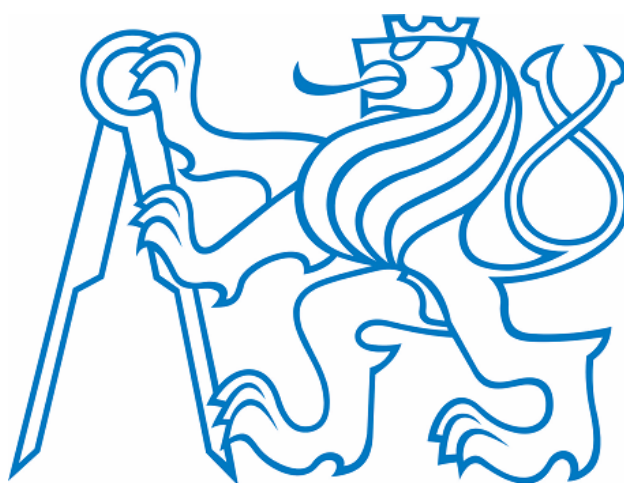


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**Katedra řídicí techniky**



**Komunikace mezi magnetometrem a ARM**  
**procesorem**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Praha 2008**

**Vypracoval: Jan Hajný**

**Vedoucí práce: Ing. Martin Hromčík, Ph.D.**

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady ( literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

podpis

## Poděkování

Zde bych rád na prvním místě poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Hromčíkovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce, cenné pohledy, připomínky a samozřejmě za možnost prohloubení znalostí oblasti mikroprocesorů při vypracovávání této práce.

Dále bych rád poděkoval svým kolegům pracujícím na projektu stabilizované kamerové základny MAMOK, Bc. Martinu Řezáčovi a Bc. Jaroslavu Žohovi, za jejich cenné rady a předání zkušeností týkajících se práce s mikroprocesory.

V neposlední řadě patří obrovský dík celé mojí rodině a Petře Jiráskové za její dlouholetou podporu.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřená na dvě problematiky – sériové komunikační rozhraní 32-bit procesoru typu ARM od firmy Atmel AT91SAM7X256, který byl také k vypracování bakalářské práce použit, dále pak digitální kompas – tříosý magnetometr HMR3300 od firmy Honeywell. Práce se zabývá realizací jejich vzájemného připojení pomocí sériových rozhraní UART a SPI, kterými magnetometr disponuje, principem komunikace, výhodami a nevýhodami obou rozhraní. Není opomenuta též problematika kalibrace senzoru.

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on two issues – serial communication interfaces of the 32-bit ARM-based microprocessor AT91SAM7X256 from the Atmel corporation, which was used for the bachelor project. Beside this the thesis considers digital compass – three-axis magnetometer HMR3300 from Honeywell corporation. Further it deals with realization of their connections by asynchronous UART and synchronous SPI interfaces used by magnetometer, with communication principles, with advantages and disadvantages of both interfaces. Of course calibration of the magnetometer is not left out of consideration.

# Obsah

<b>Obsah</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Magnetometr</b> .....	<b>4</b>
2.1 Magnetometr HMR3300 .....	4
<b>3 Sériová komunikační rozhraní</b> .....	<b>6</b>
3.1 Sériové synchronní rozhraní SPI.....	6
3.1.1 Princip SPI sběrnice.....	6
3.1.2 Varianty synchronizačního signálu .....	7
3.1.3 SPI sběrnice mikroprocesoru AT91SAM7X256.....	8
3.1.4 Způsoby adresace pomocí CS signálů.....	9
3.1.5 Další varianty SPI sběrnice.....	10
3.1.5.1 <i>Multiple byte stream mode</i> .....	10
3.1.5.2 <i>Daisy-chained mode</i> .....	11
3.1.6 Běžný způsob komunikace po SPI (s gyroskopem ADIS16255).....	11
3.1.7 Výhody a nevýhody SPI sběrnice .....	13
3.2 Sériové asynchronní rozhraní UART.....	13
3.2.1 Princip rozhraní UART .....	14
3.2.2 Rozšířená verze periférie u mikroprocesoru AT91SAM7X256 .....	14
3.3 Sériové rozhraní TWI (I <sup>2</sup> C).....	16
3.3.1 Princip rozhraní TWI (I <sup>2</sup> C).....	16
<b>4 Magnetometr HMR3300 na sběrnici SPI</b> .....	<b>18</b>
4.1 Fyzické připojení magnetometru ke sběrnici SPI .....	18
4.1.1 Nevýhoda zapojení magnetometru na sběrnici SPI.....	19
4.2 Fyzické rozšíření sběrnice pro připojení dalších jednotek.....	19
4.2.1 Princip rozšíření sběrnice SPI.....	19
4.3 Alternativní komunikace pomocí externího interruptu .....	20
4.3.1 Výhoda SW řešení komunikace .....	21
4.3.2 Nevýhoda SW řešení komunikace.....	21
<b>5 Získávání dat z magnetometru po SPI sběrnici</b> .....	<b>21</b>
5.1 Příkazy od procesoru, typ dat v SPI modu .....	21
5.2 Žádost o naměřená data.....	22

5.3 Odezva magnetometru na časově náhodnou žádost.....	23
5.4 Synchronizace procesoru s magnetometrem .....	25
5.5 Problematika četnosti žádostí o data .....	27
5.6 Ukázka připojení magnetometru a gyroskopu na SPI sběrnici .....	28
<b>6 Fyzické připojení magnetometru přes UART rozhraní.....</b>	<b>29</b>
<b>7 Získávání dat z magnetometru přes UART rozhraní .....</b>	<b>30</b>
7.1 Operační příkazy .....	31
7.2 Konfigurační příkazy.....	34
7.3 Výhody a nevýhody komunikace přes UART rozhraní .....	35
<b>8 Kalibrace magnetometru HMR3300 .....</b>	<b>36</b>
8.1 Problematika vlivu okolí.....	36
8.2 Kalibrační procedura .....	36
<b>Závěr .....</b>	<b>39</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>41</b>
<b>Obsah příloženého CD.....</b>	<b>43</b>
<b>Obrazová příloha .....</b>	<b>44</b>

# 1 Úvod

Pokud bychom se pokusili porovnat analogová a digitální zařízení v otázce složitosti a nákladů, pak zjistíme, že realizace analogového zařízení se stává s jeho rostoucí funkcí složitější a nákladnější mnohem rychleji než u zařízení digitálního.

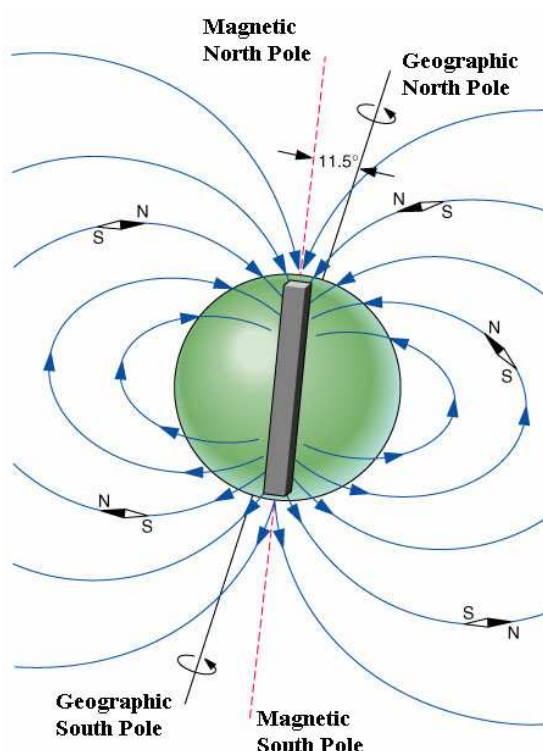
Nepřekonatelná výhoda digitální formy dat oproti analogové je možnost jejího jednoduchého uchování v paměťových prostorech, jako jsou např. pevné disky či flash paměti, a odolnost proti šumu při přenosu. Analogová veličina se tedy převádí na digitální pomocí A/D převodníků – při vzorkování dochází k jejímu kvantování v úrovni a to nejčastěji v časově ekvidistantních okamžicích. Dnes je pro měření velmi rozšířené použití tzv. inteligentních senzorů, které převádějí měřenou analogovou veličinu na digitální informaci, určitým způsobem ji samy předzpracují a následně odešlou nejčastěji po sériové sběrnici. Jako řídicí jednotka je užíván mikroprocesor obsluhující čtení dat ze senzorů. Tato data pak může dále zpracovávat, odesílat další nadřazené jednotce či na jejich základě ovládat příslušné akční členy.

Hlavním cílem této bakalářské práce je seznámení s mikroprocesorem typu ARM7 firmy Atmel a magnetometrem HMR3300 firmy Honeywell, dále pak možnost realizace jejich spojení pomocí sériových rozhraní s následným sestavením programů pro mikroprocesor zajišťující tuto komunikaci. Tato práce je podúlohou projektu stabilizované kamerové základny pro bezpilotní letoun, který je řešen na katedře řídicí techniky fakulty elektrotechnické ČVUT ve spolupráci s VTÚLaPVO Praha. Primární zaměření je na zprovoznění komunikace po rozhraní SPI, které je použito v projektu inerciální navigace, zpracovaném brazilským studentem programu Space Master Antoniem Affonsecou.



## 2 Magnetometr

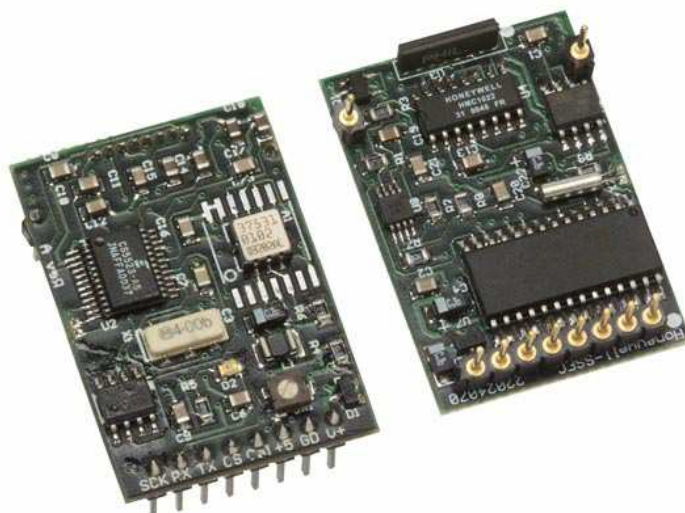
Důležitým prvkem v inerciální navigaci je magnetometr nebo také elektronický kompas. Tento senzor umožňuje vyhodnotit orientaci siločar magnetického pole Země a tedy určit azimut, čili odchylku kurzu od směru k magnetickému severu. Obr. 2.1 ukazuje odchylku (magnetickou deklinaci) magnetického a geografického pólu. Pokud tedy chceme určovat orientaci vůči geografickému pólu, musíme tuto odchylku, která je ovšem závislá na poloze na povrchu Země, kompenzovat.



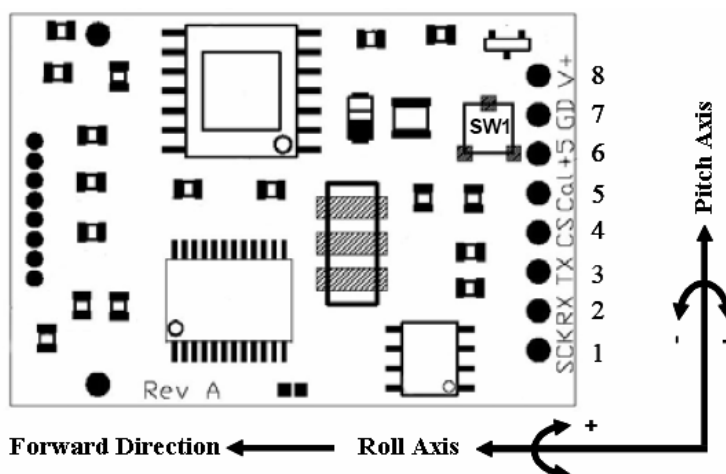
Obr. 2.1 – Magnetické pole Země s deklinací od osy rotace [29]

### 2.1 Magnetometr HMR3300

Jedním z inteligentních senzorů měřící magnetické pole Země je právě elektronický kompas HMR3300 (obr. 2.2) firmy Honeywell. Jedná se o 3-osý magnetometr, který pro měření využívá tři ortogonálně umístěné magnetorezistivní senzory a MEMS akcelerometry pro kompenzaci příčného a podélného náklonu. Ty mohou dosahovat hodnoty max.  $\pm 60^\circ$ .



Obr. 2.2 – Fotografie digitálního kompasu HMR3300 [6]



Obr. 2.3 – Deska plošných spojů digitálního kompasu HMR3300 [6]

Obr. 2.3 ukazuje horní stranu desky plošných spojů magnetometru. Ta obsahuje kromě pinů pro připojení ještě další dva volné, které slouží pouze pro mechanické uchycení. Dále pak LED diodu pro signalizaci inicializace po spuštění napájení či resetu přístroje. SW1 značí přepínač sloužící pro volbu napájení +5V stabilizovaného napětí při použití pinu 6 (v krajní poloze proti směru hodinových ručiček) či +6 až +15V nestabilizovaného napětí při použití pinu 8 (v krajní poloze ve směru hodinových ručiček). Chybné nastavení přepínače může zapříčinit chybnou nebo žádnou odezvu. Není vhodné používat napájení pro oba tyto vstupy současně.

Způsob komunikace s magnetometrem HMR3300 viz kapitoly 5,7.

## 3 Sériová komunikační rozhraní

V dnešní době obsahuje již téměř každé zařízení mikroprocesor, jakožto programovatelnou řídicí jednotku. Tato jednotka musí být schopna komunikovat jak s částmi vlastního zařízení, např. LCD displejem, externí paměti, senzory, tak i s dalšími připojenými přístroji jako např. PC. Nejvíce rozšířená jsou díky výhodám sériového přenosu (malý počet signálových vodičů) právě sériová komunikační rozhraní, která navíc patří k běžné výbavě mikroprocesoru.

Jako nejběžnější rozhraní nalezneme synchronní sběrnici SPI (kapitola 3.1) a asynchronní UART (kapitola 3.2). Další rozhraní jsou pak TWI neboli I<sup>2</sup>C (kapitola 3.3) či průmyslově rozšířená sběrnice CAN. Ve zvláštních případech jsou procesory vybaveny digitálním rozhraním pro zvuk I2S.

### 3.1 Sériové synchronní rozhraní SPI

Serial Peripheral Interface Bus (nebo jen SPI) je v dnešní elektronice velmi rozšířené rozhraní. Použití nachází v komunikaci s nejrůznějšími senzory (teplotními, tlakovými, atd.), AD a DA převodníky, LCD a dotykovými displeji, paměti typu Flash, EEPROM a paměťovými kartami jako MMC a SD. Pro většinu mikroprocesorů (AVR, x51, ARM, PIC) slouží toto rozhraní pro jejich naprogramování. [5] [18] [25]

#### 3.1.1 Princip SPI sběrnice

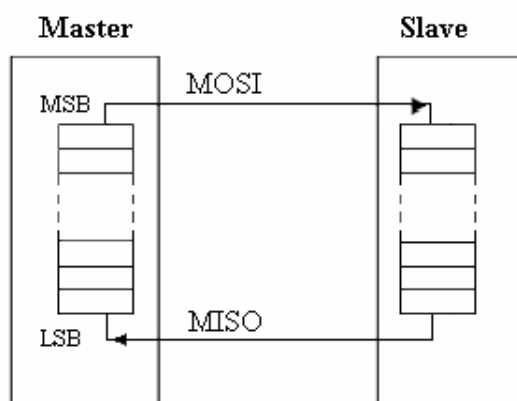
Jedná se o synchronní sériové rozhraní umožňující plně duplexní komunikaci jedné řídicí jednotky (Master) s několika dalšími zařízeními (Slave) pomocí společné sběrnice. Ta sestává ze 4 signálů, z jejichž názvů je patrná funkce:

- **MOSI** (*Master Out Slave In*) – někdy označováno jako SI či SDI (*Slave Input* či *Slave Data Input*)
- **MISO** (*Master In Slave Out*) – někdy označováno jako SO či SDO (*Slave Output* či *Slave Data Output*)
- **SCLK** nebo **SCK** (*Serial Clock*) – signál generuje jednotka ve funkci Master,

slouží pro řízení a synchronizaci přenosu dat

- **CS** (*Chip Select*) – aktivní v log.0, u některých procesorů se značí *SS* (*Slave Select*), slouží k aktivaci Slave jednotek, nastaven do inaktivní log.1 až po dokončení přenosu dat

Principiální základ SPI periférie tvoří posuvný registr. Příslušná hrana řídicího signálu způsobí posun dat v obou jednotkách. Vysílání dat tedy nutně probíhá zároveň s příjmem. Z obrázku 3.1 je zřetelné, že jako první bit se vysílá nejvyšší bit, MSB (Most Significant Bit).



Obr. 3.1 – Princip funkce SPI periférie [25]

### 3.1.2 Varianty synchronizačního signálu

Přenos jednotlivých bitů řídí signál SCLK. Pro něj je zapotřebí definovat klidovou úroveň (polaritu) a hrany signálu pro zápis a čtení (fázi). K dispozici jsou 4 SPI módy – 4 kombinace polaritu a fáze. Tyto módy musí být shodné v obou zařízeních, které spolu komunikují. Pokud jsou na sběrnici jednotky, jejichž SPI módy se navzájem liší, musí procesor pro každou jednotku před začátkem komunikace překonfigurovat nastavení svých registrů.

Módy sběrnice se nastavují pomocí dvou bitů v Chip Select Registru. Jejich běžné značení je CPOL pro polaritu a CPHA pro fázi. U procesoru AT91SAM7X256 se liší značení fáze – NCPHA. Jak naznačuje tabulka, její hodnota je opačná než pro CPHA.

SPI Mod	CPOL	CPHA	NCPHA
0	0	0	1
1	0	1	0
2	1	0	1
3	1	1	0

Tab. 3.1 – SPI mody synchronizačního signálu SCLK

Pro **CPOL = 0** je klidová úroveň log.0

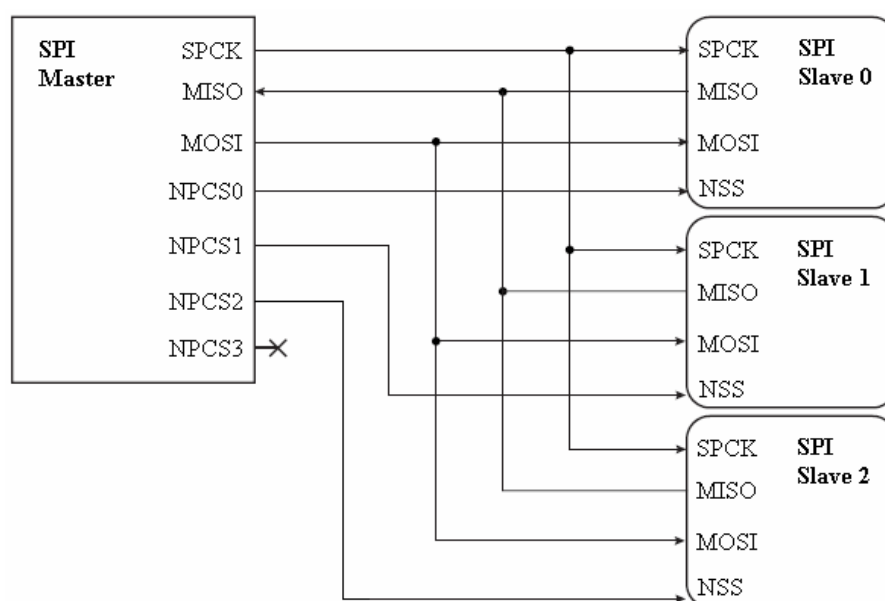
- **CPHA = 0** – data jsou čtena při *náběžné* hraně a změněna při *sestupné*
- **CPHA = 1** – data jsou čtena na *sestupné* hraně a změněna při *náběžné*

Pro **CPOL = 1** je klidová úroveň log.1

- **CPHA = 0** – data jsou čtena na *sestupné* hraně a změněna při *náběžné*
- **CPHA = 1** – data jsou čtena při *náběžné* hraně a změněna při *sestupné*

### 3.1.3 SPI sběrnice mikroprocesoru AT91SAM7X256

Mikroprocesor AT91SAM7X256 typu ARM7 používaný pro komunikaci s magnetometrem HMR3300 disponuje dvěma SPI rozhraními, z nichž každé má čtyři signály typu CS. Délku posuvného registru je možno zvolit od 8 do 16 bitů. Následující obrázek demonstruje typické zapojení na sběrnici třech Slave jednotek.



Obr. 3.2 – Běžné způsob zapojení Single Master/ Multiple Slave SPI sběrnice [5]

Pomocí log.0 na vodiči CS vybere mikroprocesor jednu konkrétní jednotku, se kterou bude komunikace probíhat. Ostatní jednotky jsou neaktivní a výstupy mají ve stavu vysoké impedance. Po nastavitelném čase, kdy je signál CS na aktivní log.0, začne Master vysílat synchronizační signál zároveň s daty.

Nejběžnější způsob výměny dat mezi jednotkami lze ukázat na komunikaci s gyroskopem ADIS16255, viz kapitola 3.1.6.

### 3.1.4 Způsoby adresace pomocí CS signálů

Počet prvků na sběrnici bývá limitován komunikačním protokolem (počtem vyhrazených adresových bitů) nebo proudovým odběrem přijímačů (např. RS485 – 32 přijímačů z důvodu definované vstupní impedance obvodů 12kΩ a terminačních odporů 120Ω). V případě SPI sběrnice je počet prvků omezen počtem pinů Chip Select náležící periférii (v případě, že nepoužijeme pomocné GPIO piny).

Periférie procesoru AT91SAM7X256 disponuje čtyřmi vodiči Chip Select. Pro volbu způsobu adresace pak slouží SPI Mode Registr:

Bit PS určuje, zdali bude komunikace probíhat s jediným nebo s více zařízeními.

- **Fixed Peripheral Mode (PS = 0)** – adresu jednotky Slave určíme čtveřicí bitů PCS v Mode Registru. Tabulka 3.2 naznačuje, který ze čtyř Chip Selectů bude aktivní. Pro zvolení jiné jednotky je tedy nutno přeprogramovat tento řídicí registr.
- **Variable Peripheral Mode (PS = 1)** – adresu jednotky Slave určíme zápisem do Transmit Data Registru – opět čtveřicí bitů PCS (Tab. 3.2); naadresování tedy proběhne zároveň s předáním dat pro odeslání.

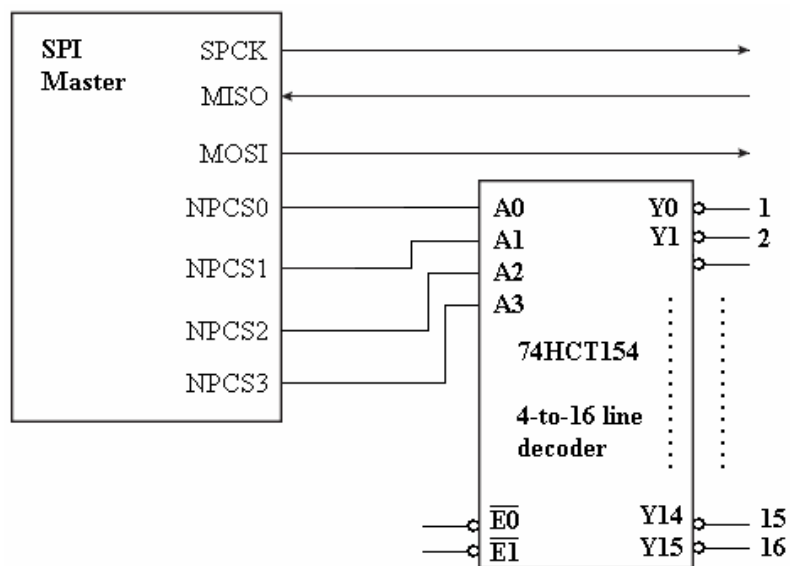
Bit PCSDEC definuje způsob fyzického připojení signálů Chip Select.

- **Přímé připojení jednotek (PCSDEC = 0)**
- **Připojení jednotek přes dekodér 1 z 16 (PCSDEC = 1)** – tento způsob nabízí rozšíření sběrnice až pro 16 Slave jednotek. Čtyři NPCS výstupy procesoru slouží pro aktivaci jednoho z 16ti výstupů dekodéru (např. 74HCT154) a tím i aktivaci připojené jednotky.

<b>PCSDEC = 0</b>	
PCS = xxx0	NPCS[3:0] = 1110
PCS = xx01	NPCS[3:0] = 1101
PCS = x011	NPCS[3:0] = 1011
PCS = 0111	NPCS[3:0] = 0111
PCS = 1111	Zakázaný stav
<b>PCSDEC = 1</b>	
PCS = 0000 až 1111	NPCS[3:0] = PCS

Tab. 3.2 – Způsoby adresace u mikroprocesoru AT91SAM7X256

Je zřejmé, že pokud použijeme Variable Peripheral Mode a bit PCSDEC nastavíme na log.1, pak můžeme libovolně komunikovat až s  $2^4$  tedy 16ti zařízeními jednoduchým zápisem do Transmit Data Registru.



Obr. 3.3 – Adresace 16ti Slave jednotek pomocí dekodéru 1 ze 16 (74HCT154 [8])

### 3.1.5 Další varianty SPI sběrnice

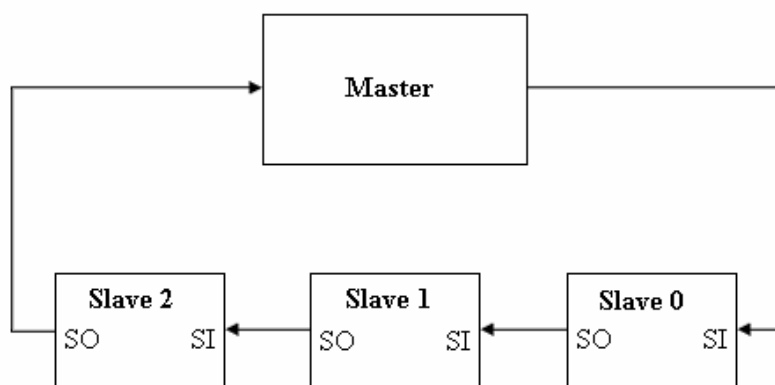
#### 3.1.5.1 Multiple byte stream mode

Některá zařízení podporují tzv. *multiple byte stream mode*. V tomto modu vysílá Master data neustále, proto musí být signál CS na log.0 po celou dobu přenosu. Tímto

způsobem funguje například zápis do paměti odesláním adresy a dat ve stejné streamové operaci.

### 3.1.5.2 Daisy-chained mode

Existují i zařízení s SPI rozhraním umožňujícím jejich sériové zapojení (obr. 3.4). Vysílaná data mohou procházet přes tyto zařízení dále v řetězci, Master pak vysílá 3 byty informací, z nichž každý jeden byte náleží právě jednomu zařízení.



Obr. 3.4 – Sériové zapojení daisy chain [25]

*Daisy-chained mode* nemůže fungovat u zařízeních, které podporují nebo dokonce vyžadují *multiple byte stream mode* operace (např. paměti).

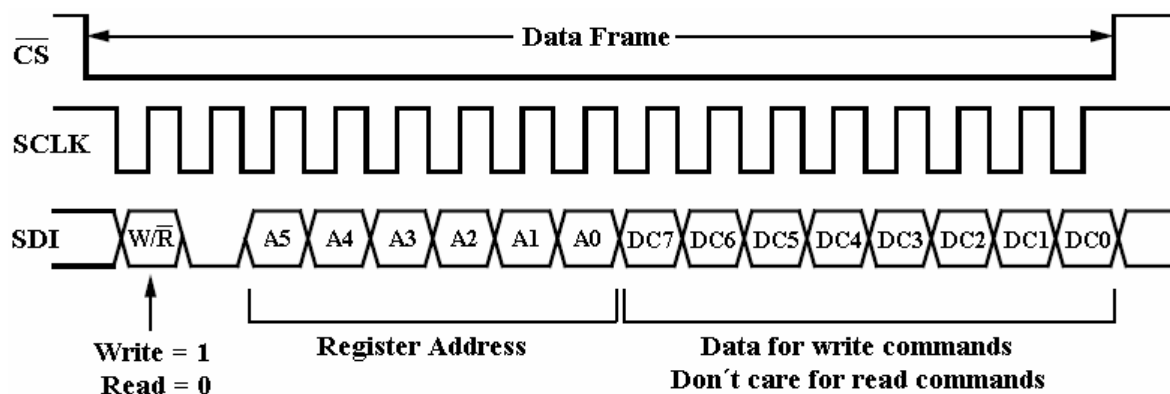
Příkladem zařízení podporující tento mode je 4-kanálový digitální potenciometr AD8403.

### 3.1.6 Běžný způsob komunikace po SPI (s gyroskopem ADIS16255)

Vzhledem k tomu, že SPI rozhraní není definováno formálním standardem, je možné se setkat s mnoha jeho variantami. Pro ukázkou zřejmě nejběžnějšího způsobu komunikace lze užít gyroskop ADIS16255 od firmy Analog Devices, který byl použit pro demonstraci zapojení více jednotek na SPI sběrnici spolu s magnetometrem HMR3300.

Gyroskop pracuje jako běžný Slave. Pro komunikaci používá datový rámec o velikosti 16-bit, což v případě použití mikroprocesoru AT91SAM7X256 není problém, neboť jeho periférie tuto délku rámce podporuje. Jinak by bylo nutné použít dva 8-bit rámce. Obr. 3.5 ukazuje takovýto jeden 16-bit rámec. [7]





Obr. 3.5 – Formát příkazu pro gyroskop ADIS16255 od jednotky Master [7]

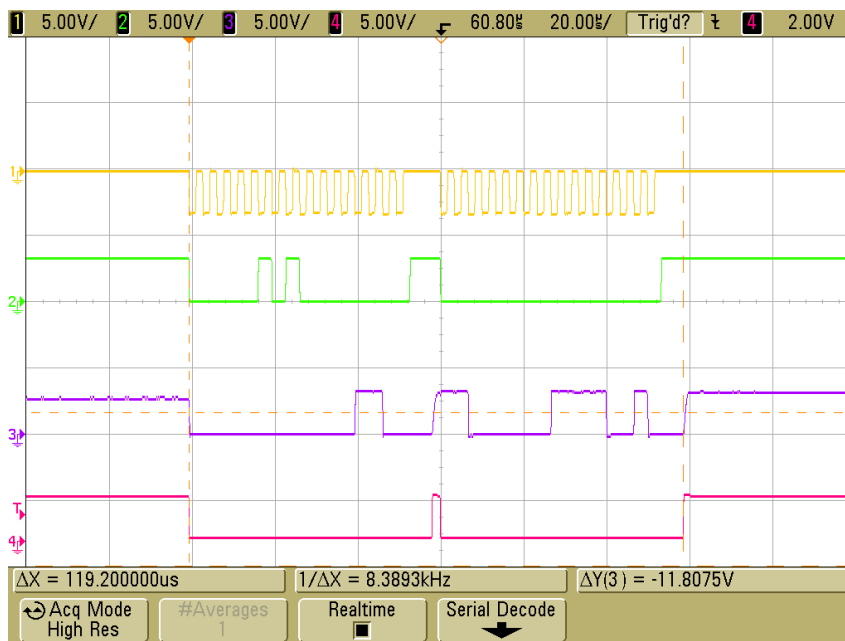
V prvním odesílaném rámcí tedy definujeme typ akce. Pro čtení zvolíme nejvyšší bit s hodnotou log.0. Bity A0-A5 definují adresu datového registru, ze kterého pak čteme požadovaná data. Pokud zvolíme data gyroskopu (s rozlišením 14-bit), zadáme adresu 0x04 či 0x05. Hodnota nejnižšího bitu v přepočtu na úhlovou rychlost, kterou gyroskop měří, je dána nastavením jednoho ze tří možných rozsahů měření. Dále např. pro volbu dat integrovaného teploměru (s rozlišením 12-bit) zadáme adresu 0x0C či 0x0D.

Při této první komunikaci zároveň odešle Slave 16-bit rámeček, jehož obsah je závislý na předchozím příkazu. Pokud tedy čteme poprvé (nebo předchozí příkaz nebyl platný), jedná se o nedefinovaná data, která ukládáme v procesoru do pomocného registru běžně označovaného jako „dummy“. V druhém 16-bit rámcí již obdržíme příslušná data.

Jako obvyklý způsob výměny naměřených hodnot bývá odesílání příkazu a čtení do „dummy“ registru během přenosu prvního rámečku, během přenosu druhého rámečku pak příjem požadovaných dat a odesílání prázdného příkazu.

Obdržený rámeček požadovaných dat má dva nejvyšší bity příznakové. Nejvyšší bit v případě hodnoty log.1 signalizuje, že se jedná o nová data. Druhý nejvyšší bit je nastaven v případě signalizace alarmu. Spodní bity jsou pak datové.

Reálnou komunikaci je možné vidět na obr. 3.6. Obrovskou výhodou tohoto gyroskopu oproti magnetometru (viz kapitola 4) je funkce ve Slave modu, dále pak rychlost obnovení naměřených dat v řádu stovek Hz a v neposlední řadě rychlost vlastního přenosu, kdy signál SCLK může dosahovat až frekvence řádově jednotek MHz.



Obr. 3.6 – Komunikace s gyroskopem ADIS16255 po sběrnici SPI

### 3.1.7 Výhody a nevýhody SPI sběrnice

Jako výhody lze uvést například plně duplexní komunikaci, vyšší propustnost než u rozhraní TWI, flexibilní protokol (volitelná velikost rámce, význam bitů), méně potřebných pinů než u paralelních rozhraní, Slave jednotky nepotřebují přesné vlastní oscilátory.

Nevýhodou SPI je vyšší počet pinů oproti TWI, nutnost externí adresace jednotek pomocí signálů CS namísto protokolní adresace přímo v odesílaném rámci, podpora pouze jedné Master jednotky na sběrnici, pouze kratší vzdálenosti v porovnání s RS-232, RS-485 či sběrnici CAN, nestandardizace rozhraní. Při komunikaci též Master neví, zdali Slave naslouchá, není potvrzován příjem.

## 3.2 Sériové asynchronní rozhraní UART

Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (nebo jen UART) patří mezi základní a velmi oblíbené komunikační rozhraní mikroprocesorů. Principiálně je základem dobře známého standardu EIA RS-232, který je u PC představován sériovým portem, [16] [20]. Jeho největší nevýhodou je především nízká rychlost a topologie typu bod-bod. I přes jeho snadné

použití je v dnešní době v oblasti počítačů vytlačován rychlejšími sériovými rozhraními s topologiemi typu strom jako je USB (navíc podporující filozofii Plug&Play) a Fire-Wire (IEEE 1394). U mikroprocesorů však nadále patří k běžným rozhraním. [5] [19]

### 3.2.1 Princip rozhraní UART

Jedná se o asynchronní sériové rozhraní umožňující plně duplexní komunikaci a to pouze mezi dvěma jednotkami. Oproti SPI příjem a vysílání probíhá nezávisle na sobě. Toto rozhraní sestává ze dvou signálů:

- **TxD** (*Transmit Data*) – pro odesílání dat
- **RxD** (*Receive Data*) – pro příjem dat

Pokud nejsou přenášena žádná data, setrvává signál na datovém vodiči v klidové úrovni (obvykle log. 1). Přenos dat začíná tzv. *start bitem* (má opačnou hodnotu než úroveň klidová). Hranou start bitu dojde k sesynchronizování na straně přijímače. Poté již přenos probíhá asynchronně a jednotlivé bity jsou vzorkovány v polovině bitových intervalů. Vzhledem k tomu, že obě zařízení jsou řízena vlastním zdrojem hodinového signálu, nesmí se jejich hodinové frekvence lišit o více než 5%. Jinak by totiž nebyl zajištěn korektní příjem bitů. Po *start bitu* následuje 5 až 9 (obvykle 7 či 8) bitů datových. Jako první datový bit je přenášén LSB (Least Significant Bit). Po datových bitech je vysílán jeden *stop bit* (výjimečně dva), jehož hodnota je shodná s klidovou úrovní.

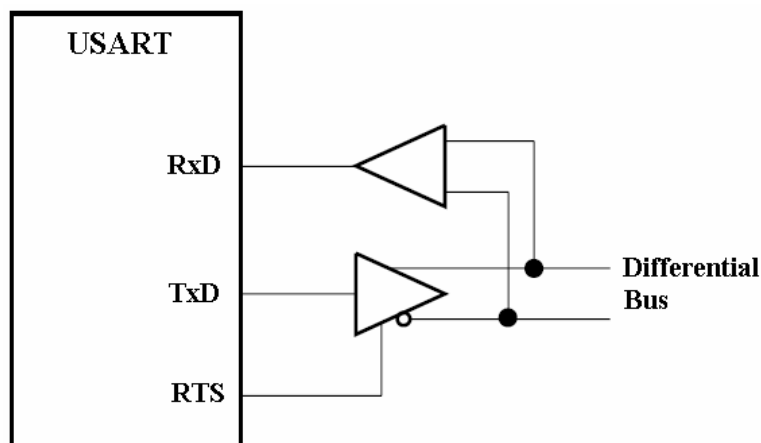
Pro jednoduchou kontrolu správného přenosu dat se někdy používá sudá či lichá parita, *paritní bit* je pak vložen mezi poslední datový bit a stop bit. [4]

Je jasné, že musí být oba formáty těchto rámců nastaveny při přenosu na obou zařízeních stejně. Zároveň je ovšem nezbytně nutné nastavit shodnou rychlost na obou zařízeních. Rychlost přenosu se udává v baudech Bd (používané rychlosti od 2400 do 115200 baudů). V případě UART rozhraní platí, že 1 Bd = 1 bit/s.

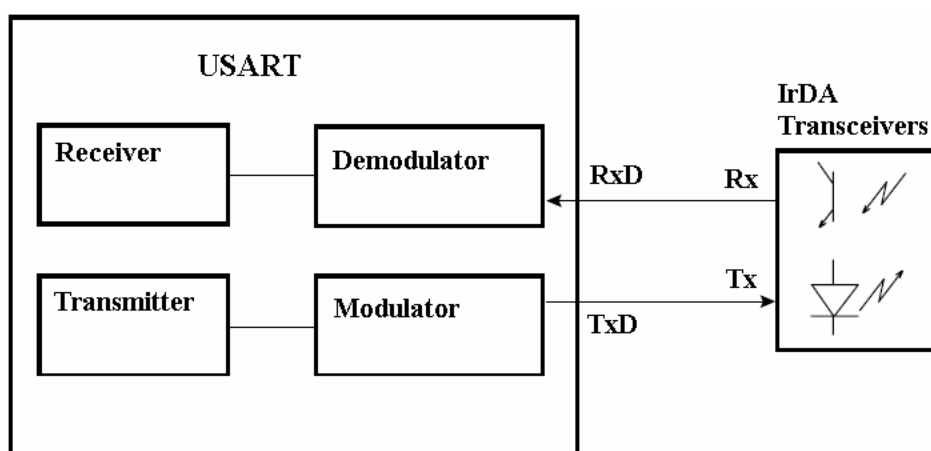
### 3.2.2 Rozšířená verze periférie u mikroprocesoru AT91SAM7X256

Mikroprocesor AT91SAM7X256 nabízí rozšířenou variantu této periférie – USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transceiver). Ta může pracovat jak

v běžném asynchronním, tak i synchronním režimu. Jako další rozšiřující možnosti nabízí funkci na sběrnici standardu RS-485, který tedy není svázán s žádným komunikačním protokolem, ale definuje pouze fyzickou vrstvu.



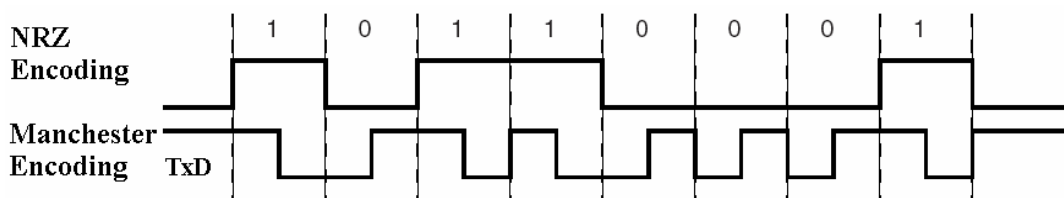
Obr. 3.7 – Periférie USART procesoru AT91SAM7X256 v modu RS-485 připojená na sběrnici přes diferenční členy [5]



Obr. 3.8 – Periférie USART procesoru AT91SAM7X256 v modu IrDA [5]

Nabízí též funkci v half-duplexním bod-bod bezdrátovém IrDA Modu, v Modem, ISO 7816 (použití tohoto rozhraní nalezneme na tzv. smart kartách např. pro kreditní karty apod. [22]) nebo Test modu.

Vedle běžného a jednoduchého bipolárního kódování NRZ (Non Return to Zero), kdy log.1 odpovídá úrovni H a log.0 úrovni L, je u AT91SAM7X256 možnost použít fázovou modulaci NRZ – Manchester, u které nastává změna úrovně vždy uprostřed znaku viz obr. 3.9. [23]



Obr. 3.9 – Výstupní signál na pinu TxD v režimu Manchester kódování [5]

### 3.3 Sériové rozhraní TWI (I<sup>2</sup>C)

Další velmi rozšířené sériové rozhraní, kterým mikroprocesor AT91SAM7X256 disponuje, je Two-Wire Interface od firmy Philips (nebo také I<sup>2</sup>C – Inter-Integrated Circuit). Použití nachází v sériovém přístupu k pomalým AD a DA převodníkům, v komunikaci s nejrůznějšími senzory, Two-wire EEPROM paměťmi firmy Atmel, dále se zobrazovacími jednotkami OLED či LCD např. v mobilních telefonech. Též můžeme uvést kamerové moduly (např. C3088 [9]), u kterých se I<sup>2</sup>C rozhraní používá pro nastavení vlastností obrazu jako je jas, sytost, kontrast atd. [5] [21]

#### 3.3.1 Princip rozhraní TWI (I<sup>2</sup>C)

Jedná se o synchronní sériové rozhraní s poloduplexní komunikací. Zatímco SPI sběrnice umožňuje komunikaci pomocí čtyř vodičů s jednou jednotkou (každá další jednotka na sběrnici potřebuje další vodič Chip Select), TWI sběrnice komunikuje pouze po dvou vodičích až se 128 zařízeními (obr. 3.10). Velkou výhodou je také potvrzování příjmu ze strany Slave jednotky a možnosti práce několika Masterů na sběrnici.

Adresace jednotky je obsažena uvnitř odesílaného rámce (obr. 3.11). Po inicializaci komunikace je přenášeno 7 adresových bitů a 1 bit určující směr dat (Read/Write). Následují datové byty. Přenosy vyžadují, aby každý byte byl potvrzen. Během pulzu TWCK, kdy má

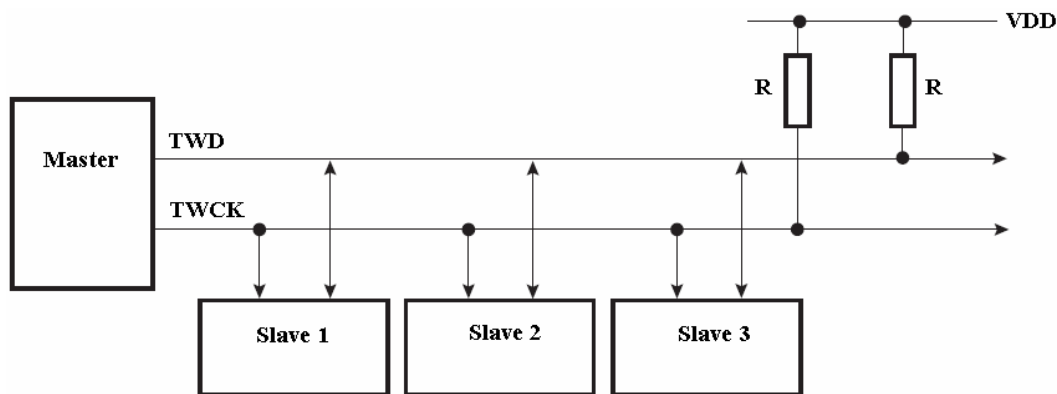
proběhnout potvrzení, uvolní Master datový vodič TWD. Slave jednotka pak stáhne úroveň do log.0, čímž potvrdí příjem (Ack).

Rychlost přenosu dat může být u AT91SAM7X256 nastavena maximálně až na 400 kbit/s (norma pro I<sup>2</sup>C však definuje 3 maximální rychlosti rozhraní: 400 kbit/s *Fast mode*, 1 Mbit/s *Fast mode plus* a 3.4 Mbit/s *High Speed mode*).

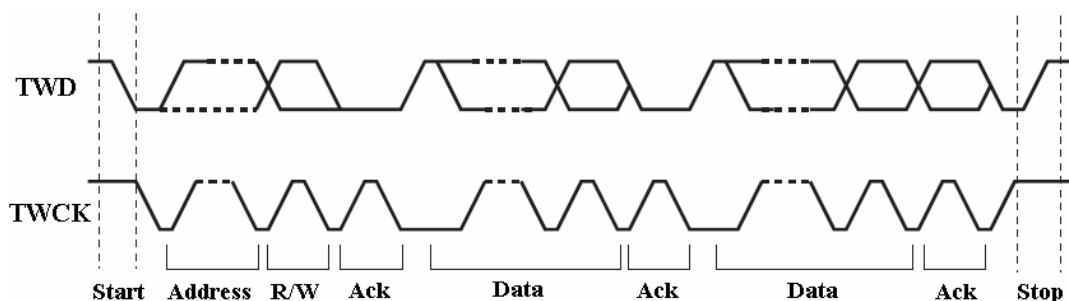
Jak bylo výše zmíněno, sběrnice sestává ze 2 signálů:

- **TWCK** (*Two-Wire serial Clock*) – synchronizační signál
- **TWD** (*Two-Wire serial Data*) – datová cesta

TWD a TWCK piny musí být typu otevřený kolektor. V neaktivním stavu, kdy jsou kolektory zavřeny, je na sběrnici log.1 přiváděná přes pull-up rezistory. Běžně používané úrovně jsou +3.3V či +5V.



Obr. 3.10 – Principiální zapojení sběrnice Two-Wire Interface [5]



Obr. 3.11 – Formát přenášeného řetězce od jednotky Master [5]

## 4 Magnetometr na sběrnici SPI

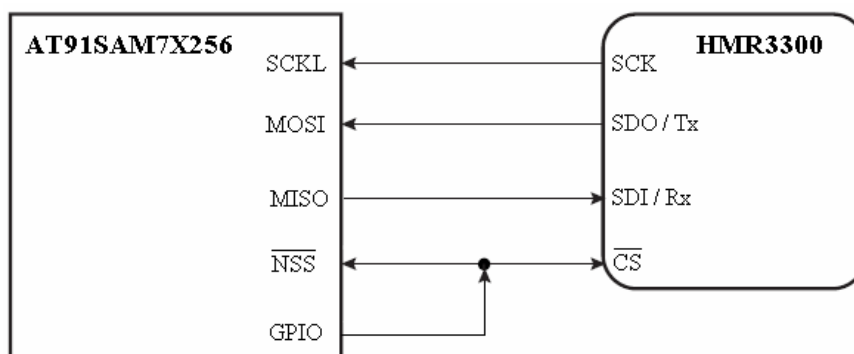
### 4.1 Fyzické připojení magnetometru ke sběrnici SPI

Téměř v každém případě, pokud používáme sběrnici SPI pro přenos dat mezi senzory a procesorem, se dá předpokládat, že senzory fungují na sběrnici ve funkci Slave a naopak procesor ve funkci Master, jakožto řídicí jednotka celé sběrnice. Pro komunikaci s magnetometrem HMR3300 firmy Honeywell tento předpoklad neplatí. I samotné zapojení a funkční přiřazení signálů na sběrnici se od obvyklého schématu, který byl též popsán v kapitole 3.1, liší.

V tomto případě procesor řídí magnetometr vstupem Chip Select, odesílá mu příkaz po datovém SDI (MISO). Naopak senzor řídí procesor synchronizačním signálem SCK a datovým SDO (MOSI) vysílá zpět naměřená data (obr. 4.1). Magnetometr funguje na sběrnici jako Pseudomaster, procesor tedy nastavujeme jako Slave.

U magnetometru mají synchronizační a datové signály značení – SCK (Synchronous data Clock), SDI a SDO (Synchronous Data Input / Output), CS (Chip Select). Na desce plošných spojů je značení pro UART (Tx, Rx) rozhraní. Pro UART i SPI jsou tyto piny společné. Druhé značení pro Tx je v synchronním režimu SDO a SDI pro Rx. Vzhledem k tomu, že obě jednotky mají Chip Select nastaven jako vstup, je nutné použít další pin procesoru ve funkci GPIO (General Purpose Input/Output) jako běžný výstup, který pak ovládáme programově a kterým inicializujeme komunikaci.

Napěťová úroveň signálů mikroprocesoru je +3,3V a magnetometru +5V. Přímé spojení nepředstavuje problém, neboť +3,3V je v rámci tolerance CMOS logických úrovní a mikroprocesor má 5V-tolerantní vstupy.



Obr. 4.1 – Schéma zapojení pro komunikaci s magnetometrem HMR3300 po sběrnici SPI

### **4.1.1 Nevýhoda zapojení magnetometru na sběrnici SPI**

Značnou nevýhodou zapojení je především to, že procesor vystupuje ve funkci Slave a senzor ve funkci Pseudomaster. To nám znemožní snadno využívat celou sběrnici i pro připojení dalších jednotek a ovládat ji procesorem, jak tomu zpravidla bývá. V ideální konfiguraci sběrnice (procesor ve funkci Master) obstarává veškerou režii přenosů sama periferie, kdy se jedním zápisem do vysílacího registru předávají data pro odeslání a zároveň adresuje podřadná jednotka.

Další nevýhodou, ne však natolik zásadní, je též nutnost použití přídavného pinu procesoru ve funkci GPIO. Signál z tohoto výstupu nemusí být nutně připojen na oba vstupy NSS a CS. Procesor může mít svůj vstup stále uzemněn.

## **4.2 Fyzické rozšíření sběrnice pro připojení dalších jednotek**

Vzhledem k tomu, že senzor je schopen maximální obnovovací frekvence naměřených dat pouze 8 Hz a navíc odpovídá žádosti procesoru jen v těsné blízkosti jejich obnovení v registrech (více kapitola 5), je možné využít dobu nečinnosti magnetometru pro obsluhu ostatních jednotek.

### **4.2.1 Princip rozšíření sběrnice SPI**

Jelikož rozhraní magnetometru může pracovat i v asynchronním režimu, je nutné jej od sběrnice celkově odpojovat použitím například sběrnicového oddělovače (bus buffer), který je schopen své výstupy zavést do stavu vysoké impedance a tím odpojit magnetometr od sběrnice. Příkladem může být obvod 74244 nebo 74541. O reálné implementaci více jednotek na sběrnici viz kapitola 5.6.

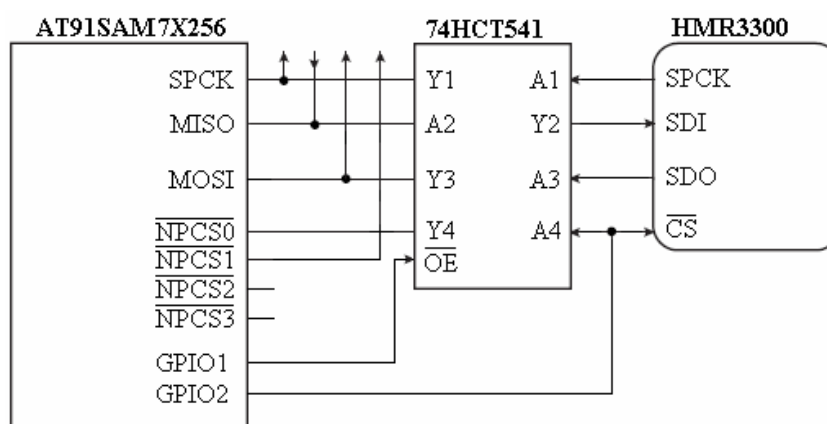
Běh sběrnice pak musí být zvlášť programově ošetřen. Obr. 4.2 naznačuje připojení magnetometru přes oddělovač. Jeho vstupy jsou značeny Ax a výstupy Yx. Vstup OE ovládá výstupy, které jsou při jeho neaktivní úrovni ve stavu vysoké impedance, [10]. V první fázi se provede synchronizace s řídicím procesorem (viz kapitola 5.4), která zajistí definovanou dobu odezvy. Po přijetí dat od magnetometru je SPI periferie procesoru přepnuta do modu Master, pomocí výstupu GPIO1 sběrnicový buffer deaktivován a je spuštěn TIMER, který procesoru



vymezuje dobu, která může být využita pro komunikaci s ostatními jednotkami. Po jejím uplynutí je procesor opět nastaven do modu Slave, buffer aktivován a na CS magnetometru a vstup NPCS0 procesoru je zavedena úroveň L pomocí GPIO2.

Je jasné, že pin NPCS0 nebude možné využít pro adresaci Slave jednotky, neboť pokud bychom přivedli pomocným pinem GPIO2 log.0, která aktivuje procesor a magnetometr, došlo by tímto i k aktivaci připojené Slave jednotky. Pro ně tedy bude možné využít piny NPCS1..3, s pomocí dekodéru získáme tedy maximálně 8 adres.

Pomocí přerušení od periférií SPI a TIMER jsou nastavovány příznaky sloužící pro signalizaci aktuálního režimu komunikace na sběrnici.



Obr. 4.2 – Způsob rozšíření SPI sběrnice pomocí sběrnice oddělovače 74HCT541

### 4.3 Alternativní komunikace pomocí externího interruptu

Vzhledem k tomu, že SPI protokol je principiálně jednoduchý, lze jej vcelku snadným způsobem implementovat softwarově. Procesor typu ARM7, který byl pro zprovoznění komunikace používán, má možnost nastavit libovolný pin portu jako zdroj externího přerušení, na kterém pak lze detekovat změnu logické úrovně vstupního signálu. K tomuto účelu by sloužil vstup GPIO1 dle obr. 4.3. Každá detekce změny úrovně potřebuje jeden hodinový cyklus, což nám při frekvenci krystalu 18,432 MHz nečiní žádné potíže.

Při každé obsluze přerušení bychom po jednom bitu buď četli data na vstupu GPIO2, nebo je zapisovali na výstup GPIO3 v závislosti na polaritě příslušné hrany synchronizačního signálu. Výstupem GPIO4 bychom inicializovali a ukončovali komunikaci.



Obr. 4.3 – Zapojení magnetometru při softwarovém řešení komunikace

#### 4.3.1 Výhoda SW řešení komunikace

Tímto způsobem ušetříme oproti předchozímu zapojení pin procesoru a SPI periférii pro možnost běžnějšího a efektivnějšího způsobu využití.

#### 4.3.2 Nevýhoda SW řešení komunikace

Nevýhodou je větší část procesorového času v době čtení ze senzoru, neboť je nutná obsluha přerušení pro každou změnu úrovně SCK. Dále pak složitější programová implementace čtení a zápisu dat pomocí rotací bytů.

## 5 Získávání dat z magnetometru po SPI sběrnici

### 5.1 Příkazy od procesoru, typ dat v SPI modu

Oproti UART modu, který magnetometr také nabízí (více kapitola 6), má SPI mód jen velmi omezené možnosti – neobsahuje příkazy pro výběr dat měřených magnetometrem, příkazy pro změnu rychlosti přenosu dat, pro nastavení offsetů magnetosenzorů či akcelerometrů, nastavení filtrů a pro reset senzoru. Je možné, že SPI rozhraní je pouze jakási nástavba pro asynchronní rozhraní UART, které je pravděpodobně pro komunikaci se senzorem primární.

Údaj, který je v SPI modu poskytován, je **azimut** pomocí příkazu „h“ či „H“. [6]

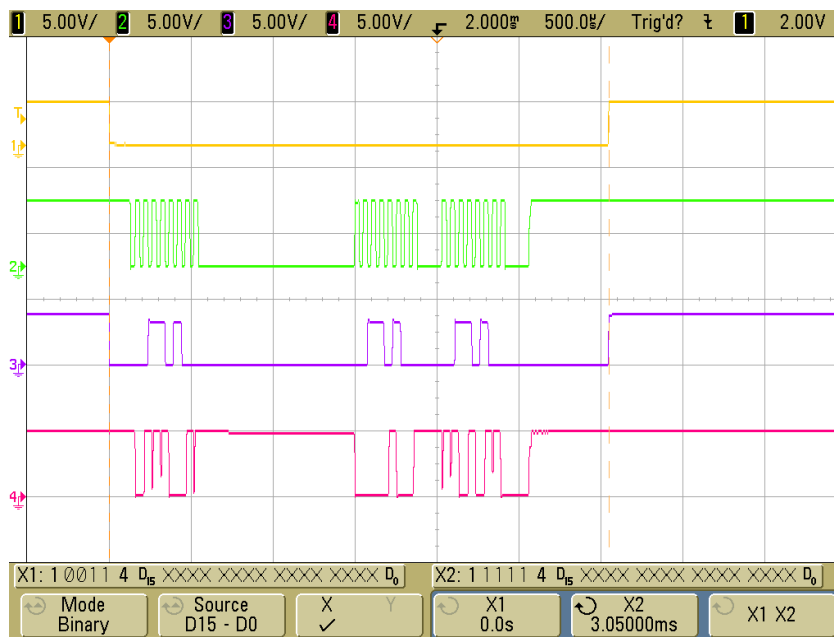
## 5.2 Žádost o naměřená data

Pro inicializaci komunikace zavede procesor úroveň L na vstup magnetometru CS. Procesor musí být též aktivován pomocí NSS (viz kapitola 4.1). Po uplynutí určité doby začne magnetometr generovat synchronizační signál a zároveň vysílat první byte přenosu. Hodnota prvního bytu odpovídá ordinálnímu číslu znaku „s“ v ASCII tabulce. Zároveň během přenosu tohoto bytu musí procesor vyslat platný příkaz, byte o hodnotě odpovídající ordinálnímu číslu znaku „h“ nebo „H“ (souběžně s následujícími datovými byty bychom příkaz již nemuseli vysílat, jako je tomu na obr. 5.1). Magnetometr příchozí příkaz vyhodnotí. Pokud není platný, odpoví ve druhém bytu znakem „e“ a ukončí komunikaci. V případě, že obdržený příkaz je vyhodnocen jako platný, odešle magnetometr cca po 800-900  $\mu\text{s}$  dva datové byty a ukončí komunikaci zavedením úrovně H na svůj výstup SCK, ve které již setrvá. Jako první je odeslán vyšší byte (MSB – Most Significant Byte) hodnoty kurzu, po cca 50  $\mu\text{s}$  (dle datasheetu; ve skutečnosti bylo osciloskopem naměřeno 125  $\mu\text{s}$ ) následuje nižší (LSB – Least SB). Tyto dva byty dat reprezentují hodnotu typu integer o velikosti desetinásobku hodnoty azimutu, tedy číslo 0000 až 3599 – hodnota azimutu je 000.0° až 359.9°.

V prvním datovém bytu může být největší vysílaná hodnota 0x0E, čili nehrozí situace, že bychom obdrželi hodnotu znaku „e“ (0x65), kterou by procesor vyhodnotil jako konec přenosu.

Pokud bychom i nadále ponechali úroveň L na vstupu CS, k žádnému dalšímu vysílání by již nedošlo – o data žádáme **sestupnou hranou**.

Co se týče signálu SCLK, který je generován magnetometrem, trvá úroveň H 16  $\mu\text{s}$  a úroveň L 22  $\mu\text{s}$  (dle datasheetu; ve skutečnosti byl naměřen čas 28  $\mu\text{s}$  úrovně H, 23  $\mu\text{s}$  úrovně L, což zhruba odpovídá maximální rychlosti přenosu 19200 baudů za sekundu přes UART rozhraní magnetometru).



Obr. 5.1 – Průběh komunikace po SPI sběrnici (Shora signály CS, SCK, SDI, SDO).

Délka celého přenosu (rozdíl hodnot kurzorů) je cca 3 ms.

Signál magnetometru SCK má klidovou úroveň L (hodnota napětí mezi přenosy jednotlivých znaků viz zelený průběh obr. 5.1), avšak v době mimo tento přenášený rámec má hodnotu H. Z této skutečnosti následně vyplyne přítomnost další hrany, která způsobí posun v registru SPI! V softwarové implementaci je toto řešeno nastavováním posuvného registru SPI na velikost 9-bit pro první příchozí znak, pro následující dva je pak nastavována velikost na 8-bit.

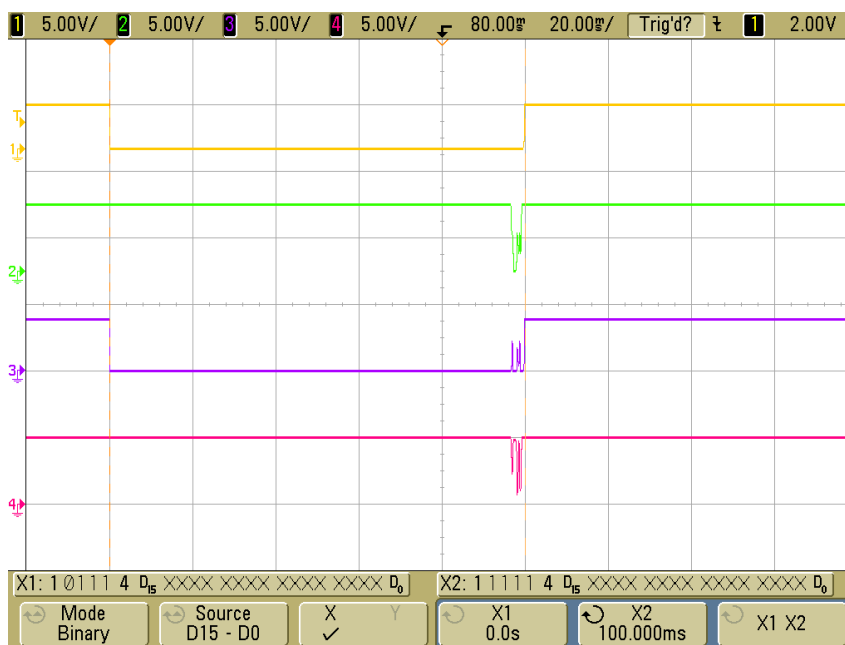
### 5.3 Odezva magnetometru na časově náhodnou žádost

Senzory, které na sběrnici fungují jako Slave, čekají na inicializační signál CS a následně synchronizační SCK (jako příklad lze uvést gyroskopy ADIS16255 použité pro stabilizovanou kamerovou základnu MAMOK navrhovanou pro bezpilotní letoun). Dá se říci, že Slave jednotky na sběrnici jsou přinuceny odpovědět řídicí jednotce nehledě na moment příchodu žádosti o data. V případě magnetometru, který na sběrnici pracuje jako Pseudomaster, je tomu ovšem jinak.

Magnetometr HMR3300 má obnovovací frekvenci hodnoty kurzu v obou modech (SPI a UART) jen 8 Hz, (pro porovnání – např. výše zmíněné gyroskopy mají frekvenci až 255 Hz). Magnetometru tedy trvá 125 ms, než dojde k výměně dat v jeho registrech.

Při náhodné žádosti o data tedy rozhoduje moment v rámci těchto 125 ms, kdy je žádost obdržena. Z obr. 5.1 je zřetelné, že žádost o data přišla velmi blízko momentu obnovení, tedy veškerá komunikace proběhla již během 3 ms od inicializace spádovou hranou.

Naopak na obr. 5.2 je znázorněna odezva magnetometru až po 96 ms příchodu žádosti, veškerý přenos dat proběhne až během posledních 3-4 ms. Při tomto rozsahu časové osy není patrný průběh dat, mohlo by se zdát, že jde jen o napěťové špičky. Po zmenšení rozsahu časové osy je již vidět průběh jako na obr. 5.1.



Obr. 5.2 – 100 ms požadavek dat – senzor odpoví až po cca 96 ms od spádové hrany na CS.

Signály magnetometru shora: Chip Select, Synchronous Clock, SDI, SDO

Z těchto různých dob odezvy plyne, že je nutná synchronizace procesoru s obnovovací frekvencí magnetometru.

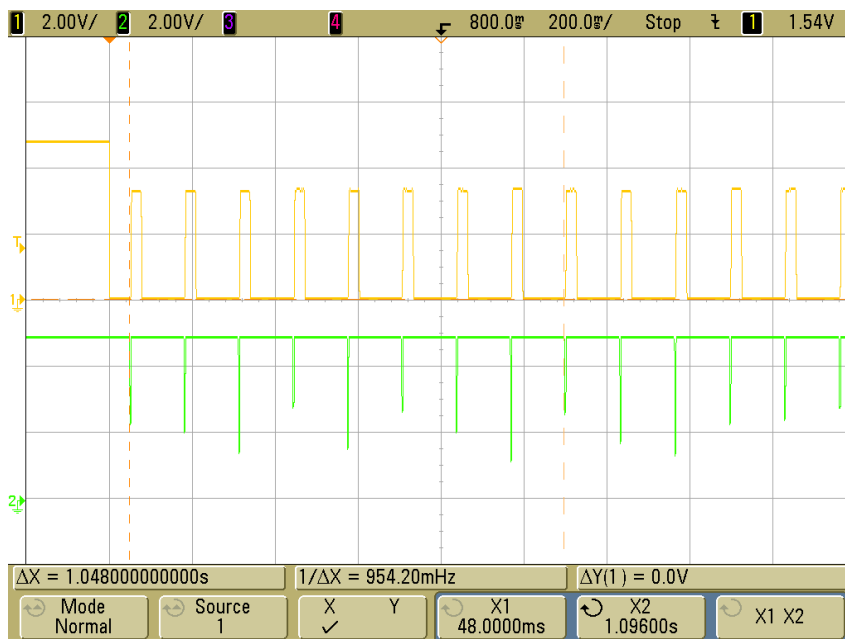
## 5.4 Synchronizace procesoru s magnetometrem

Cílem synchronizace je zjistit čas, ve kterém dochází k obnově hodnoty kurzu v registrech senzoru. Pro komunikaci tedy budeme nastavovat dva časové intervaly.

- **Timeout**, ve kterém umožníme senzoru odeslat naměřená data (CS nastavíme do úrovně L). Tento interval musí být proměnný (omezený shora námi zvoleným maximálním časem). V případě, že dojde k SPI interruptu, ve kterém se ukládá třetí tedy poslední byte, interval předčasně ukončíme. Timeout je flexibilní především kvůli prvnímu čtení z magnetometru, kdy není známo, v jakém okamžiku, v rámci 125 ms potřebných pro měření, požadavek na data přijde. Po synchronizaci nebude využit celý.
- **Idle period**, ve kterém ponecháme senzor v nečinném stavu (CS nastavíme do klidové úrovně H) a můžeme sběrnici využít pro jiné jednotky. Její minimální doporučená hodnota, při které nedochází ke opakovanému odesílání dat, je cca 25 ms; maximální hodnota byla stanovena na přibližně 120 ms.
- Součet těchto dvou intervalů musí být tedy větší než 125 ms.

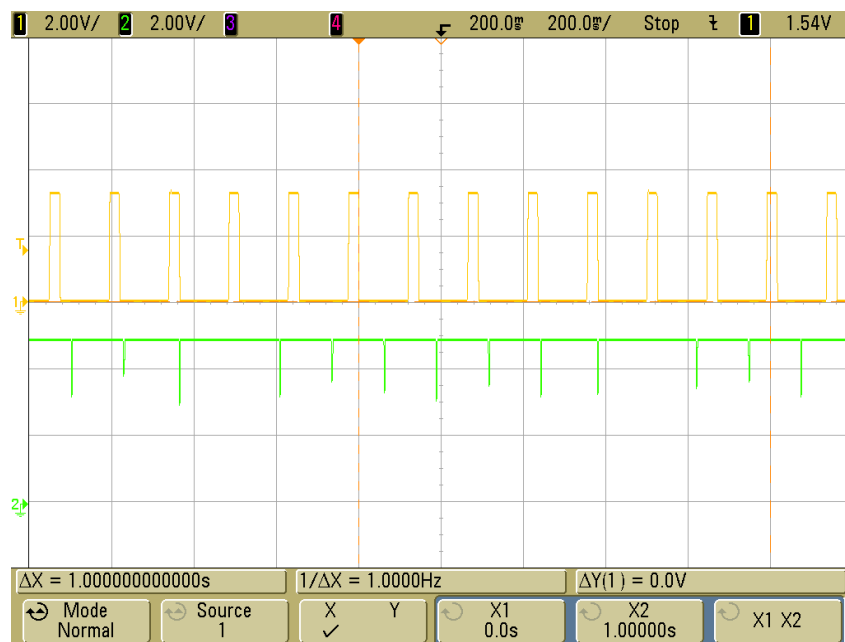
Jelikož hlavní smyčka programu proběhne několikrát za sekundu, je nezbytně nutné, aby veškeré časování těchto intervalů obsluhoval timer – periferie procesoru běžící paralelně s vykonávaným programem. Nelze použít čekací smyčky, neboť ty by pak vyplnili téměř všechny procesorový čas.

Z obr. 5.3 je patrné čtení dat z magnetometru při zjištěné době odezvy pomocí flexibilního Timeoutu. K synchronizaci dojde v momentu příchodu prvních dat. Od prvního ukončení Timeoutu (levý kurzor osciloskopu obr. 5.3) probíhá čtení již ve známý okamžik, tedy v této chvíli není problém použít rozšířenou verzi sběrnice SPI (viz kapitola 4.2), neboť během Idle periody není na sběrnici žádná aktivita.



Obr. 5.3 – Průběh čtení dat za použití proměnné velikosti Timeoutu 120 ms, Idle periody 25 ms. Signály shora: CS, SCK. Po zmenšení rozsahu časové osy je průběh synchronních hodin zřetelný.

V případě, že bychom použili obou intervalů s pevně danou velikostí, nastala by po určité době běhu měření situace, kdy by časovač nastavil Idle periodu těsně před okamžikem odeslání dat. Tím by došlo ke ztrátě této hodnoty (viz zelený průběh obr. 5.4).

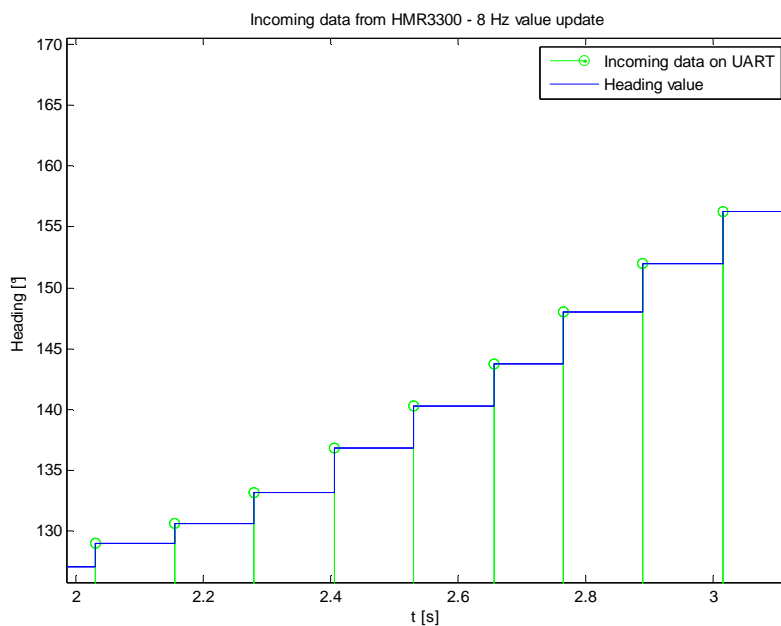


Obr. 5.4 – Průběh čtení dat za použití pevné velikostí časových intervalů. Signály shora: CS, SCK. Po zmenšení rozsahu časové osy je průběh synchronních hodin zřetelný.

Synchronizací zajistíme čtení pouze v okamžiku výměny dat v registrech magnetometru, tedy nebudeme jej zatěžovat s odesláním starých dat a tím jej i zpomalovat. Pokud bychom totiž zvýšili frekvenci požadavků (spádové hrany na CS), donutíme senzor odesílat data častěji, to ovšem způsobí zpomalení samotného měření z 8 Hz na 6-7 Hz.

## 5.5 Problematika četnosti žádostí o data

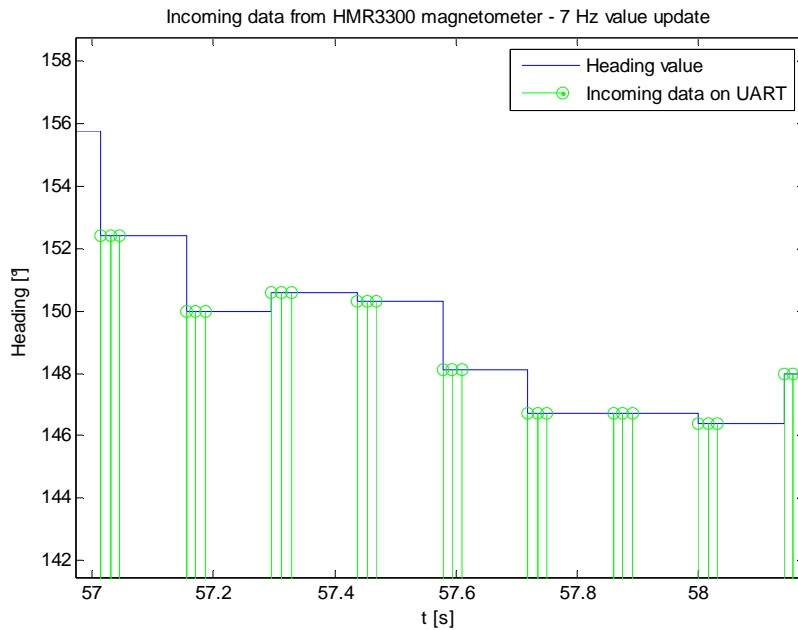
Pro příjem dat a jejich grafické zobrazování byla vytvořena jednoduchá C# aplikace, která zpracovává data přicházející do PC po sériovém portu. Následné vykreslení je za pomoci Matlabu. Obr. 5.5 koresponduje s průběhy na obr. 5.3.



Obr. 5.5 – Zobrazení dat přijímaných na sériovém portu. Komunikace probíhá za použití proměnného Timeoutu 120 ms a Idle periody 25 ms.

Při nastavení menší Idle periody než 25 ms dochází k opakovanému odesílání dat. Tímto zpomalujeme měření senzoru. Při použití Idle periody  $\leq 5$  ms je již zpomalen na méně než 7 Hz. Na následujícím obrázku je patrné zpomalení opakovaným odesíláním starých dat.





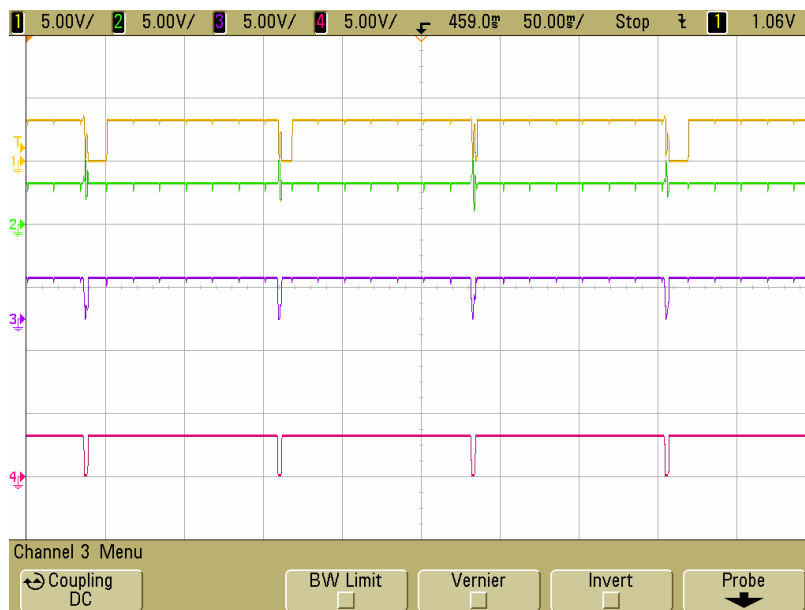
Obr. 5.6 – Opakované odeslání dat magnetometrem při nastavení 5 ms Idle periody. Update dat zpomalený na 7 Hz. Příjem dat ze sériového portu zpracován C# aplikací.

## 5.6 Ukázka připojení magnetometru a gyroskopu na SPI sběrnici

Jak již bylo řečeno, magnetometr poskytuje data pouze s frekvencí 8 Hz, navíc funguje na sběrnici jako Pseudomaster. Tyto dvě skutečnosti nám značně komplikují jeho připojení do systému. Proto použijeme rozšířenou verzi sběrnice (viz kapitola 4.2). a metodu synchronizace (viz kapitola 5.4) – tím definujeme dobu odezvy, zároveň minimalizujeme její délku (je nutné samozřejmě započítat jistou rezervu pro bezpečné dokončení přenosu).

Z hlediska SW vše obstarávají přerušení od periférií SPI a TIMER, které nastavují příznaky signalizující aktuální mód sběrnice. V hlavní smyčce pak lze volat funkci pro čtení z gyroskopů po splnění podmínky, že se sběrnice nachází v odpovídajícím stavu.

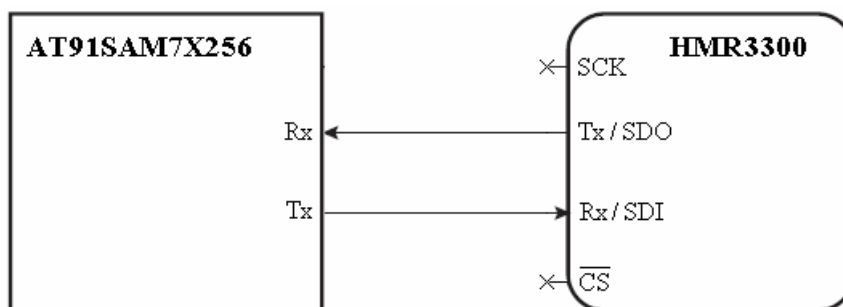
Malé špičky na průbězích signálů značí přenos dat od gyroskopu, větší špičky pak přenos od magnetometru. Ten proběhne během cca 4 ms. Budeme uvažovat čtení z gyroskopu s frekvencí 255Hz, ideálně tomu odpovídá časový rozestup  $1/255 = 3,9$  ms pro jednotlivé přenosy. Je tedy patrné, že při synchronizaci magnetometru lze zajistit jen malé ovlivnění mnohem četnějšího čtení z gyroskopu.



Obr. 5.7 – Ukázka činnosti jednotek na společné SPI sběrnici  
 Shora signály: SCLK, MISO, MOSI, CS magnetometru

## 6 Fyzické připojení magnetometru přes UART rozhraní

Na rozdíl od sběrnice SPI se způsob použití rozhraní UART od běžného nijak neliší (kapitola 3.2). Jedná se tedy o dvou vodičové připojení pinů Tx (Transmit) pro odesílání dat a Rx (Receive) pro jejich příjem. Komunikace probíhá čistě pomocí ASCII znaků (více kapitola 7).



Obr. 6.1 – Schéma zapojení pro komunikaci s magnetometrem HMR3300 přes rozhraní UART

Pokud chceme užívat toto rozhraní, necháme pouze piny SCK a CS nezapojeny. Díky pull-up rezistorům bude na nich log.1.

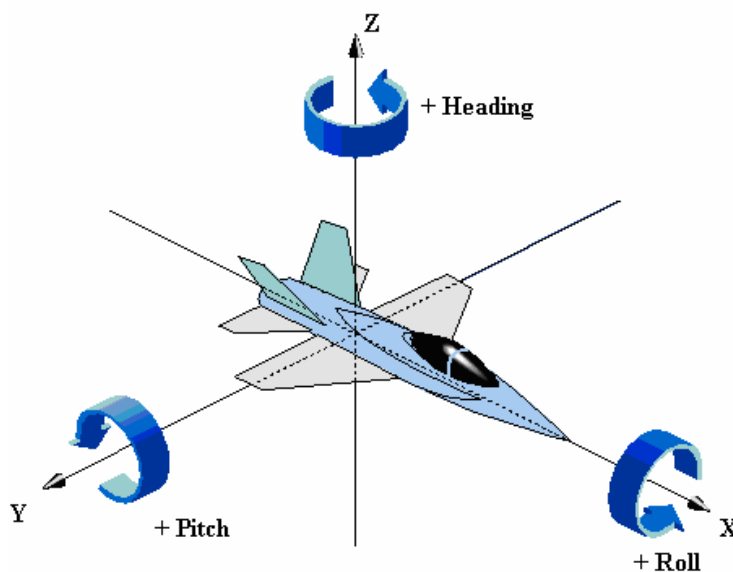
Napěťová úroveň signálů mikroprocesoru je +3,3V a magnetometru +5V. Přímé spojení, stejně jako u SPI rozhraní, nepředstavuje problém, neboť +3,3V je v rámci tolerance CMOS logických úrovní a mikroprocesor má 5V-tolerantní vstupy.

Vývojový kit, který se dodává spolu s magnetometrem, obsahuje konektor DB9 standardu RS-232, který umožňuje přímé připojení s Evaluation Kitem mikroprocesoru, ovšem lze na něj připojit pouze původní kabel od firmy Honeywellu, neboť pomocí něj je kit zároveň napájen. Proto při aplikaci magnetometru v určitém zařízení bude vhodnější použití bez tohoto kitu.

## 7 Získávání dat z magnetometru přes UART rozhraní

V porovnání s SPI (kapitola 5) nabízí UART rozhraní množství příkazů a též poskytuje více měřených veličin – 3 úhly (obr. 7.1) v „Heading“ modu a hodnoty intenzit magnetického pole ze tří ortogonálně umístěných magnetosenzorů v „Magnetometer“ modu.

[6]



Obr. 7.1 – Data získávaná z magnetometru v „Heading“ modu [26]

Veškerá komunikace probíhá formou řetězců ASCII znaků. Formát rámce jednoho znaku je 1 start bit, 8 datových bitů a 1 stop bit, maximální rychlost přenosu je 19200 Baudů. Každý příkaz má dle svého typu jeden uvozující znak a dva ukončovací znaky carriage return <cr> (\r jako escape sekvence) a new line či line feed <lf> (\n jako escape sekvence).

Magnetometr vyžaduje pro své správné spuštění tvrdý start napájení, neboť ten funguje jako interní hardwarový reset a také spouští vlastní taktování. Po spuštění napájení se provede inicializační rutina, jejíž průběh je signalizován svítící SMD LED diodou umístěnou na desce magnetometru. Po cca 800 ms, během kterých dojde k inicializaci hardwaru a nahrání konstant z paměti EEPROM, LED dioda zhasne. Stejně tímto způsobem reaguje senzor na příkaz pro reset.

Okamžitě po skončení inicializace začnou být odesílány ASCII znaky (jejich ordinální hodnoty). Jako první text je odesláno typové číslo zařízení a číslo interního firmwaru. Dále je pak odeslán znak # následovaný písmeny N (Normal), W (Warning) nebo A (Alarm). #N signalizuje normální činnost. Další dva znaky upozorní na nevhodné teplotní podmínky. Jejich příznaky ve status registru jsou vynulovány až příkazem pro recalibraci MEMS akcelerometrů (Pitch Axis Re-Zero command a Roll Axis Re-Zero command). Pak již automaticky následuje nepřetržité odesílání naměřených dat dle zvoleného modu s obnovovací frekvencí 8 Hz.

Pro snadné odesílání příkazů a čtení příchozích dat je velmi vhodné využít terminálový přístup na sériový port utilitou Hercules od HW-group.com. (Dále jsou ve složených závorkách uváděny odesílané či přijímané ordinální hodnoty, pod nimi pak odpovídající znak. Hexadecimální hodnota {48} tedy odpovídá znaku H)

## 7.1 Operační příkazy

První skupinou jsou **operační příkazy**, které jsou uvozeny znakem „\*“.

- **Heading Output Command**

*\*H<cr><lf>* – slouží pro volbu „Heading“ modu, ve kterém jsou získávány tři úhly: azimut, podélný a příčný náklon, měření probíhá pomocí tří ortogonálně umístěných magnetosenzorů a dvou akcelerometrů, bez problémů je magnetometr schopen měřit do

náklonu obou os maximálně  $\pm 60^\circ$ , při náklonu větším již odesílané hodnoty nemají smysl, senzor nereaguje na azimutální pohyb správně

– příkaz je odesílán ve tvaru:

```
{2A}{48}{0D}{0A}  
* H \r \n
```

– celý příchozí řetězec je přenášen ve formě:

(azimut, podélný náklon, příčný náklon)

```
{33}{34}{34}{2E}{33}{2C}{2D}{33}{2E}{36}{2C}{32}{2E}{30}{0D}{0A}  
3 4 4 . 3 , - 3 . 6 , 2 . 0 \r \n
```

- **Magnetometer Output Command**

\**M*<cr><lf> – slouží pro volbu „Magnetometer“ modu, ve kterém jsou odesílány intenzity magnetického pole, měření probíhá jen pomocí tří ortogonálně umístěných magnetosenzorů a není omezeno příčnými a podélnými náklony jako v předchozím modu

– příkaz je odesílán ve tvaru:

```
{2A}{4D}{0D}{0A}  
* M \r \n
```

– celý příchozí řetězec je přenášen ve formě:

(intenzita v ose X, v ose Y, v ose Z)

```
{2D}{33}{33}{30}{2C}{2D}{38}{33}{2C}{2D}{33}{35}{36}{34}{0D}{0A}  
- 3 3 0 , - 8 3 , - 3 5 6 4 \r \n
```

- **Starting and Stopping Data Output**

\**S*<cr><lf> – přepíná mezi „stream“ modem, ve kterém magnetometr odesílá data nepřetržitě, a „stop“ modem, ve kterém reaguje pouze na příchozí příkazy, z nichž právě většina tento mod vyžaduje

- **Query Output**

\**Q*<cr><lf> – požádá magnetometr o jeden řetězec dat, tento příkaz je povolen pouze ve Stop modu

- **Roll Axis Re-Zero**

*\*O<cr><lf>* – slouží k nulování úhlu náklonu příčné osy, tento příkaz by měl být používán v případě, že je náklon senzoru v rozmezí maximálně  $\pm 0.3^\circ$ , nuluje příznaky Alarm a Warning

- **Pitch Axis Re-Zero**

*\*P<cr><lf>* – slouží k nulování úhlu náklonu podélné osy, tento příkaz by měl být používán v případě, že je náklon senzoru v rozmezí maximálně  $\pm 0.3^\circ$ , nuluje příznaky Alarm a Warning

- **Averaged Output**

*\*A<cr><lf>* – má stejný význam jako příkaz Query s tím rozdílem, že hodnota je průměrem dvaceti měření, tento příkaz je povolen pouze ve Stop modu

- **Reset**

*\*R<cr><lf>* – resetuje magnetometr, provede se inicializace a načtení hodnot z EEPROM do RAM paměti, následně začne automatické odesílání znaků, jako první je odeslána identifikace a signalizační příznak:

{0D}Honeywell HMR3300 (0.7){0D}{0A}{0D}#N{0D}{0A}

- **User Calibration**

*\*C<cr><lf>* – zapne či vypne kalibrační mód, řetězec, který je odesílán v tomto modu obsahuje znak C pro signalizaci kalibrace, více kapitola 8

- **Split Filter Toggle**

*\*F<cr><lf>* – tento příkaz konfiguruje Split Filter bit ve status bytu, nastavený bit signalizuje, že System Filter vyhlazuje data z akcelerometrů (Tilt Filter) a Magnetic Filter data z magnetosenzorů, pokud je bit vynulovaný, pak se používá stejné vyhlazování pomocí System Filteru pro oboje data

## 7.2 Konfigurační příkazy

Druhou skupinou jsou **konfigurační příkazy**, které jsou uvozeny znakem #. Způsob nastavování konfiguračních konstant spočívá v odesílání řetězce např. `#Xof=±xxxx<cr><lf>`, kde `xxxx` je dekadické číslo v přípustném rozsahu (opět se jedná o ASCII řetězec). Zjištění současného nastavení je pak prováděno řetězcem `#Dev?<cr><lf>`. Data, kterými magnetometr odpoví, mají formát `#Dxxxx<cr><lf>`.

- **Variation Input (Declination Angle Correction)**

`#Var=±nnnn<cr><lf>` – slouží pro konfiguraci úhlu mezi magnetickým a geografickým severním pólem, aby měřený azimut odpovídal geografickému severu, typicky se hodnoty pohybují v rozmezích  $\pm 25^\circ$

- **Deviation Input (Platform Angle Correction)**

`#Dev=±nnnn<cr><lf>` – slouží pro nastavení odchylky mezi dopřednou orientací kompasu a orientací upevnění v příslušném zařízení

- **User Magnetic Offset Values (X, Y and Z)**

`#Xof=±nnnn<cr><lf>`

`#Yof=±nnnn<cr><lf>`

`#Zof=±nnnn<cr><lf>` – slouží pro nastavení offsetů magnetosenzorů, hodnoty jsou udávány v ADC jednotkách („ADC counts“), více kapitola 8

- **Baud Rate**

`#XBau=xxxxx<cr><lf>` – slouží pro nastavení rychlosti UART rozhraní, konfigurace se uloží okamžitě do paměti EEPROM, ale projeví se až po restartu zařízení, podporovány jsou rychlosti od 2400 do 19200 Baudů

- **System Filter**

`#SFL=xxx<cr><lf>` – (viz operační příkaz `*F<cr><lf>`); slouží pro nastavení systémového IIR filtru, platné hodnoty nastavující filtr nabývají hodnot od 0 do 255, nastavení se projeví až po restartu, defaultní nastavení z výroby má hodnotu 3, důvod pro zvýšení hodnoty je přítomnost mechanických vibrací

- **Magnetic Filter**

`#MFL=xxx<cr><lf>` – (viz operační příkaz `*F<cr><lf>`); slouží pro nastavení Magnetic Filteru, platné hodnoty nastavující filtr nabývají hodnot od 0 do 255, nastavení se projeví až po restartu, defaultní nastavení z výroby má hodnotu 3, důvod pro zvýšení hodnoty je přítomnost střídavých magnetických polí od blízkých vodičů či motorů

- **Configuration**

`#CON?` – slouží pro přečtení registru nastavení, návratová hodnota je dvou bytové dekadické číslo (reprezentace opět pomocí ASCII znaků ve tvaru `#D=xxxx<cr><lf>`)

- Bit 1 – příznak pro zvolený Magnetometer mode
- Bit 3 – příznak pro zvolený Heading mode
- Bit 5 – má stálou hodnotu 1
- Bit 8 – příznak pro Warning – nastaven při dosažení teploty -10°C
- Bit 9 – příznak pro Alarm – nastaven při dosažení teploty -20°C
- Bit 10 – příznak Split Filter pro volbu použití obou filtrů filtrů
- Ostatní bity jsou nevyužity

V případě neplatného příkazu odpoví magnetometr řetězcem `#I<cr><lf>`.

### 7.3 Výhody a nevýhody komunikace přes UART rozhraní

Výhodami UART modu u magnetometru HMR3300 je více získaných informací oproti SPI, možnosti konfigurace a především senzorem automatické odesílání naměřených hodnot ve „stream“ modu. To nás zbavuje režie komunikace, neboť jakmile jsou data obnovena, senzor je okamžitě sám odesílá. Stejně tak i UART topologie typu bod-bod nám přinese zjednodušení ovládání magnetometru, nejsme totiž zatíženi režii sběrnice jako v případě rozšířené verze SPI (viz kapitola 4.2).

Nevýhodou je formát odesílaných dat – dlouhý řetězec ASCII znaků, který se ještě následně musí zpracovat.



## 8 Kalibrace magnetometru HMR3300

Vzhledem k tomu, že magnetometr byl během manipulace neznámou příčinou rozkalibrován (pravděpodobně mylným zacházením s pinem 5 – Calibration Input, který normálně nebývá zapojen a v datasheetu není nijak popsán), bylo nutné použít automatické kalibrační procedury, kterou sám magnetometr nabízí.

Pro kalibraci lze s výhodou využít utilitu Hercules od HW-group.com.

### 8.1 Problematika vlivu okolí

Pro velkou část uživatelů v magneticky čistším prostředí je výrobní nastavení lepší a dosahuje větší přesnosti než po uživatelské kalibraci. Ta se používá pro nulování pouze malého vlivu okolního prostředí. Dá se předpokládat, že pro prostředí se silným magnetickým polem kalibrace nepomůže a přesnost dat bude mizivá. Většina nepřesností měření je způsobena feromagnetickými předměty (ocel, železo, nikl, kobalt, atd.) umístěnými do blízkého okolí senzoru. Takovýto vliv se projevil při přiblížení malé tenké destičky z podobného materiálu již do vzdálenosti přibližně 10-15 cm. Při přibližování se údaj blížil k nulové hodnotě, kde setrval do opětovného oddalování. Stejně negativně také působí na měření i střídavá a stejnosměrná magnetická pole, která jsou vytvářena například kolem cívek motorů nebo obyčejných vodičů, kterými protéká velký elektrický proud. V některých případech se dá použít feromagnetického stínění, ovšem za podmínky, že je dostatečně tenké a dost daleko od magnetometru. Jako nejlepší řešení je však stále co největší vzdálenost od takovýchto vlivů.

### 8.2 Kalibrační procedura

Kalibrační procedura byla na naši prosbu popsána specialistou na magnetosenzory firmy Honeywell Markem Amundsonem. Datasheet totiž příliš dobrou, detailnější podporu neposkytuje.

Před kalibrací je nutno uvést magnetometr do Stop módu, aby veškerou svojí pozornost mohl věnovat příchozím příkazům. Pomocí příkazu #Xof?  
<cr><lf> (stejně tak i

Yof?, Zof?) zjistíme aktuální offsety magnetosenzorů. Typicky vhodně uživatelsky nakalibrované hodnoty se pohybují do  $\pm 100$  (dle datasheetu  $\pm 200$ ) ADC jednotek (angl. ADC count). Jedna ADC jednotka odpovídá magnetické indukci o velikosti 0.3 miliG. V námi běžněji užívané soustavě SI odpovídá jednotce gauss G ze soustavy CGS tesla T.

Zjištění offsetů (příkaz a odpověď):

```
#Xof?{0D}{0A} {0D}{0A}#D-199{0D}{0A}
```

```
#Yof?{0D}{0A} {0D}{0A}#D-169{0D}{0A}
```

```
#Zof?{0D}{0A} {0D}{0A}#D303{0D}{0A}
```

(příkaz pro X-ovou osu v hexadecimálním tvaru: **23 58 6F 66 3F 0D 0A**)

Výrobní nastavení magnetometru má hodnoty offsetů nulové. Zpět do tohoto nastavení jej tedy zavedeme příkazy:

```
#Xof=0{0D}{0A}
```

```
#Xof?{0D}{0A} {0D}{0A}#D0{0D}{0A}
```

```
#Yof=0{0D}{0A}
```

```
#Zof=0{0D}{0A}
```

Vzhledem k tomu, že vliv vynulování offsetů se dle mého osobního názoru příliš neprojevil na kvalitě měření a další postup kalibrace nebyl ve zprávě od Marka Amundsona popsán, zvolil jsem proto ještě uživatelskou kalibrační rutinu, po které již přístroj reagoval viditelně lépe. Do ní dostaneme magnetometr pomocí operačního příkazu \*C<cr><lf>. Data, která jsou pak odesílána obsahují znak C pro indikaci kalibračního modu, např.: 214,324,1415,C<cr><lf>.

Kalibrace spočívá v jednoduché metodě, kdy magnetometr měří směr intenzity magnetického pole pomocí magnetosenzorů a směr gravitačního pole pomocí MEMS akcelerometrů. Během tohoto měření probíhá vzorkování obou polí (frekvencí 8 Hz) a je nutné magnetometr pomalu otáčet kolem všech tří os. V pohybu tedy musí být obsažena azimutální rotace spolu s příčnými (roll) a podélnými (pitch) náklony. Po dokončení kalibrace je navrácen magnetometr do normálního režimu opětovným odesláním příkazu \*C<cr><lf>.

Jako poslední krok je vhodné vynulovat offsety akcelerometrů:

$*O_{0D}\{0A\}$  (příčný náklon)

$*P_{0D}\{0A\}$  (podélný náklon)

První ruční kalibrace se neprojevila jako příliš přesná, neboť následně při náklonech docházelo k mírnému ovlivňování hodnoty azimutu, avšak odezva magnetometru se oproti původnímu rozkalibrovanému stavu mnohonásobně zlepšila (pootočení o určitý úhel již skutečně odpovídalo rozdílu hodnot, které magnetometr odesílal). Výsledek druhé ruční kalibrace dopadl ještě lépe, neboť ta byla prováděna déle a pečlivěji co se počtu vzorkovaných úhlů tyče.

Pro přesné nastavení by bylo zřejmě nejvhodnější umístit senzor do mechanického zařízení umožňující výše popsany pohyb a kalibraci provádět po dostatečně dlouhou dobu, aby došlo k navzorkování co největšího počtu úhlů resp. směrů intenzit magnetického a gravitačního pole.

## Závěr

V této práci jsem se zabýval problematikou čtení dat z digitálního kompasu HMR3300 firmy Honeywell s použitím mikroprocesoru AT91SAM7X256 typu ARM7 od firmy Atmel. Tento magnetometr disponuje dvěma rozhraními – synchronním SPI a asynchronním UART.

Primárně bylo uváděno do provozu synchronní SPI. Pomocí něj byl magnetometr zapojen v modulu pro inerciální navigaci. Ukázalo se, že toto rozhraní je spíše jakýmsi doplňkem pro možnosti komunikace, je méně výhodné pro využívání, neboť jediná získávaná informace je azimut. Navíc senzor, což je velmi neobvyklé, pracuje na sběrnici jako Master, který navíc odesílá data s velmi nízkou obnovovací frekvencí 8 Hz. Tyto dvě skutečnosti do značné míry komplikují jeho užití. Popsané principy rozšíření SPI sběrnice pomocí sběrnice oddělovače a synchronizace mikroprocesoru se senzorem představují pravděpodobně jeho nejefektivnější využití i při splnění požadavku připojení dalších jednotek na společnou sběrnici, ze kterých je navíc uskutečňováno čtení při mnohem vyšší frekvenci.

Jako další rozhraní je asynchronní UART. Jeho způsob komunikace se od běžného nijak neliší. Pro měření se jeví jako mnohem výhodnější než SPI, a to hned z několika důvodů. Přes něj magnetometr poskytuje mnohem více informací jako jsou úhly příčného a podélného náklonu v „heading“ modu či intenzity ortogonálně umístěných magnetorezistivních senzorů v „magnetometer“ modu. Dále máme možnost zvolit „stream“ mód, ve kterém jsou data odesílána obnovovací frekvencí senzoru 8 Hz automaticky bez potřeby odesílání požadavků ze strany mikroprocesoru. Společně s tím, že se nejedná o sběrnici, ale topologii bod-bod, jsme zbaveni potřeby dodatečné režie jako v případě rozšířené SPI a výrazně tím redukuje složitost implementace. Výměna dat probíhá formou textu – řetězců ASCII znaků. To představuje malou nevýhodu tohoto rozhraní, neboť je potřeba pro získání dat dodatečně tyto řetězce zpracovat.

Proces uživatelské kalibrace se používá především pro případ mírného magnetického vlivu okolí na senzor. Pro magneticky čisté prostředí se při použití továrního nastavení docílí vyšší přesnosti než po použití kalibrace. Avšak z důvodu rozkalibrování magnetometru bylo nutné ji provést. Ruční kalibrace se nejeví jako příliš přesné řešení. Je totiž potřeba zaručit v kalibračním procesu co nejvíce pohybů kolem všech tří os.

Mikroprocesor obsahuje velké množství registrů pro nastavení jednotlivých periférií. Pro správné nastavení periférie a jejího přerušení je vyžadována určitá posloupnost příkazů.

Jako první je nutné přiřadit piny dané periférii nastavením Parallel Input/Output Controlleru (PIO), aktivovat její taktování v Power Management Controlleru (PMC), dále je potřeba nastavit přerušování v Advanced Interrupt Controlleru (AIC) a nakonec nakonfigurovat samotnou periférii. Je velmi pravděpodobné, že právě při implementaci komunikace přes UART rozhraní nebyla dodržena správná posloupnost všech příkazů, což následně způsobilo nevyvolání interruptu při obdržení znaku. V krátkém časovém horizontu, který byl k dispozici, nestačila být tato závada odstraněna.

Implementací UART komunikace se budu nadále zabývat.

## Literatura:

- [1] Herout, P.: Učebnice jazyka C – 1.díl, České Budějovice: Kopp 2005
- [2] Haasz, V. – Sedláček, M.: Elektrická měření. Přístroje a metody, ČVUT, Praha 2003
- [3] Haasz, V. – Roztočil, J. – Novák, J.: Číslicové měřicí systémy, ČVUT, Praha 2000
- [4] Kocourek, P. – Novák, J.: Přenos informace, ČVUT, Praha 2004
- [5] Datasheet k mikroprocesoru AT91SAM7X256 firmy Atmel  
[www.keil.com/dd/docs/datashts/atmel/at91sam7x128\\_256\\_pc.pdf](http://www.keil.com/dd/docs/datashts/atmel/at91sam7x128_256_pc.pdf) [online]
- [6] Datasheet a manuál k magnetometru HMR3300  
<http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/hmr32003300.pdf> [online]  
[http://www.inertialsolutions.us/pdf\\_files/HMR32003300\\_manual.pdf](http://www.inertialsolutions.us/pdf_files/HMR32003300_manual.pdf) [online]
- [7] Datasheet ke gyroskopu ADIS16255  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADIS16250\\_16255.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16250_16255.pdf) [online]
- [8] Datasheet k 4-to-16 line dekodéru/demultiplexeru  
[http://www.nxp.com/acrobat\\_download/datasheets/74HC\\_HCT154\\_6.pdf](http://www.nxp.com/acrobat_download/datasheets/74HC_HCT154_6.pdf) [online]
- [9] Datasheet ke kamerovému modulu C3088  
<http://hobbyrobot.cz/PDF/c3088.pdf> [online]
- [10] Datasheet k bus-bufferu 74VHCT541  
[http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/MC74VHCT541A-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC74VHCT541A-D.PDF) [online]
- [11] Datasheet k bus-bufferu 74LS244  
<http://ece-www.colorado.edu/~mcclurel/sn74ls240rev5.pdf> [online]
- [12] Datasheet k Evaluation Kitu pro AT91SAM7X256  
[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc6195.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc6195.pdf) [online]
- [13] Podpora AT91SAM 32-bit ARM procesorů  
<http://www.atmel.com/products/at91/> [online]
- [14] AT91SAM Portal  
<http://www.at91.com/Home/Controleurs/cHome.php> [online]
- [15] SIWAWI, Technische Universität Kaiserslautern  
[http://www.siwawi.arubi.uni-kl.de/avr\\_projects/arm\\_projects/index\\_at91.html](http://www.siwawi.arubi.uni-kl.de/avr_projects/arm_projects/index_at91.html) [online]
- [16] Hw.cz  
<http://rs232.hw.cz/> [online]
- [17] Hw.cz  
<http://hw.cz/docs/rs485/rs485.html> [online]

- [18] Wikipedia, the free encyclopedia  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface\\_Bus](http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus) [online]
- [19] Wikipedia, the free encyclopedia  
<http://en.wikipedia.org/wiki/UART> [online]
- [20] Wikipedia, the free encyclopedia  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_port](http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_port) [online]
- [21] Wikipedia, the free encyclopedia  
<http://en.wikipedia.org/wiki/PC> [online]
- [22] Wikipedia, the free encyclopedia  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_card](http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_card) [online]
- [23] Wikipedia, the free encyclopedia  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Manchester\\_code](http://en.wikipedia.org/wiki/Manchester_code) [online]
- [24] Wikipedia, the free encyclopedia  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Course\\_%28navigation%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Course_%28navigation%29) [online]
- [25] ScienceProg – princip SPI  
<http://www.scienceprog.com/serial-peripheral-interface-spi-bus-overview/> [online]
- [26] Obrázek demonstrující úhly měřené magnetometrem  
[http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/computer/manual/lx/SGI\\_Developer/books/Perf\\_GetStarted/sgi\\_html/figures/heading.pitch.roll.values.gif](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/computer/manual/lx/SGI_Developer/books/Perf_GetStarted/sgi_html/figures/heading.pitch.roll.values.gif) [online]
- [27] Fotografie J-Linku od IAR System  
<http://www.iar.com/website1/1.0.1.0/369/1/index.php> [online]
- [28] Fotografie Evaluation Kitu  
<http://www.yagarto.de/howto/jlink/index.html> [online]
- [29] Obrázek magnetického pólu  
<http://www.indiana.edu/~g103/G103/week9/magfield.jpg> [online]

## **Dodatek**

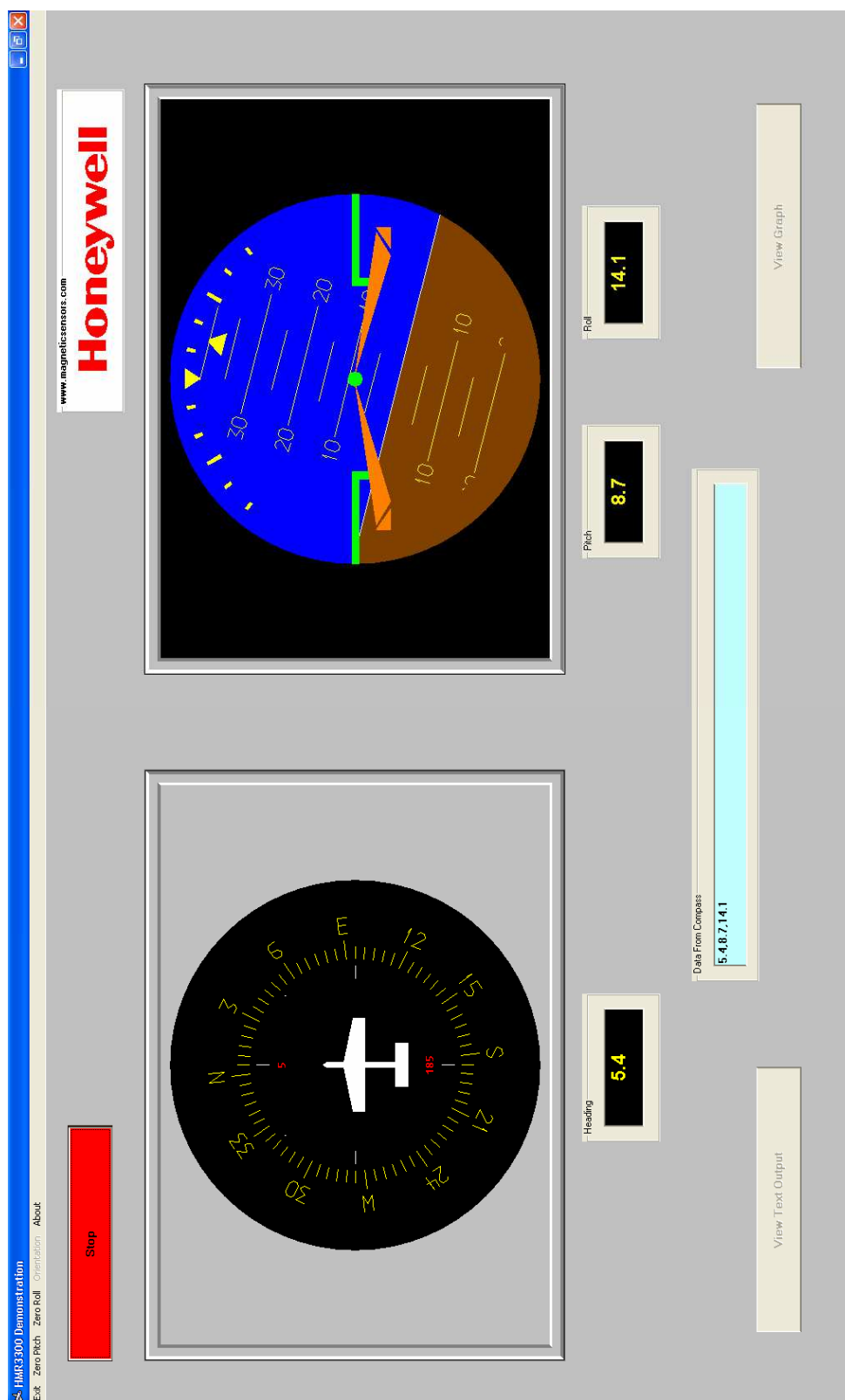
### **Obsah přiloženého CD**

- /applications\_pc
- /bachelor\_document
- /datasheets
- /documentation\_doxygen
- /source\_codes

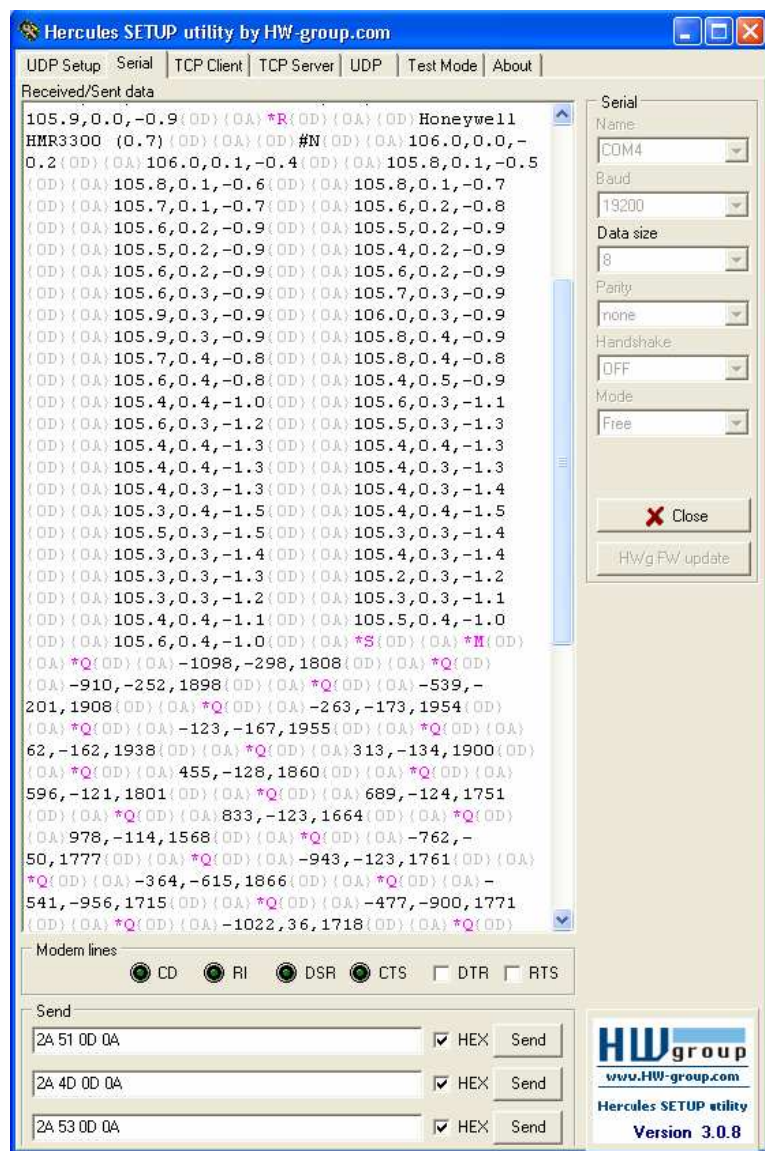


# Příloha

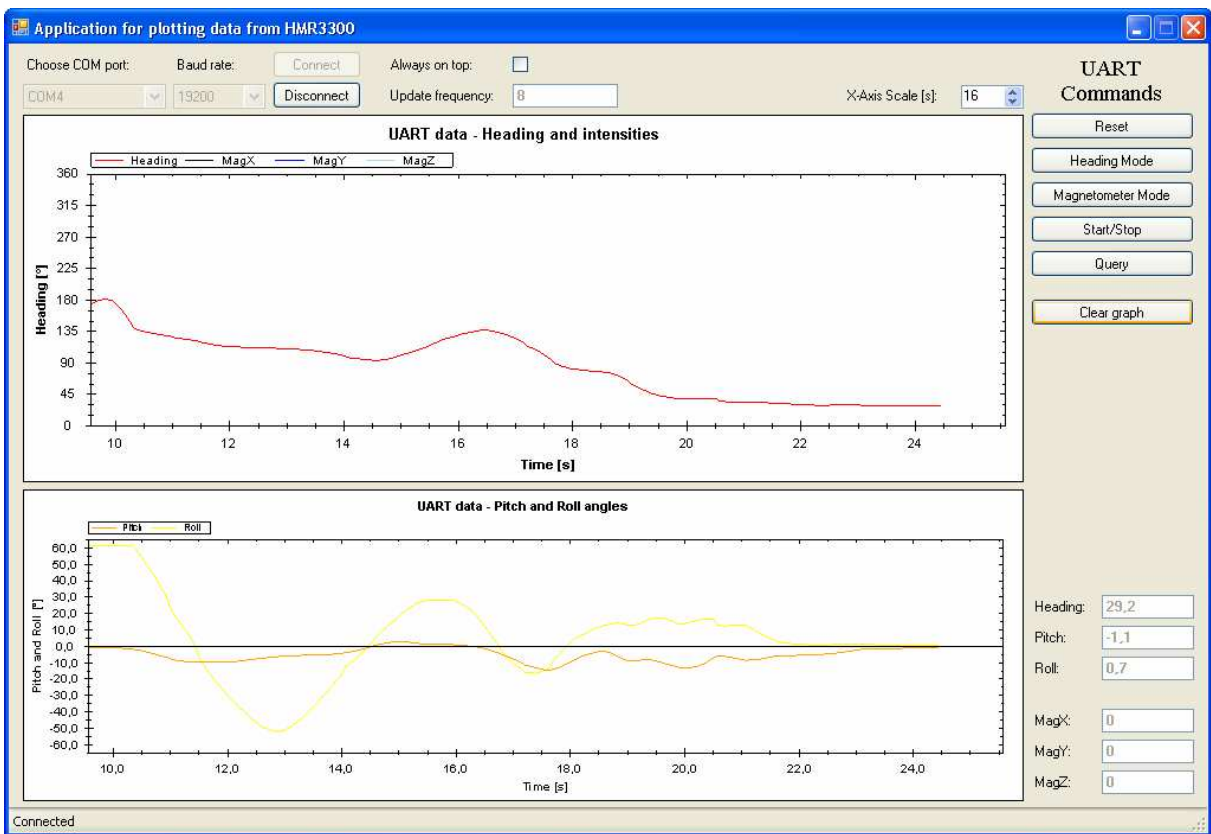
## Obrazová příloha



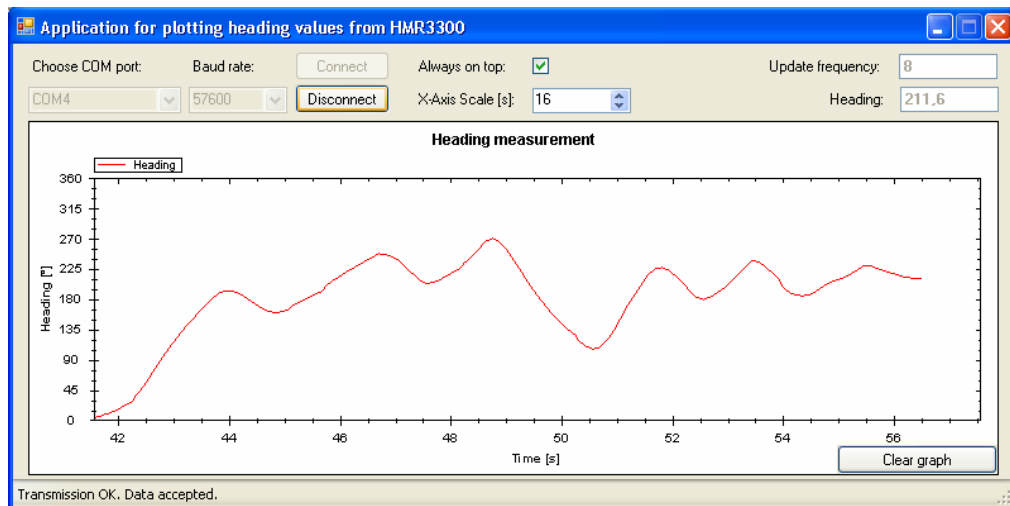
Obr. A.1 – Grafické uživatelské rozhraní pro demonstraci funkce magnetometru HMR3300 firmy Honeywell



Obr. A.2 – Grafické uživatelské rozhraní utility Herkules pro přístup na sériový port

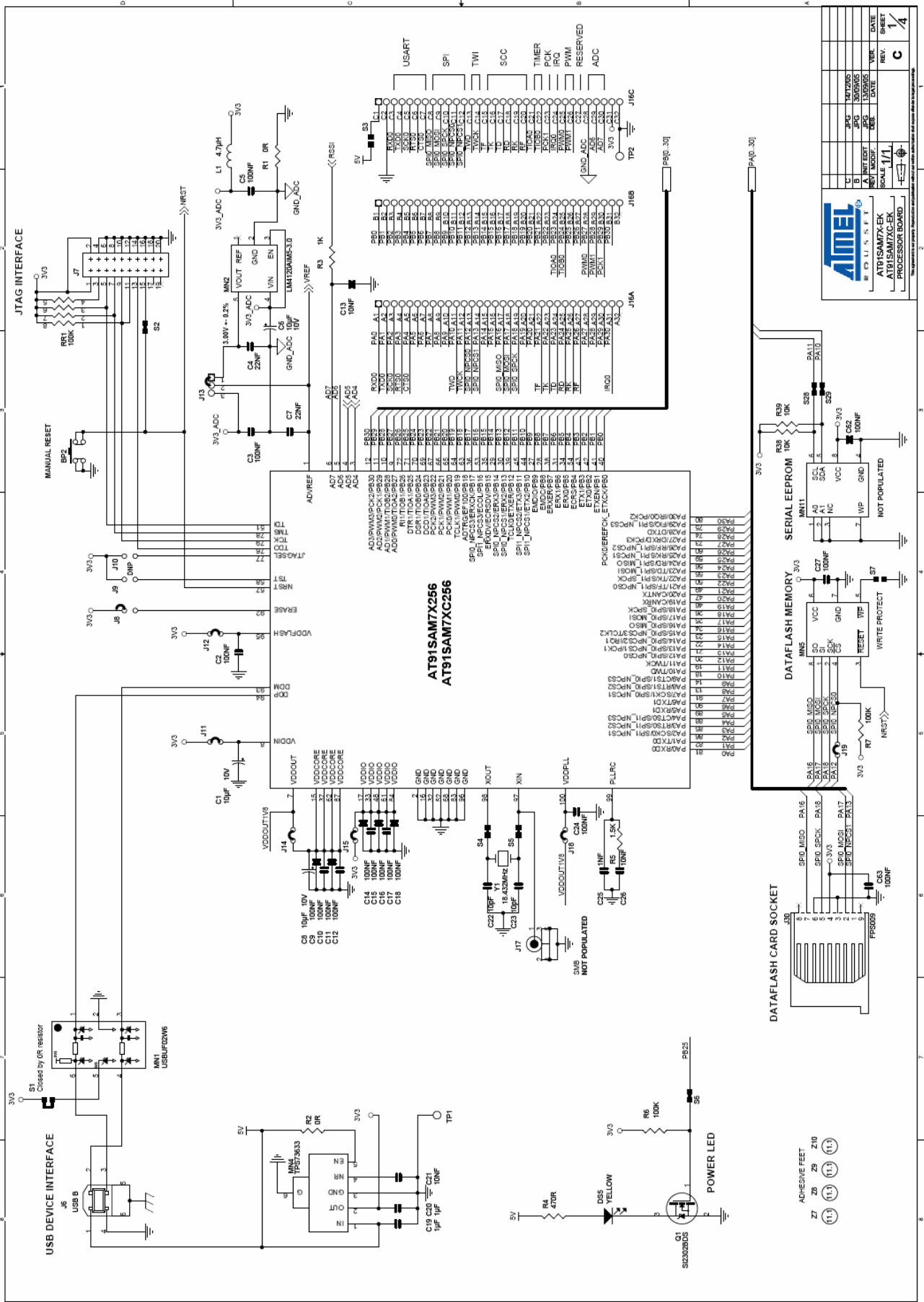


Obr. A.3 – Vlastní aplikace s grafickou reprezentací dat čtených přes UART rozhraní



Obr. A.4 – Vlastní aplikace s grafickou reprezentací dat čtených přes SPI rozhraní





Obr. A.6 – Základní schéma Evaluation Kitu pro procesor ARM AT91SAM7X256 [12]



Obr. A.7 – J-Link od IAR System – JTAG debugger pro procesory ARM [27]



Obr. A.8 – Evaluation Kit s procesorem AT91SAM7X256 [28]