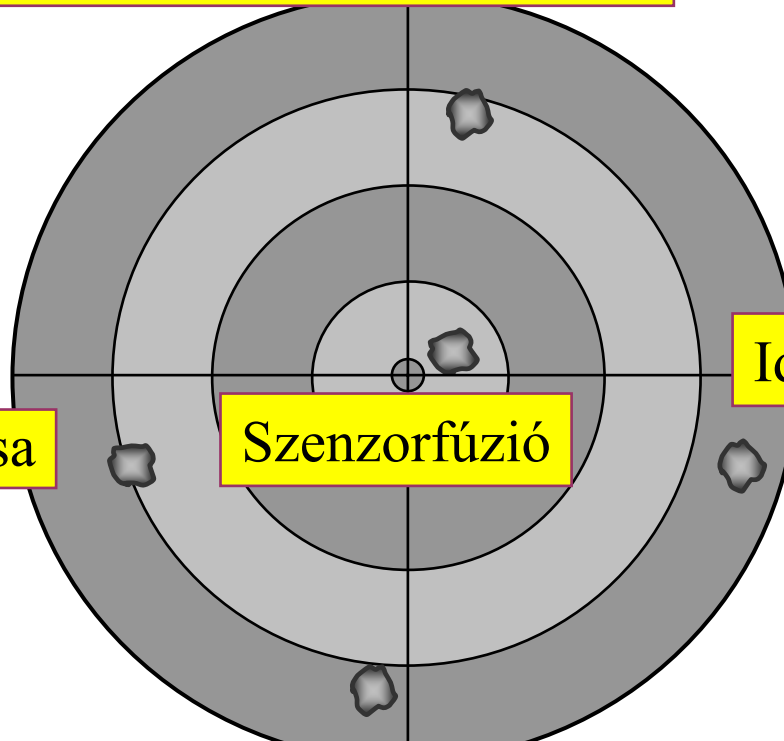
Adattovábbítás (ad hoc routing)

Lövés detektálása

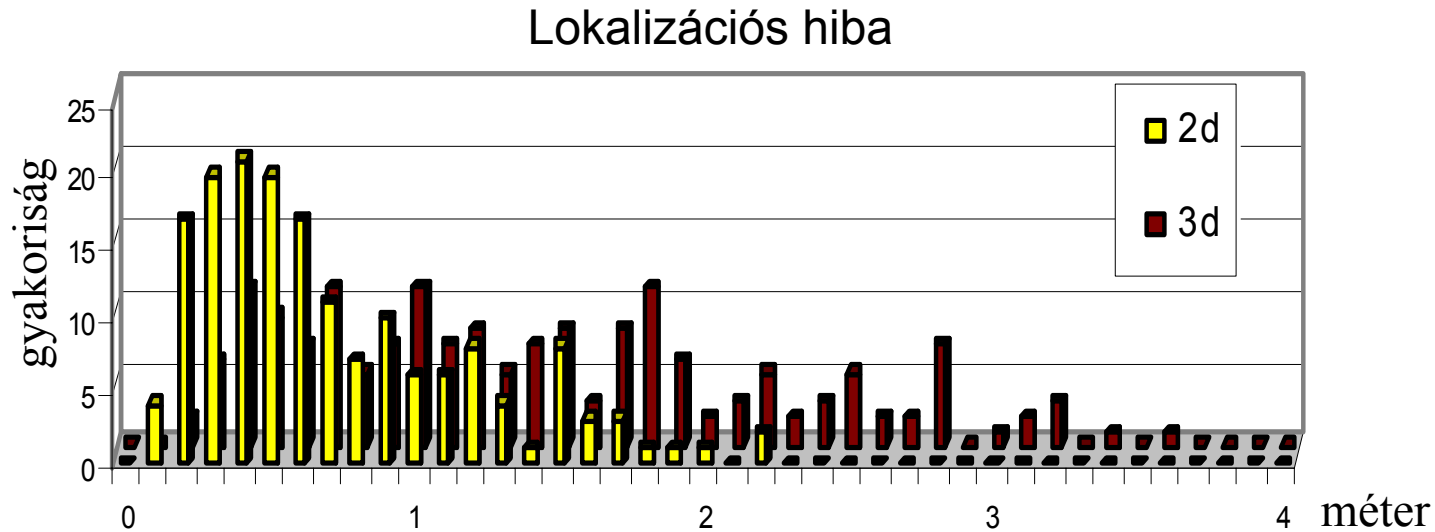
Szenzorfüzió

Idő szinkronizálás

Szenzor lokalizálás



AOL: Eredmények



- 171 lövés, 70 éles és 101 vaktöltény
- 20 különböző pozíció
- átlagos hiba:
 - 0,6m (2D)
 - 1,3m (3D)
- késleltetés < 2sec
- képes több egyidejű lövés detektálására