NEW LABORATORY TASK “MEMS – ACCELEROMETER SENSOR”

František HRUŠKA

Resumé: MEMS technology in the field of sensors is subject with great progress. Development of new laboratory task “MEMS – accelerometer sensor” is motivated to make real contact possible to the students with the kind of sensor. The students learn the typical sensor, the microcontroller unit and the radio elements for wireless communication. During the analysis of measured results the students can consider function and quality of measured data field by the help of method of spherical geometry.

Keywords: sensor, MEMS, accelerometer, education, informatics, automation.

NOVÁ LABORATORNÍ ÚLOHA „MEMS - AKCELEROMETRICKÝ SENZOR“

Resumé: MEMS technologie v oboru senzoriky je předmětem prudkého rozvoje. Vybudování nové laboratorní úlohy „MEMS – akcelerometrický senzor“ má za cíl poskytnout studentům reálný kontakt s příkladným systémem. Student se seznámí s vlastním senzorem, s jeho vyhodnocovací jednotkou a bezdrátovou komunikací na centrální počítač. Současně student může posoudit funkci a naměřené výsledky podle výpočtů provedených pomocí zákonů prostorové geometrie.

Klíčová slova: sensor, MEMS, akcelerometr, výuka, informatika, automatizace.

Úvod

Pro zimní semestr studijní roku 2008-2009 je připravena nová laboratorní úloha do předmětu „Senzory v systémech informatiky a automatizace“ s názvem „**MEMS - akcelerometrický senzor**“. Motivem byla nabídka moderního řešení technologií MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) pro vícefunkční kapacitní senzory a potřeba zavádění novinek do výuky způsobem: „Každý rok inovace nebo zavedení jedné nové laboratorní úlohy“. V této nové zavedené úloze se student seznámí s moderním MEMS senzorem pro snímání akcelerace a polohy ve

třech osách a s jeho propojením s vyhodnocovacím počítačem pomocí bezdrátové komunikace.

Sestava úlohy

Sestava úlohy „MEMS akcelerometrický senzor“ se skládá z senzorové části umístěné na krychli a z USB části umístěné v konektoru USB na personálním počítači (dále jen PC) (viz schéma na obr.1) . Sestava používá produkt firmy Freescale Semiconductor nazývaný „Vývojový a demonstrační systém ZSTAR2 „ (1).

Obr. 1: Schéma sestavy úlohy

Senzorová část obsahuje vlastní jen MC) a přijímací a vysílací obvod na akcelerometrický senzor, mikrokontroler (dále frekvenci 2.4 GHz. Umístění senzorové části na

krychli zajišťuje určitou definovanou poloha senzoru a umožňuje i měnit změnou polohy krychle. Část USB má na plošném spoji konektor USB, přijímací a vysílací obvod na frekvenci 2.4 GHz a obvod MC.

Popis systému ZSTAR2

Systém ZSTAR2 je určen pro demonstraci akcelerometrického senzoru MEMS a také pro vývoj jeho aplikací. Skládá se ze sensorové části (Sensor Board) a z USB části (USB Board). Pohled na oba díly je na obr. 2.

Obr. 2: Jednotky sestavy systému STAR2 (1)

U sestavy ZSTAR2 je použit senzor MMA7360L (2). Má menší rozměry pouzdra, větší citlivost 800mV/g a rozsah 1.5 a 6 g. Má menší spotřebu cca 400 μ A v normálním režimu a 3 μ A ve sleep režimu. Výstupy X, Y, Z mají filtr 50 Hz vytvořený vnitřním odporem 32k Ω , externím odporem 10 k Ω a kapacitou 320 nF. Senzor má jeden řídicí pin (10) pro rozsah 1g a ten je zapojen na vývod PTB1 na MC. Hodnotu 0 g udává výstup senzoru (pin 9), který je zapojen na MC jako PTB0. Pin 13 senzoru je pro self test a je zapojen na tlačítko obvodu.

Vedle použitého typu senzoru MMA7360L jsou vyráběny analogové typy MMA7340L (rozsah 3/12 g), MMA7330L (rozsah 4/16 g). Typ senzoru MAA7455L má shodnou sensorovou část, ale část vyhodnocování má digitální výstup pro datovou sériovou komunikaci.

Tato řada senzorů má velké praktické užití, např. ochrana zařízení před volným pádem u laptopů a MP3 přehrávačů, detekce naklonění u elektronických kompasů a mobilů, detekce pohybu u her, senzor polohy, detekce pádů,

vibrací apod. Polovodičová technologie umožňuje vytvořit i senzor pro současné snímání více veličin. Taková aplikace je použita v praxi pro měření tlaku vzduchu v pneumatikách v automobilu za jízdy a zobrazování těchto veličin pro každé kolo na palubním počítači.

U všech těchto řešení je použit pro snímání veličin akcelerace, tlaku a teploty fyzikální princip změn elektrické kapacity podle změn polohy elektrod kondenzátoru. Kondenzátor je vytvořen technologií MEMS na polovodičovém substrátu, má tři elektrody s tím, že střední je ovlivněna měřenou veličinou (akcelerací, tlakem nebo roztažností materiálu od teploty). Schéma kondenzátoru je na obr. 3 společně s náhradním schématem zapojení dvou kondenzátorů.

Obr. 3: Schéma MEMS kondenzátoru a jeho náhradní zapojení

Vysoká citlivost kapacitního senzoru je v oblasti velmi malých změn polohy střední elektrody od pevné elektrody. Průběh změny kapacity kondenzátoru C1 ukazuje obr. 4. Na ose x je změna vzdálenosti mezi pevnou a pohyblivou elektrodou v (nm) a na ose y je výsledek kapacity v (nF).

Obr. 5: Souřadný systém MEMS senzoru

Senzor použitý u sestavy ZSTAR obsahuje několik sad kapacitních senzorů a to ve třech osách. Obr. 5 ukazuje směry působení akcelerace vnějšího prostředí na senzor podle

Obr. 4: Charakteristika MEMS kondenzátoru pro změny vzdálenosti elektrod a kapacity

jeho pouzdra a podle os x , y , z . Je uvedeno také znaménko směru. Vyhodnocení změny kapacity u senzoru MEMS je realizována v elektronické části senzoru v obvodech ASIC. Jako metoda převodu změny kapacity na napětový signál vhodný pro další číslicové zpracování je zde zvolena metoda měření časové konstanty při nabíjení kondenzátoru. Blokové schéma sensorové části systému ZSTAR je na obr. 6. Výstupy analogového senzoru (1) pro tři osy jdou na obvod mikrokontroleru (2), typ MC9S08QG8.

typ MCHC908JW32. Slouží pro vyhodnocování dat a pro vytvoření komunikace USB 2.0. Bezdrátová komunikace je provedena obvodem transceiveru, typ. MC13191FC. Propojení je v pásmu 2.4 GHz, (pásmo ISM- Industrial, Scientific and Medical). Komunikace je kompatibilní s normou IEEE.802.15.4 pro fyzickou vrstvu u daného obvodu. Pro kompatibilitu všech vrstev modelu OSI je nutný jiný transceiver, typ MC13192 a MAC programy (2).

Zpracovaná měřená data předává mikrokontroler na transceiver (3), typ MC13191FC, který je vysílá přes vysílací anténu (4) do okolí. Transceiver také data může přijímat druhou anténou (4) a předává je do mikrokontroleru pro další vyhodnocení.

Celá sensorová část má vlastní napájení z baterie. Její životnost je cca 10 dní nepřetržitého provozu při komunikaci 20x/s.

Na USB části, jehož blokové schéma je na obr. 7, je použit mikrokontroler

Obr. 6: Blokové schéma sensorové části ZSTAR (1-senzor MMA7360L, 2-mikrokontroler MC9S08SQG8, 3-transceiver MC13191FC, 4-antény)

Obr. 7: Blokové schéma USB části ZSTAR (1- antény, 2-transceiver MC13191FC, 3-mikrokontroler MCHC908JW32, 4-konektor USB)

Programová část systému ZSTAR

Vizualizační software pro systém ZSTAR (3) je dodán pod značkou TRIAX. Využívá prostředky MS studio C## a toolbox Kation Instruments.

V úvodu programu se otevírá úvodní obrazovka (obr. 8) s funkcí kalibrace referenční polohy senzoru (Calibrate), zobrazení přímých výstupů senzoru v jednotkách elektrického

napětí (Raw Date), zobrazení dat v časovém diagramu (Aquire Date) a záznam dat do souboru (Scope). V úvodní obrazovce se dále volí obrazovka TILT pro zobrazení naklonění senzoru, obrazovka MOTION zobrazující posunutí, obrazovka POSITION pro zobrazení polohy a obrazovka SHOCK indukující pád a jeho zrychlení.

Obr. 8: Úvodní obrazovka programu TRIAX

Obrazovka TILT slouží pro zobrazení vyhodnocování změn sklonu polohy senzoru. Ukázka je na obr. 9. Student zde má možnost

sledovat skutečnou polohu senzoru vyjádřenou ve stupních pro jednotlivé osy jako odchylky od polohy referenční podle poslední kalibrace.

Obr. 9: Obrazovka TILT programu TRiAX pro zobrazení naklonění senzoru

Postup měření

Pro laboratorní úlohu byl sestaven systém ZSTAR v provedení podle obr. 11. Sensorová část je umístěna na krychli a na její zkosené části mezi hranami D-C-E. Student práci s úlohou provádí podle následujících kroků:

1. Spuštění programu TRIAX pro vizualizaci a vyhodnocování funkcí senzoru při předem zasunuté USB části ZSTAR2.
2. Pro část senzoru se zapne napájení.

3. V sekci programu GENERAL se provede rychlá kalibrace senzoru v poli CALIBRATE při základní vodorovné poloze desky senzoru.
4. Měření polohy se provede v sekci TILT pro osy X-Y-Z pro polohy krychle ve čtyřech pozicích : I, II, III, IV. (viz obrázek10.)
5. Vypne se napájení části senzoru.
6. Ukončí se program TRIAX .
7. Provede se vyhodnocení úlohy.

Obr. 10: Pozice naklonění senzoru

Obr. 11 Sestava úlohy se systémem ZSTAR2

Student sleduje postupy a provádění úlohy v programu TRIAX a využívá funkce archivace pro práci s měřeními daty na připojeném PC. Hlavní výukové cíle této úlohy spočívají v tom, že student se seznámí s moderním senzorem MEMS, seznámí se s jeho funkcí, provede vyhodnocení svých pokusů a porovná svoje výsledky s údaji danými pro polohu senzoru podle výpočtů prostorové geometrie a může sledovat funkce bezdrátové komunikace mezi senzorem a vzdáleným PC.

Teoretické aspekty

Poloha senzoru na krychli je popsatelná podle pravidel prostorové geometrie (4). Výsledky tohoto řešení dávají pro souřadný systém os x-y-z matematické popisy roviny pro umístění senzoru, polohy senzoru umístěné na této rovině a průmět polohy senzoru do roviny charakterizující vektor zemské přitažlivosti. Nástroje prostorové geometrie umožňují také popsat změny polohy senzoru při změně polohy krychle, tj. např. natočení do jiné polohy.

Zkosená rovina pro prostorové umístění senzoru je mezi hranami D-C-E krychle. Pro výpočet analytické rovnice této roviny je použito řešení pro rovinu danou třemi body $P_k = [x_k; y_k; z_k]$ pro $k=1,2,3$, které neleží na jedné přímce v prostoru. Toto řešení je dáno determinantem:

$$E = Ax + By + Cz + D = \begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

Pro jednotlivé koeficienty rovnice roviny rozvojem determinantu lze odvodit:

$$A = (y_1(z_2 - z_3) - z_1(y_2 - y_3) + (y_2 z_3 - z_2 y_3)) \quad (2)$$

$$B = -(x_1(z_2 - z_3) - z_1(x_2 - x_3) + (x_2 z_3 - z_2 x_3)) \quad (3)$$

$$C = (x_1(y_2 - y_3) - y_1(x_2 - x_3) + (x_2 y_3 - y_2 x_3)) \quad (4)$$

$$D = -(x_1(y_2 z_3 - z_2 y_3) - y_1(x_2 z_3 - z_2 x_3) + z_1(x_2 y_3 - y_2 x_3)) \quad (5)$$

Pro získání popisu roviny lze si stanovit další pomocné parametry roviny, jako je např. vytnuté úseky na osách, vzdálenost roviny od počátku, výpočet úhlů kolmice z počátku na rovinu s osami apod.

Významné údaje získáme pomocí výpočtů kosinových úhlů roviny. Kolmice z počátku k rovině svírá s kladnými poloosami souřadného systému úhly α (pro úhel mezi kolmicí s osou x), β (pro úhel mezi kolmicí s osou y) a χ (pro úhel kolmice s osou z) podle vztahů:

$$\cos \alpha = \frac{A}{\pm \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \quad (6)$$

$$\cos \beta = \frac{B}{\pm \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \quad (7)$$

$$\cos \chi = \frac{C}{\pm \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \quad (8)$$

Pro popis polohy senzoru podle obr. 12 je dále připraven matematický aparát. Senzor ve své poloze rozlišuje vnitřní souřadný systém (x_s, y_s, z_s). Pro popsání směrů vektorů sil v těchto osách jsou vytvořeny roviny:

- E1 základní šikmá rovina pro umístění senzoru
- E1_s rovina souřadného systému senzoru v osách x_s, y_s ,
- E2 pomocná rovina kolmá na rovinu E1 a procházející osou x_s ,
- E3 pomocná rovina kolmá na rovinu E1 a procházející osou y_s ,
- E4 pomocná rovina rovnoběžná s vektorem zemské tíže g a procházející středem souřadného systému senzoru a osou x_s ,

- E5 pomocná rovina rovnoběžná s vektorem zemské tíže g a procházející středem souřadného systému senzoru a osou y_s .

Obr. 12 Zobrazení pomocných rovin

Výpočty rovnic a ostatních parametrů všech těchto rovin se provádí pomocí rovnic (1) až (8). Systém výpočtů je proveden v prostředí EXCEL.

Další analytické řešení se týká výpočtů úhlů mezi rovinami a změn polohy při otočení nebo posunutí krychle se senzorem do jiného souřadného systému.

Pro řešení výpočtů úhlů mezi rovinami je připraven vztah:

$$\cos \varphi = \frac{|A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2|}{\sqrt{(A_1^2 + B_1^2 + C_1^2)(A_2^2 + B_2^2 + C_2^2)}} \quad (9)$$

Pro změny souřadného systému (pootočení, posun apod.) jsou uvedeny vztahy pro výpočty nových souřadnic (X, Y, Z) z původních souřadnic (x, y, z) a naopak:

$$\begin{aligned} X &= a_1 x + b_1 y + c_1 z, & Y &= a_2 x + b_2 y + c_2 z, \\ Z &= a_3 x + b_3 y + c_3 z \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} x &= a_1 X + a_2 Y + a_3 Z, & y &= b_1 X + b_2 Y + b_3 Z, \\ z &= c_1 X + c_2 Y + c_3 Z \end{aligned} \quad (11)$$

Kde koeficienty a_i, b_i, c_i pro $i = 1, 2, 3$ jsou cosiny úhlů změn polohy původní osy a nové osy podle tabulek:

$a_1 = \cos \alpha_1$	x/X	$b_1 = \cos \beta_1$	y/Y
$a_2 = \cos \alpha_2$	x/Y	$b_2 = \cos \beta_2$	y/Y
$a_3 = \cos \alpha_3$	x/Z	$b_3 = \cos \beta_3$	y/Z

$c_1 = \cos \chi_1$	z/X
$c_2 = \cos \chi_2$	z/Y
$c_3 = \cos \chi_3$	z/Z

Závěr

Nová laboratorní úloha „MEMS – akcelerometrický senzor“ je příkladem laboratorní výuky předmětů informatiky a automatizace. Dává možnost studentům pracovat s moderním typem senzorů, seznámit se s použitím mikrokontrolerů při vyhodnocování signálů ze senzorů a návod pro řešení bezdrátového přenosu dat ze senzorů. Dále v příspěvku se ukazuje aplikace matematického aparátu prostorové geometrie pro analýzu měřených údajů s výstupů systému ZSTAR o poloze senzoru v prostoru.

Literatura

- (1) *Using the MMA7360L ZSTAR2 Demo Board: Application Note.* URL: www.freescale.com [cit. 2008-12-1]
- (2) *Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer, MMA 7360L: Technical Data.* URL: www.freescale.com [cit. 2008-12-1]
- (3) *MMA7360L ZSTAR2: Accelerometer Demo Tool* [program na CD-ROM]. Ver. 01/2008. Freescale semiconductor, USA, 2008
- (4) Bartsch H. J. *Matematické vzorce*. 4. vyd. Praha: Academia, 2006, s. 832 s. ISBN: 80-200-1448-9

Doc. Ing. František Hruška
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín
Tel. 00420 576 035 246
hruška@fai.utb.cz
www.fai.utb.cz