

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

# FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

katedra řídicí techniky

# Bakalářská práce

# Využití slunečního senzoru pro určení orientace

Vojtěch Myslivec

Vedoucí práce:

Ing. Jan Roháč, Ph.D.

 $Kv\check{e}ten~2013$ 

České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

#### Student: Vojtěch Myslivec

Studijní program: Kybernetika a robotika Obor: Systémy a řízení

#### Název tématu: Využití slunečního senzoru pro určení orientace

#### Pokyny pro vypracování:

1. Analyzujte možnosti a provedení současných slunečních senzorů včetně jejich konstrukcí, použitých komponent a jejich odolnosti na změny teplot, kosmické záření, apod. Porovnejte vlastnosti analogových a číslicových provedení.

2. Navrhněte a realizujte sluneční senzor využívající kamery pro sledování trajektorie pohybu Slunce.

3. Navrhněte algoritmus, který na základě vyhodnocení pozice Slunce a jeho trajektorie určí pozici senzoru a při znalosti pozice senzoru umožní následně určit orientaci senzoru vůči vektoru dopadajícího záření.

4. Analyzujte dosažitelnou přesnost a velikost zorného pole senzoru, okrajové podmínky jeho funkčnosti a senzor prakticky ověřte pomocí pozemních experimentů.

#### Seznam odborné literatury:

[1] Griffin M. D., French J. R.: Space Vehicle Design, Second Edition, ISBN:1-56347-539-1
 [2] Davies M.: Standard Handbook for Aeronautical and Astronautical Engineer. ISBN: 0-7680-0915-4

Vedoucí: Ing. Jan Roháč, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2013/2014

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc. vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, ĆSc. děkan

V Praze dne 13. 12. 2012

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně pouze pod odborným vedením vedoucího práce, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 24. 5. 2013

Ville Myline Podois

# Poděkování

Děkuji především vedoucímu bakalářské práce, Ing. Janu Roháčovi, Ph.D., za čas strávený nad mou prací a za cenné připomínky, kterých nebylo málo. Dále děkuji své rodině za zázemí a klid nejen při zpracovávání této práce.

# Obsah

1	Úvo	od		10						
	1.1	Motiv	ace	10						
	1.2	.2 Současné navigační metody na oběžné dráze Země								
		1.2.1	Snímaní magnetického pole Země	10						
		1.2.2	Využití gyroskopů	10						
		1.2.3	Akcelerometry	11						
		1.2.4	Snímání expozice Země (angl. Horizon Sensor)	11						
		1.2.5	Radiová navigace	12						
		1.2.6	Snímání polohy hvězd (angl. Star Tracker)	12						
		1.2.7	Snímání polohy Slunce (angl. Sun Sensor)	12						
<b>2</b>	$\operatorname{Re}\check{s}$	erše sl	unečních senzorů	14						
	2.1	Defini	ce slunečního senzoru	14						
	2.2	Jedno	duché sluneční senzory	14						
		2.2.1	Analogový sluneční senzor	14						
		2.2.2	Binární sluneční senzor	15						
	ční štěrbinové senzory s CMOS a CCD čipy	16								
		2.3.1	CCD obrazové snímače	17						
		2.3.2	CMOS obrazové snímače	17						
		2.3.3	Porovnání CMOS a CCD obrazových čipů	18						
		2.3.4	Jednoštěrbinový digitální sluneční senzor	19						
		2.3.5	Digitální sluneční senzor MEMS	20						
	2.4	Senzo	ry se solárními panely	21						
	2.5	Kamerové senzory								
	2.6	o Vyhodnocovací obvody slunečních senzorů								
	2.7	2.7 Enviromentální podmínky v kosmickém prostoru								
		2.7.1	Teplotní výkyvy	23						
		2.7.2	Kosmické záření a elektricky nabité částice	23						
		2.7.3	Mikrometeory a kosmický odpad	24						
		2.7.4	Effekt outgassing	25						
3	Náv	vrh řeš	ení a realizace	26						
	3.1	Návrh	softwarového řešení	26						

		3.1.1	Výpočet orientace senzoru vůči Slunci	27	
		3.1.2	Výpočet pozice a orientace senzoru	31	
	3.2	Realiz	ace v MatLabu	37	
		3.2.1	Stručný popis základních funkcí	37	
	3.3	Návrh	a realizace hardwarového řešení	38	
	3.4	Zhodn	ocení navržených postupů a zařízení	40	
4 Analýza a testování					
	4.1	Testov	<i>r</i> ací měření	41	
	4.2	Přesno	əst získaných údajů	43	
		4.2.1	Přesnost změřeného relativního azimutu a zenitu	43	
		4.2.2	Přesnost změřené zeměpisné polohy a orientace	44	
		4.2.3	Celková přesnost	45	
	4.3	Zhodn	ocení dosažených výsledků	47	
5	Záv	ěr		48	

# Seznam obrázků

1	Principy senzorů orientace a polohy <sup>[1]</sup>	11
2	Příklad slunečního senzoru <sup>[16]</sup>	13
3	Princip analogového slunečního senzoru $^{[3]}$	15
4	Předpokládaný tvar výstupního signálu v závislosti na úhlu $^{[3]}$	15
5	Princip binárního slunečního senzoru <sup>[3]</sup>	16
6	Princip CCD obrazového snímače	17
7	Princip CMOS obrazového snímače	18
8	Princip jednoštěrbinového digitálního slunečního senzoru	19
9	Micro Digital Sun Sensor	19
10	Princip MEMS digitálního slunečního senzoru	20
11	Princip senzoru se solárními panely	21
12	Obraz z kamery bez a s optickým filtrem	22
13	Navržená měřicí sestava	26
14	Celkové blokové schéma měřicího a vyhodno covacího algoritmu	27
15	Princip algoritmu pro výpočet orientace	27
16	Princip algoritmu detekce zdroje v obraze	27

17	Princip určení těžiště	28
18	Princip určení vektoru dopadajícího záření	29
19	Situace při nakloněném senzoru	30
20	Princip algoritmu pro výpočet pozice a orientace senzoru	31
21	Příklad proložení naměřených dat křivkou	32
22	Mapování odchylky měřené a teoretické pozice Slunce pro $\operatorname{celý}$ Zemský povrch	33
23	Mapování odchylky měřené a teoretické pozice Slunce pro sektor 20° x 20°	34
24	Zjednodušený vývojový diagram gradientního algoritmu	35
25	Příklad vyhledávání gradientním algoritmem	36
26	Schématický model testovacího zařízení	38
27	Testovací zařízení během měření	39
28	Změřené průběhy relativního azimutu a zenitu	42
29	Výsledky průběžného vyhodnocování polohy během měření	42
30	Výsledky testu vlivu chyby náklonů na vypočtený azimut a zenit	44
31	Výsledky testu vlivu chyby změřených dat na výslednou pozici $\ldots\ldots\ldots$	45
32	Několik fotografií senzoru	50
33	Snímek měřicí aplikace v MatLabu	51

# Přílohy

1.	Několik	fotografií	$\mathbf{Z}$	průběhu	konstrukce	a	měření
----	---------	------------	--------------	---------	------------	---	--------

2. Snímek měřicí aplikace

## Anotace

Smyslem této práce je především navrhnout algoritmy, které na základě trajektorie Slunce na obloze dokáží určit zeměpisnou pozici a orientaci, ze které byla tato trajektorie snímána. Dále pak tuto trajektorii vhodným způsobem zaznamenat pomocí zkonstruovaného testovacího senzoru a ověřit funkčnost algoritmů, jednak na vygenerovaných datech simulujících v současné době vyráběné senzory, a jednak na datech změřených testovacím senzorem. Testování na změřených datech má ukázat především funkčnost algoritmů s reálnými daty a ověřit navržené postupy pro zpracování dat. Vzhledem k tomu, že je práce přípravou pro realizaci slunečního senzoru pro vesmírné aplikace, je její součástí také analýza současných provedení takových senzorů, dále analýza enviromentálních podmínek na oběžné dráze Země a problémů, se kterými je potřeba se při konstrukci podobného senzoru vypořádat. Na základě této analýzy je následně navržen a zkonstruován vhodný typ slunečního senzoru, respektive jeho první testovací verze, sloužící především pro ověření funkčnosti, nikoliv pro dosažení vysoké přesnosti. Výstupem práce je tedy analýza podmínek na oběžné dráze, návrh spolehlivého a pokud možno co nejméně výpočetně náročného algoritmu pro výpočet pozice a orientace, který dosahuje vysokých přesností, a konečně návrh a realizace testovacího senzoru, který testuje principy snímání trajektorie Slunce a funkčnost navržených algoritmů za hranicemi pouhých simulací.

## Annotation

The purpose of this work is to design algorithms that can determine the geographical position and orientation based on measuring the trajectory of the Sun in the sky, from which was trajectory scanned. Subsequently this trajectory record using constructed test sensor and verify the functionality of algorithms. Testing with measured data is needed for checking up functionality with real data and verification the proposed procedures for data processing. The work is preparation for the implementation of solar sensor for space applications, it involves an analysis of the current design of such sensors, analysis of environmental conditions on Earth orbit and problems, which is needed to deal during the construction of similar sensor. Based on this analysis is then designed and built the appropriate first test version of sun sensor, used mainly to verify the functionality, not to achieve high accuracy. Outcome of this work is the analysis of conditions on Earth orbit, design of reliable algorithm to calculate the position and orientation that achieves high accuracy, and finally the design and construction of a test sun sensor that tests the principles of scanning the Sun and verify the functionality of the proposed algorithms beyond mere simulations.

# 1 Úvod

## 1.1 Motivace

Pro určení polohy na Zemi existuje mnoho metod a technologií, počínaje jednoduchým sextantem a konče GPS družicemi na oběžné dráze, a sluneční senzory se uplatňují spíše pro meteorologické či energetické účely. Navíc díky zemské atmosféře jsou podmínky pro snímání Slunce často velmi omezené. S rostoucí vzdáleností od zemského povrchu se ale situace mění, a klasické způsoby určení pozice a orientace často selhávají nebo již nejsou tak výhodné. A právě zde přichází v úvahu nasazení slunečního senzoru. Pro setrvání umělé družice na oběžné dráze naší planety je nezbytné řídit rychlost a výšku oběhu této družice. Jedině pokud je součet gravitační síly Země a odstředivé síly vzniklé rotací roven nule, lze družici dlouhodobě udržet na oběžné dráze. A například v případě geostacionárních družic je potřeba velmi přesné znalosti polohy a orientace ještě silnější. Pro tyto účely je tedy klíčovou funkcionalitou každé takové družice správné určení aktuální relativní polohy a orientace vzhledem k Zemi. Toho lze dosáhnout různými metodami. Následuje stručný přehled takových metod.

## 1.2 Současné navigační metody na oběžné dráze Země

## 1.2.1 Snímaní magnetického pole Země

Pomocí magnetometru je snímáno magnetického pole Země, následně je z těchto údajů vypočtena poloha senzoru. Magnetometry jsou elektronické senzory snímající velikost a směr magnetické indukce daného magnetického pole. Vzhledem ke snižující se intenzitě magnetického pole Země se zvyšující se vzdáleností od ní lze tento princip využít jen na nízkých orbitách, tedy například ne pro geostacionární družice. Navíc není magnetické pole Země časově stálé, póly se posouvají, a pole je ovlivňováno slunečními erupcemi. Z těchto důvodů se příliš nehodí pro přesné výpočty polohy.

## 1.2.2 Využití gyroskopů

Gyroskop je zařízení využívající rotující setrvačník, který je ukotvený v pohyblivých závěsech. Díky konstrukci těchto závěsů a vysokému momentu hybnosti rotujícího setrvačníku si tento setrvačník udržuje svou původní osu rotace bez ohledu na otáčení závěsů, ve kterých je uchycen. Toho lze s výhodou využít při určení orientace v prostoru, kdy jsou snímána právě natočení jednotlivých závěsů. Z nich pak lze dopočítat natočení vzhledem k původní orientaci. Celý systém je ale zatížen chybou vzniklou třením v závěsech, kvůli které dochází k ovlivnění orientace osy rotující části gyroskopu a vzhledem k tomu, že měření probíhá inkrementálně, je nutno měřené údaje pravidelně korigovat. Navíc z principu dovolují gyroskopy měřit pouze orientaci v prostoru, nikoliv pozici, proto je nutné je používat v kombinaci s dalšími technologiemi.

## 1.2.3 Akcelerometry

Akcelerometry snímají velikost zrychlení. Tedy oproti gyroskopům snímají translační pohyb. Na základě snímané velikosti zrychlení je inkrementálně určena současná pozice vůči pozici výchozí. Dostupné jsou v mnoha provedeních, jako jsou servo-akcelerometry či miniaturní mikromechanické akcelerometry. Nicméně podobně jako gyroskopy nejsou schopny dlouhodobého přesného měření bez pravidelných korekcí. V současné době nacházejí široké uplatnění například v mobilních telefonech či navigačních systémech letadel.

#### 1.2.4 Snímání expozice Země (angl. Horizon Sensor)

Pomocí vhodné kamery je snímán povrch Země, míra expozice Sluncem a tvar této expozice. Z těchto dat je následně při znalosti aktuálního času vypočtena poloha, ze které je planeta snímána, a tím tedy poloha družice. Tato metoda dosahuje relativně nízkých přesností, navíc nároky na vyhodnocovací obvody jsou srovnatelné s jinými, mnohem přesnějšími metodami. Principiální schéma funkce je na obr. 1a.



Obrázek 1: Principy senzorů orientace a polohy<sup>[1]</sup>

### 1.2.5 Radiová navigace

Výpočet vlastní polohy z přijatých radiových signálů je principem použitelným nejen pro účely navigace na Zemi. Současné globální navigační družicové systémy, známé pod zkratkou GNSS - Global Navigation Satellite Systems, jako je americký systém GPS, nebo plánovaný evropský systém GALILEO, lze v některých případech využít i pro navigaci na oběžné dráze, především na nízkých orbitách. Družice může přijímat také signály z vysílačů na Zemi, nebo i signály z jiných družic. Přijímač i vyhodnocovací obvody lze umístit do miniaturního a levného čipu. Opět lze dosáhnou vysoké přesnosti. Tento způsob navigace společně s měřením magnetického pole má také oproti ostatním tu výhodu, že lze senzor umístit prakticky kamkoli, tedy nezabírá místo vně družice, je lépe chráněný a není ani rozměrově náročný.

## 1.2.6 Snímání polohy hvězd (angl. Star Tracker)

Vhodnou kamerou je snímána určitá část oblohy. Tento snímek je korelován se záznamy v databázi a je nalezena nejlepší shoda. Na základě této shody je dopočtena pozice, ze které byl snímek pořízen. Lze dosáhnout velmi přesných výsledků, obvykle přesnějších než při snímání pozice Slunce (viz dále), nicméně prováděné výpočty jsou složitější a výpočetně náročnější. Stejně jako u ostatních metod využívajících kameru vzniká riziko poškození objektivu nebo čipu kamery mikrometeory či kosmickým odpadem. Proto je třeba zařízení dobře chránit.

#### 1.2.7 Snímání polohy Slunce (angl. Sun Sensor)

Slunečním senzorem je sledována pozice Slunce, na základě které je následně určena orientace senzoru, či jeho pozice. Pro určení pozice ale samotné Slunce poskytuje ze třech nutných údajů o poloze pouze dva. Proto je nutné metodu buď kombinovat s jinou, nebo dopočítávat třetí údaj ze zakřivení trajektorie Slunce a znalosti směru gravitačního vektoru. Čím je zaznamenaná trajektorie delší, tím je výpočet přesnější. Kvůli tomuto aspektu je ale tento postup časově nejnáročnější ze všech uvedených. Metoda má opět vyšší nároky na vyhodnocovací obvody, ale dosahuje vysoké přesnosti především při měření orientace. Příklad takového slunečního senzoru je na obr. 2.



Obrázek 2: Příklad slunečního senzoru<sup>[16]</sup>

Navigace pomocí snímání polohy a trajektorie Slunce není jednoznačně nejlepší volbou, nicméně patří mezi spolehlivé a přesné metody. Sluneční senzory, stejně jako další senzory využívající optické snímače, musejí být umístěny kvůli rozšíření zorného pole buď na pohyblivou konzoli, nebo musejí být na navigované zařízení umístěny vícekrát. Z důvodu nižší spolehlivosti pohyblivých konstrukčních prvků je obvykle preferována druhá možnost, tedy použití více senzorů i za cenu vyšších nákladů. Vzhledem k zadání se práce dále zabývá pouze navigací pomocí snímání Slunce a další možnosti již neuvažuje.

## 2 Rešerše slunečních senzorů

## 2.1 Definice slunečního senzoru

Sluneční senzor je obvykle elektronická součástka snímající intenzitu slunečního záření nebo jeho směr, případně obojí. Tuto změřenou veličinu převádí na odpovídající elektrický signál. Výstupem tohoto senzoru tak může být informace o intenzitě dopadajícího slunečního záření nebo informace o poloze dopadajícího záření, případně obojí, navíc pokud je senzor vybaven dalšími vyhodnocovacími obvody, může být výstupem orientace senzoru vůči zdroji záření (Slunci) či vůči Zemi. To ale vyžaduje použití mikroprocesoru.

## 2.2 Jednoduché sluneční senzory

Na rozdíl od senzorů, které budou následovat, jsou tyto senzory založeny na jednodušších principech. Obvykle sice nejsou tak přesné jako dále uvedené senzory, často jsou ale spolehlivější a levnější, a to především díky jednoduchosti principů, na nichž jsou založeny. Toho lze využít v méně náročných aplikacích, kde je důležitá vysoká spolehlivost a vysoká míra odolnosti vůči vnějším vlivům, zejména vůči teplotním výkyvům a kosmickému záření bez nutnosti nasazení dalších ochranných prostředků. Nízká přesnost je ale předurčuje spíše pro stanovení optimálních náklonů solárních panelů atd., než pro přesné stanovení polohy. Následují dva typy takových senzorů.

### 2.2.1 Analogový sluneční senzor

Principiální schéma pro určení polohy v jedné ose je na obr. 3. Sluneční světlo dopadající na optiku senzoru je čočkou zaostřeno do malého bodu na detekční ploše fotocitlivého prvku, v tomto případě fotovoltaického článku. Výstupem tohoto senzoru je tedy napětí závisející na úhlu dopadu záření, průběh tohoto napětí je schématicky znázorněn na obr. 4. Z principu je zřejmé, že senzor bude dostatečně citlivý pouze na malé odchylky od kolmého směru dopadu paprsků. Nulový bod ve výstupním průběhu odpovídá situaci, kdy záření dopadá přesně na rozhraní obou fotocitlivých prvků, tedy v kolmém směru. Při větší odchylce dopadá již celý zaostřený svazek na fotocitlivý prvek a následné změny napětí jsou již téměř nedetekovatelné. Orientaci výchylky lze určit z polarity výstupního napětí za předpokladu, že jsou fotocitlivé prvky propojeny antiparalelně.



Obrázek 3: Princip analogového slunečního senzoru<sup>[3]</sup>



Obrázek 4: Předpokládaný tvar výstupního signálu v závislosti na úhlu<sup>[3]</sup>

Díky své jednoduchosti má tento senzor předpoklady k vysoké odolnosti vůči kosmickým vlivům, tedy především změnám teplot a kosmickému záření. Fotovoltaické články jsou dnes v kosmu běžně používané. Nicméně informace v analogové formě je obecně mnohem náchylnější na rušení oproti digitální reprezentaci dat, proto není tento typ senzoru v praxi příliš používaný. Z toho důvodu již dále nebudou senzory s analogovým výstupem zmiňovány. Možným řešením tohoto problému by mohlo být nasazení vhodného analogově-digitálního převodníku, čímž ale senzor částečně ztrácí svou jednoduchost.

## 2.2.2 Binární sluneční senzor

Následující sluneční senzor je opět založen na jednoduchém, ale velmi spolehlivém principu, který má předpoklady k vysoké odolnosti vůči rušení. Jak je vidět na obr. 5, jedná se o senzor obsahující dvě masky a fotocitlivou část. Sluneční záření je nejprve redukováno první maskou na podlouhlý úzký pruh, který je následně filtrován druhou maskou. Ta obsahuje štěrbiny uspořádané tak, aby v každém místě, kam dopadá pruh záření, propustila toto záření vždy na jiné fotocitlivé prvky pod sebou. Tím již zde dochází ke kvantování a digitalizaci.



Obrázek 5: Princip binárního slunečního senzoru<sup>[3]</sup>

Jako detektory záření lze opět použít fotovoltaické články. Výstupem tohoto senzoru je pak paralelní informace odpovídající poloze, kterou stačí pouze filtrovat (například Schmittovým klopným obvodem). Problém může nastat v případě, kdy světlo dopadá přesně na rozhraní dvou štěrbin. Pak může docházet k chybnému vyhodnocení polohy, pokud nejsou tyto problémy řádně ošetřeny při zpracování, případně použitím vhodné masky. Použitím kvalitní masky s vysokým rozlišením lze dosáhnout poměrně vysoké přesnosti.

## 2.3 Sluneční štěrbinové senzory s CMOS a CCD čipy

Tyto senzory využívají k určení polohy paprsku procházejícího štěrbinou čip vyrobený technologií Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) nebo Charge Coupled Device (CCD). Oproti předchozím senzorům, kde bylo k určení polohy ve dvou osách z principu potřeba dvou takových senzorů, zde postačuje jediný senzor. Také předpoklady pro přesnost jsou vyšší vzhledem k dnešním vysokým rozlišením snímacích čipů. Aby ne-docházelo k přebuzení čipů, jsou senzory obvykle doplněny optickými filtry.

Následující text se nejprve zabývá představením CMOS a CCD čipů, jejich porovnáním, a následně přibližuje principy nejčastěji používaných provedení senzorů s těmito čipy. Ty jsou založeny vždy na stejném základním principu a liší se obvykle přesností, velikostí a dalšími parametry.

#### 2.3.1 CCD obrazové snímače

Název CCD čip je zavádějící, správně by se mělo jednat o obrazový čip vyrobený technologií CCD, nicméně název CCD čip je již běžně používaným termínem. To samé platí pro čipy CMOS. Historicky starší čip CCD je složen z mnoha světlocitlivých buněk (obvykle fotodiod nebo fototranzistorů), které při dopadu záření produkují elektrický náboj. Tyto náboje z jednotlivých řádků senzoru jsou postupně přesouvány pomocí příslušných obvodů na posuvný registr, kterým je čip vybaven a přes něj dále do zesilovače.

Princip funkce je na obr. 6. Vzhledem k tomu, že je zesilovač umístěn dále od snímacích prvků a je jen jeden pro všechny snímací prvky, vykazují čipy vyrobené technologií CCD nižší šum. Nicméně jejich výroba je nákladnější, dnes již také díky tomu, že technologie CCD není tak rozšířená, jako například dále zmiňovaná technologie CMOS.



Obrázek 6: Princip CCD obrazového snímače

#### 2.3.2 CMOS obrazové snímače

Novější čipy vyráběné technologií CMOS vykazují sice převážně horší vlastnosti než čipy CCD, nicméně vzhledem k tomu, že jsou vyráběny stejnou technologií, kterou je vyráběna většina dnešních procesorů, je jejich výroba mnohem levnější. Principiální schéma je na obr. 7. Zásadní rozdíl oproti čipům CCD je ve zpracování informací z jednotlivých fotocitlivých snímacích prvků. Zde má každý snímací prvek své vlastní vyhodnocovací obvody jako jsou zesilovač nebo odvody potlačení šumu, viz obr. 7.

Výhodou tohoto řešení je možnost přistupovat přímo k určitému výřezu snímaného obrazu bez nutnosti nejprve načítat celý snímaný obraz, také celkově rychlejší transport nasnímaných dat z čipu, nevýhodou je především vyšší zatížení šumem (oproti CCD), a také menší aktivní plocha senzoru (plocha, kterou na čipu zaujímají samotné fotocitlivé



Obrázek 7: Princip CMOS obrazového snímače

prvky, u čipu CMOS zabírají značnou část vyhodnocovací obvody, u méně kvalitních čipů může tvořit aktivní část pouze 30 % plochy čipu<sup>[5]</sup>).

## 2.3.3 Porovnání CMOS a CCD obrazových čipů

Z principů senzorů CCD a CMOS uvedených v předchozích kapitolách vyplývá následující tabulka 1, která porovnává některé vlastnosti těchto čipů.

Vlastnost	CMOS	CCD
rozměry řešení	nižší	vyšší
cena čipu	nižší	vyšší
spotřeba energie	nižší	vyšší
odolnost vůči šumu	nižší	vyšší
rychlost snímání	vyšší	nižší
rozlišení	nižší	vyšší
citlivost	nižší	vyšší
nativní možnost výřezu	ano	ne

Tabulka 1: Porovnání CMOS a CCD obrazových čipů

Díky širšímu nasazení technologie CMOS jsou čipy vyrobené touto technologií obvykle menší a levnější. Také jejich energetická spotřeba je několikanásobně nižší díky menším součástkám, proudům a tepelným ztrátám. Naopak vyšší odolnost vůči šumu, rozlišení a citlivost vykazují čipy CCD. Nevýhody CMOS čipů ale výrobci vhodnými hardwarovými, případně softwarovými řešeními postupně úspěšně potlačují. Nicméně ve většině současných řešení slunečních senzorů jejich konstruktéři stále spoléhají na čipy CCD, což dokazuje i nabídka renomovaných výrobců měřících kamer pro přesná měření (například firma Moravské přístroje a.s., k datu vydání práce).

## 2.3.4 Jednoštěrbinový digitální sluneční senzor

Senzor snímá polohu dopadu úzkého svazku slunečního záření na CMOS nebo CCD obrazový čip. Tento úzký svazek je vytvořen maskou, kterou tvoří neprůhledný materiál s jediným úzkým otvorem tak, jak je vidět na obr. 8. Tento otvor je zakryt poloprůhledným filtrem, aby nedocházelo k přebuzení čipu. Výstupem čipu je matice reprezentující inten-



Obrázek 8: Princip jednoštěrbinového digitálního slunečního senzoru

zitu dopadajícího záření na jednotlivé fotocitlivé prvky čipu. Z této matice je pak pomocí vyhodnocovacích obvodů vybrána pozice nejvíce exponovaného prvku. Výstupem celého senzoru je pak poloha světelného bodu dopadajícího na čip ve formátu [x, y].

Příkladem takového senzoru může být senzor nazvaný Micro Digital Sun Sensor  $(\mu DSS)^{[6]}$ , vyvinutý nizozemskou firmou TNO. Senzor využívá CMOS čip s rozlišením 512 x 512 px a čtvercový otvor v jeho masce má rozměry 10 x 10 px. Jeho vyhodnocovací obvody poskytují nová výstupní data s frekvencí až 10 Hz. Celé zařízení má objem pouze 4 cm<sup>3</sup> a díky použitým speciálním materiálům vykazuje vysokou odolnost vůči kosmickému záření a tepelným výkyvům, viz kapitola 2.7.



Obrázek 9: Micro Digital Sun Sensor

#### 2.3.5 Digitální sluneční senzor MEMS

Tento senzor je založen na podobném principu jako předchozí jednoštěrbinový senzor s tím rozdílem, že v masce senzoru je otvorů více. Také jeho rozměry jsou podstatně jiné. MEMS je zkratka z anglického Micro-Electronic-Mechanical-Systems. Ta napovídá, že senzor vyrobený touto technologií bude miniaturních rozměrů. Tak je tomu i v případě tohoto senzoru, jeho velikost nepřekračuje velikost jednoho centimetru čtverečního. Principiální schéma je na obr. 10.



Obrázek 10: Princip MEMS digitálního slunečního senzoru

Výhodou této modifikace je především snížení chyby, dá se říci, že tento senzor provádí mnoho výpočtů paralelně, a celkový výsledek lze získat například průměrem ze všech výsledků. Tím se chyba snižuje. Navíc senzor s jedinou štěrbinou je náchylnější na zanesení nečistotami. Toto riziko samozřejmě hrozí i u senzoru s více štěrbinami, ale v případě velkého počtu štěrbin a patřičného ošetření při zpracování výsledků lze tento problém eliminovat. V porovnání s jednoštěrbinovým senzorem je tento senzor spolehlivější a má vyšší životnost bez údržby, ale menší zorné pole díky většímu počtu otvorů.

Senzorem tohoto typu je například MEMS sluneční senzor vyvinutý v Kalifornském technickém institutu. Čip se vejde na plochu 7 x 7 mm a váží 30 g. Maska, obsahující několik set otvorů, je od CCD čipu vzdálena pouhých 757  $\mu$ m. Jeho přesnost je v řádech minut (0,016 stupně).

## 2.4 Senzory se solárními panely

Proud generovaný solárním panelem je přímo úměrný úhlu, pod kterým světlo na panel dopadá. Toho lze využít k určení směru, ze kterého světlo přichází. Při vhodném uspořádání solárních panelů lze dosáhnout použitelných výsledků. Tímto uspořádáním je obvykle tvar krychle. Tedy například celá družice má tvar krychle a její povrch tvoří solární panely, viz obr. 11.



Obrázek 11: Princip senzoru se solárními panely

Na základě proudu z každé ze tří exponovaných hran lze dopočítat úhel dopadajícího záření. Závislost není lineární, ale lze jí s dostatečnou přesností aproximovat funkcí sinus. Následně jsou nalezeny takové tři přímky vedené pod tímto úhlem, které mají společný průsečík. Tímto průsečíkem je zdroj záření, tedy Slunce. Problémy mohou vznikat zachycením odrazů od jiných družic. Tyto artefakty se těžko odstraňují, neboť výstupem solárních panelů je pouze proud.

## 2.5 Kamerové senzory

Jak již název napovídá, v tomto případě je senzorem digitální kamera. Přestože většina dnešních digitálních i analogových kamer používá CMOS nebo CCD čipy, pro zpracování informace se používá odlišných postupů. V předchozím případě je senzorem vyhodnocována pouze skutečnost, zda je prvek v matici fotocitlivých prvků osvícen či nikoliv, v tomto případě je zpracováván celý obraz oblohy. To přináší řadu výhod ale i nevýhod.Mezi hlavní výhody patří zejména použití standardní kamery pro dané podmínky, kterou lze případně využít i pro jiné aplikace. Další výhodou je možnost použít jako orientační bod jiný světelný bod než Slunce (platí především ve vesmíru). Nevýhodou může být vyšší výpočetní náročnost a tedy složitost vyhodnocovacích obvodů a jejich náchylnost k poruchám. Snímací čipy obrazových senzorů nejsou koncipovány na snímání přímého slunečního záření, tedy při pohledu kamery do Slunce dochází k přebuzení fotocitlivých prvků a výsledný obraz je nepoužitelný. Proto je obvykle nutné před kameru umístit vhodný optický filtr, který zajistí potřebné korekce. Stupeň filtru je samozřejmě potřeba zvolit s ohledem na jas snímaného objektu. Další výhodou nasazení optického filtru při snímání Slunce je fakt, že je jeho použitím odstraněna z obrazu většina méně jasných objektů, které jsou pro vyhodnocovací algoritmy velmi rušivé. Příklad obrazu bez použití optického filtru a s jeho použitím je na obr. 12. Na takto upravený a nasnímaný obraz je následně aplikován algoritmus pro nalezení středu slunce (nebo jiného orientačního bodu).



Obrázek 12: Obraz z kamery bez a s optickým filtrem

## 2.6 Vyhodnocovací obvody slunečních senzorů

Úkolem vyhodnocovacího obvodu, kterým je zařízení obvykle vybaveno, je z dat, která poskytuje samotný senzor, dopočítat požadované údaje, tedy v jednodušší případě vektor dopadajícího záření či úhly, pod kterými záření dopadá, ve složitějším případě i pozici senzoru. Úloha určení pozice vyžaduje implementaci pokročilejších algoritmů pro výpočet teoretické polohy zdroje záření, znalost aktuálního data a času atd.

Vzhledem k nutnosti provádění takových výpočtů se vyhodnocovací obvod slunečního senzoru obvykle neobejde bez mikroprocesoru a zároveň je takový mikroprocesor schopen zajistit veškeré potřebné funkce, tedy vyhodnocovacím obvodem je ve většině případů mikroprocesor s nutnými periferiemi, jako je paměť či napájecí obvody. Mezi hlavní požadavky na takový obvod patří především spolehlivost a dostatečný výpočetní výkon (který závisí na použitém principu senzoru). Mikroprocesory od renomovaných výrobců dostatečnou spolehlivost zajišťují, tedy řešení spolehlivosti v konkrétní aplikaci přichází až při implementaci konkrétního vyhodnocovacího algoritmu.

## 2.7 Enviromentální podmínky v kosmickém prostoru

Znalost prostředí, kterému bude zařízení vystaveno, je klíčová pro jeho správné dlouhodobé fungování. To platí nejen na Zemi, ale i v kosmu, kde je tato znalost o to důležitější, vzhledem k omezeným možnostem údržby provozovaných zařízení.

#### 2.7.1 Teplotní výkyvy

V kosmickém prostoru je nutné předpokládat vysoké teplotní výkyvy. Od teplot hluboko pod nulou bez působení slunečního záření, až po několik desítek stupňů celsia při jeho působení, podobně jako v podmínkách naší planety. Obvykle je udáván rozsah od  $-70^{\circ}$ C do  $70^{\circ}$ C<sup>[14]</sup>. Je obecně známo, že se změnou teploty se mění fyzikální parametry látek, a to v důsledku znamená změnu vodivosti součástek, citlivosti snímačů, nebo změnu rozměrů mechanických komponent a rychlé stárnutí některých materiálů, které jsou těmto vlivům vystaveny. Několikanásobně vyšším teplotám je nutné čelit při transportu zařízení na oběžnou dráhu, kdy teploty vlivem tření v atmosféře rychle stoupají. To je záležitost především nosných raket a ochranných krytů, kterými je transportované zařízení chráněno.

Negativním důsledkům změny teplot na oběžné dráze lze předcházet různými způsoby. Je důležitá zejména vhodná volba součástek a materiálů, dále pak správný návrh mechanických komponent s přihlédnutím k teplotní roztažnosti použitých materiálů. Používají se speciální materiály s nízkou teplotní roztažností a vysokou stálostí dalších parametrů, jako jsou odpor, kapacita atd. Vývoj těchto materiálů jde stále kupředu, nicméně již v současné době existují materiály, které splňují požadavky na dlouhodobý pobyt v kosmu. Jsou jimi různé slitiny kovů či polytetrafluorethen (teflon).

## 2.7.2 Kosmické záření a elektricky nabité částice

Kromě světla ve viditelném či ultrafialovém spektru, které způsobuje rychlé stárnutí některých materiálů, tvoří záření přicházející z kosmického prostoru z velké části protony a jádra helia. Pochází z různých zdrojů ve vesmíru, včetně Slunce. Na zemský povrch dopadají pouze 2 %<sup>[8]</sup> kosmického záření, které míří k Zemi, zbytek je odražen jejím magnetickým polem. Tento ochranný účinek ale se vzdáleností od Země klesá a to se negativně projevuje již na oběžné dráze naší planety. Na nízké oběžné dráze (do 2000 km) je ještě tento vliv kosmického záření poměrně malý, na ostatních je již potřeba zajistit patřičnou ochranu. Toto kosmické záření, dopadající na exponovaná elektrická zařízení, může způsobit nejen odlišné chování elektrických obvodů (například může způsobit změnu stavu paměti), dopad částice s vysokou energií může zařízení poškodit či zničit. Například u obrazových snímačů způsobuje toto záření šum obrazu, v horším případě pak "vypaluje" jednotlivé fotocitlivé buňky. Jsou známy případy<sup>[10]</sup>, kdy kosmické záření vyřadilo z provozu celou družici na oběžné dráze Země. Záření proniká většinou materiálů do velké hloubky, nicméně existují materiály schopné do značné míry toto záření pohltit.

Vlivem slunečních erupcí jsou také do kosmického prostoru vyvrhována mračna nabitých částic, která jsou kromě výše uvedených problémů zdrojem vlastního elektromagnetického pole. Taková pole dosahují značných intenzit a tedy jimi indukované proudy nejsou zanedbatelné. Důsledná ochrana stíněním je proto nezbytnou součástí každého elektronického obvodu pracujícího v kosmu. Toto stínění navíc zachytí nabité částice s nižšími energiemi.

Pro ochranu obrazového senzoru se používá tenká skleněná folie, obohacená o cer (cerium, Ce). Tato folie je schopna do velké míry pohltit dopadající kosmické záření a tím chrání fotocitlivé prvky senzoru. Případné ohrožení větším počtem nabitých částic, obvykle v důsledku enormních slunečních erupcí, je řešeno detekcí těchto vlivů a vypnutím zařízení na oběžné dráze. Detekce probíhá nejčastěji sledováním povrchu Slunce z pozemských stanic nebo umístěním speciálních detektorů přímo na oběžnou dráhu.

Nutno podotknout, že před silnými slunečními bouřemi stále neexistuje spolehlivá ochrana. Například sluneční bouře v roce 1959 pronikla přes magnetické pole Země, způsobila impozantní polární záře, viditelné často i v rovníkových oblastech, a v důsledku jiskření na telegrafním vedení zapálila vegetaci na mnoha místech v USA. V té době se po oběžné dráze Země pohybovala pouze družice Sputnik 3. V roce 1994 již slabší bouře způsobila výpadek dvou satelitů a poruchy rozhlasového a televizního vysílání v Kanadě. Vysokoenergetické částice přicházející z dalekého vesmíru také zatím nelze současnou technologií zachytit či odstínit. Nicméně pravděpodobnost zásahu takovou částicí při daných rozměrech zařízení na oběžné dráze je nepatrná.

#### 2.7.3 Mikrometeory a kosmický odpad

Pevná tělesa vyskytující se v kosmickém prostoru a na oběžné dráze Země lze rozdělit do dvou skupin. První je odpad tvořený pozůstatky lidské činnosti ve vesmíru (na oběžné dráze), kterými jsou například zbytky družic. Takových těles se pohybuje po oběžné dráze obrovské množství s různorodou velikostí, hmotností a rychlostí. Do druhé skupiny patří cizí tělesa přicházející z vesmíru, jako jsou meteory. V obou případech hrozí zařízení na oběžné dráze naší planety srážka s těmito tělesy. Velká obíhající tělesa jsou sledována radary ze zemského povrchu a případné kolizi se přechází dočasnou změnou dráhy plavidla. Oproti případu zařízení na oběžné dráze jako celku (raketoplán, družice atd.), kdy se navíc používají různorodé technologicky vyspělé materiály, zajištující dobrou ochranu v případě srážky, v případě slunečních senzorů a dalšího citlivého vybavení, které z principu musí být umístěno vně vesmírného plavidla, se spoléhá především na nízkou pravděpodobnost srážky (vzhledem k rozměrům).

Tělesa přilétající vysokou rychlostí z kosmu mohou zařízení na oběžné dráze zasáhnout pouze zhruba na jedné polovině celkového povrchu (při uvažování klasických tvarů), protože zbylá část je chráněna Zemí. Toho lze s výhodou využít. Na ohroženou část zařízení je instalován vrstvený ochranný štít, tzv. bumper shield<sup>[14]</sup>. Jedná se o štít se speciální vrstvenou strukturou, která dokáže při nárazu tlak rozložit a postupně pohltit. Při každém nárazu sice dochází k poškození štítu, ale díky velkému počtu vrstev nedochází k průrazu a následnému poškození zařízení.

#### 2.7.4 Effekt outgassing

Většina materiálů při pobytu v Zemské atmosféře více či méně absorbují okolní plyny a vodní páry. Takto absorbované látky následně po opuštění atmosféry vlivem poklesu tlaku materiál opouštějí a mohou se usazovat se na povrchu zařízení. Tento jev se v angličtině nazývá outgassing<sup>[14]</sup>. Toto usazování je nežádoucí především na povrchu solárních panelů, které tak ztrácejí účinnost, případně na povrchu optických zařízení. Ochranu proti tomuto efektu poskytuje potažení inkriminovaného materiálů ochrannou vrstvou, která zabrání absorbování plynů z atmosféry. Jedním z nejúčinnějších materiálů pro tento účel je kadmium, případně jeho slitiny.

## 3 Návrh řešení a realizace

Úkolem bylo nejprve zaznamenat pohyb Slunce po obloze pomocí navrženého testovacího slunečního senzoru. Následně na základě takto změřených dat vhodným způsobem určit orientaci a pozici, ze které byla tato data zaznamenána, a tím tedy pozici a orientaci senzoru. Navržené řešení se skládá z hardwarové a softwarové části. Softwarová část je realizována ve výpočetním prostředím MatLab a je popsána v následující kapitole 3.1. Hardwarová část se skládá z testovacího slunečního senzoru popsaného v kapitole 3.3 a počítače, který zajišťuje běh výpočetního prostředí. Tuto celou sestavu ilustruje obr. 13.



Obrázek 13: Navržená měřicí sestava

## 3.1 Návrh softwarového řešení

Výstupem aplikace je vypočtená zeměpisná pozice a orientace senzoru vůči zeměpisnému severu, tedy azimut. Tento výsledek je určen na základě znalosti změřené trajektorie Slunce na obloze, směrového vektoru gravitačního zrychlení, nadmořské výšky a předpokládané polohy Slunce. Údaje o směru gravitačního zrychlení, aktuálním čase a nadmořské výšce jsou předem známé hodnoty dodané externě z jiných systémů, například viz kap. 1.2. Nejprve je tedy nutné zaznamenat trajektorii Slunce v čase, touto problematikou se zabývá následující kapitola 3.1.1. Na základě takto změřené trajektorie je následně odhadnuta pozice, ze které bylo Slunce pozorováno, postupy takových výpočtů ukazuje kapitola 3.1.2. Celý postup ilustruje obr. 14.



Obrázek 14: Celkové blokové schéma měřicího a vyhodnocovacího algoritmu

## 3.1.1 Výpočet orientace senzoru vůči Slunci

Algoritmus na základě dat z kamery určí orientaci senzoru vůči zdroji záření. Tuto orientaci transformuje vzhledem k lokálnímu horizontu (vodorovná rovina vzhledem k Zemi) pro účely dalšího zpracování. Princip algoritmu je znázorněn na obr. 15. Obrazová data z kamery ve formě matice číselných hodnot, reprezentujících jednotlivé pixely, jsou zpracována algoritmem **detekce pozice** zdroje, který v obrazových datech identifikuje zdroj záření a určí jeho těžiště, v případě Slunce tedy střed. Na základě této informace je následně určena orientace senzoru vůči tomuto detekovanému zdroji jako relativní azimut a zenit. Následuje popis jednotlivých dílčích algoritmů.



Obrázek 15: Princip algoritmu pro výpočet orientace

## Algoritmus detekce pozice

Úkolem tohoto algoritmu je určit polohu zdroje ve formátu [x, y]. Jeho schéma je na obr. 16.



Obrázek 16: Princip algoritmu detekce zdroje v obraze

Nejprve je z RGB obrazu kamery vypočtena pouze jasová složka. Následně jsou blokem **filtrace** detekovány jasné objekty, a to pomocí prahování, které popisuje vztah

$$f(x_{ij}) = \begin{cases} 1, & x_{ij} \ge p \\ 0, & x_{ij} (1)$$

kde p je prahovací úroveň a  $x_{ij}$  je prvek matice pixelů. Na základě tohoto vztahu je tedy matice pixelů převedena na matici obsahující pouze hodnoty 0 a 1. Hodnoty 1 reprezentují světlé objekty. Poté jsou takto detekované jasné body klasifikovány do tříd podle toho, ke kterému objektu v obraze náleží. Blok **klasifikace objektů** tedy všechny nenulové prvky v matici  $x_{ij}$  přečísluje podle toho, jak spolu sousedí. V této nové matici je následně blokem **výběr objektu** vyhledán největší objekt, objekty ostatních tříd jsou vynulovány. Posledním krokem je **výpočet těžiště**. Nejjednodušším způsobem, jak určit těžiště kulatého objektu, je určit souřadnici y prostředního pixelu při procházení po řádcích a následně souřadnici x prostředního pixelu při procházení po sloupcích. Postup ilustruje obr. 17.



Obrázek 17: Princip určení těžiště

Tento způsob výpočtu spoléhá na symetrii objektu, tedy nedokáže správně určit těžiště částečně zakrytého zdroje záření. Proto je nutné zajistit, aby nedocházelo k chybným výpočtům těžiště. Toho lze dosáhnout jednoduchým testem. Ze souřadnice středu a znalosti obsahu světlé plochy v pixelech lze dopočítat předpokládané okrajové body, které jsou s jistou mírou tolerance následně testovány. Pokud testované body náleží detekovanému objektu, pak lze výpočet těžiště prohlásit za platný. V opačném případě je výpočet chybný. Vzhledem k symetrii Slunce postačí testovat dva body v každé ose. Matematicky lze tento test vyjádřit následujícím způsobem.

$$p = x_{i+R,j} \cdot x_{i-R,j} \cdot x_{i,j+R} \cdot x_{i,j-R}, \qquad (2)$$

kde ${\cal R}$ je určeno podle vztahu

$$R = (\sqrt{S/\pi}) \cdot \epsilon, \tag{3}$$

kde S je obsah detekovaného objektu v pixelech a  $\epsilon$  je koeficient povolené odchylky, tedy například  $\epsilon = 0.95$  platí zhruba pro normální rozdělení pravděpodobnosti s k = 2(koeficient rozšíření). Pokud p = 1, pak je výpočet těžiště platný.

### Algoritmus výpočtu orientace a transformace vektorů

Na základě detekované souřadnice středu snímaného zdroje záření ve tvaru  $[x_s, y_s]$  je dopočítán vektor směřující ke zdroji záření jako

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} - \mathbf{B},\tag{4}$$

kde bod **B** je detekovaný bod středu slunce doplněný o nulovou souřadnici z, tedy  $[x_s, y_s, 0]$ a bod **A** je souřadnice středu čočky, tedy  $[0, 0, -z_c]$ , kde  $z_c$  je ohnisková vzdálenost použitého objektivu v pixelech. Situaci popisuje obr. 18. Souřadnicový systém je volen dle platných ISO norem ISO 1151-1 a ISO 1151-2.



Obrázek 18: Princip určení vektoru dopadajícího záření

Z vektoru V vypočteného dle (4) snadno lze určit relativní azimut (azimut vzhledem k referenčnímu vektoru  $\mathbf{R}$  senzoru) a zenit následujícím způsobem. Relativní azimut je určen jako

$$a_R = \cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{V'} \cdot \mathbf{R}}{||\mathbf{V'}|| \cdot ||\mathbf{R}||}\right),\tag{5}$$

elevace jako

$$e = \sin^{-1}\left(\frac{V_3}{||\mathbf{V}||}\right),\tag{6}$$

a zenit jako

$$z = 90 - e, \tag{7}$$

kde V' je vektor prvních dvou složek původního vektoru V a R je referenční vektor R = [-1, 0], definující "sever senzoru".

Výše uvedené vztahy platí za předpokladu, že se snímací senzor nachází ve vodorovné pozici, tedy **směrový vektor gravitačního zrychlení** má tvar  $G = [0 \ 0 \ 1]$ . To ale nelze předpokládat, proto je třeba před samotnými výpočty (5), (6) a (7) provést ještě transformaci vektorů. Hodnota vektoru G je určena změřením náklonu senzoru v osách x a y buď ručně inklinometrem, nebo lépe vhodně umístěnými senzory náklonu. Případně můžou tyto hodnoty vycházet ze statického umístění senzoru. Vektor G je tedy vyjádřen v jiné podobě, jako úhly  $\alpha$  a  $\beta$ , reprezentující odklon od os x a z. Situaci popisuje následující obrázek 19. Rovina vymezená osami x a y je zároveň rovinou senzoru. Díky znalosti



Obrázek 19: Situace při nakloněném senzoru

těchto úhlů lze snadno provést transformaci původního změřeného a vypočteného vektoru pomocí vztahu

$$\mathbf{V_N} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{R_z} \cdot \mathbf{R_x},\tag{8}$$

kde  $\mathbf{R}_{\mathbf{z}}$  je rotační matice podle os<br/>yz a  $\mathbf{R}_{\mathbf{x}}$  rotační matice podle os<br/>yx. Ty mají tvar

$$\mathbf{R}_{\mathbf{z}} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0\\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$
(9)

$$\mathbf{R}_{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{pmatrix}.$$
 (10)

Výsledkem je nový vektor $\mathbf{V_N}$ již vztažený k rovině lokálního horizontu.

#### 3.1.2 Výpočet pozice a orientace senzoru

Výpočet pozice a orientace senzoru je již komplikovanější a především časově náročnější úloha. Vstupem algoritmu jsou data změřená výše popsaným postupem. Každý změřený bod, respektive dvojice relativní azimut - zenit je doplněna o časový údaj, datum a čas, ve kterém byla změřena. Časová posloupnost takových trojic tvoří **změřenou trajektorii**. Následuje blok **proložení křivkou**, který zajistí případnou opravu drobných výchylek a doplnění chybějících úseků vzniklých zacloněním výhledu senzoru. Výstupem tohoto bloku je několik bodů křivky, kterou byla změřená trajektorie proložena. Tyto body následně zpracuje vyhledávací algoritmus pro **výpočet orientace a pozice**. Výstupem tohoto algoritmu je již odhadnutá zeměpisná poloha a orientace senzoru vůči zeměpisnému severu. Blokové schéma algoritmu je na obr. 20. Následuje popis jednotlivých dílčích bloků.



Obrázek 20: Princip algoritmu pro výpočet pozice a orientace senzoru

### Proložení křivkou

Tento blok zajišťuje především korekci některých nedostatků použitého testovacího senzoru, viz kapitola 3.3. Zajišťuje doplnění chybějících úseků během měření, kdy byl výhled senzoru na Slunce zakryt, například vlivem oblačnosti. Dále se snaží minimalizovat chyby vzniklé otřesy. V neposlední řadě řeší chybu výpočtu azimutu ve chvíli, kdy se detekovaný střed Slunce pohybuje v blízkosti zenitu. V tuto chvíli díky malému rozlišení kamery neúměrně narůstá vliv zaokrouhlovací chyby při výpočtu těžiště na výsledný změřený azimut. K této situaci dochází v rovníkových oblastech. Proložení změřených údajů křivkou zajišťuje eliminaci výše popsaných nedostatků, ovšem za cenu chyby v řádu setin stupně (výsledek testování). V případě použití přesnějšího senzoru s vyšším rozlišením, navíc již pro účely měření v kosmickém prostoru, nikoliv pro testování na Zemi, je vhodné zajistit buď přesnější proložení, nebo data křivkou vůbec neprokládat. V tom případě je nutné vzniklé chyby detekovat a buď opravit, nebo chybná data nepoužívat k výpočtům.

Data jsou prokládána dvěma křivkami. Průběh azimutu v čase je proložen polynomiální křivkou stupně 1 s předpisem

$$p(t) = p_1 \cdot t + p_2, \tag{11}$$

kde t je čas v minutách a  $p_n$  jsou polynomiální koeficienty. Průběh zenitu, který může nabývat složitějších tvarů, je proložen polynomiální křivkou stupně 2 ve tvaru

$$p(t) = p_1 \cdot t^2 + p_2 \cdot t + p_3, \tag{12}$$

kde t je opět čas v minutách a  $p_n$  jsou opět polynomiální koeficienty.

Samotné proložení zajišťuje v MatLabu funkce *polyfit*. Kvůli snížení výpočetních nároků následujících algoritmů je výstupem pouze několik bodů ležících na křivce, nikoliv celá křivka. Dosavadní testování ukazuje, že tři body ležící v 10 %, 50 % a 90 % celkové délky křivky jsou dostačující a zároveň příliš nezatěžují následný výpočetní algoritmus.



Obrázek 21: Příklad proložení naměřených dat křivkou

#### Teoretická data - Solar Position Algorithm

Pro výpočet zeměpisné polohy a orientace senzoru vůči Zemi je klíčová znalost teoretické pozice Slunce při pozorování ze Země nebo její blízkosti. Tu zajišťuje externí algoritmus Solar Position Algorithm (SPA). Ten slouží k určení pozice Slunce na obloze (azimut a zenit) při znalosti zeměpisné pozice, nadmořské výšky, data a času. Existuje mnoho algoritmů pro výpočet polohy Slunce na obloze, ale tento vyniká časovou stabilitou a přesností. Jeho autoři uvádějí přesnost +/- 0,0003 stupně a oproti jiným algoritmům, které poskytují uspokojivé výsledky pouze po dobu několika desítek let a poté vyžadují korekce, algoritmus SPA má deklarovanou platnost od roku -2000 do roku 6000. Dokument, popisující tento algoritmus, není kvůli rozsahu součástí práce, ale je uveden v seznamu zdrojů pod číslem [12] a lze ho nalézt online na http://www.nrel.gov/midc/spa/ (k datu vydání práce).

#### Odhad pozice při znalosti orientace

Funkci popisující odchylku mezi změřenou pozicí Slunce a pozicí vypočtenou na základě algoritmu SPA lze vyjádřit jako

$$dif(X,Y) = |A_Z - A_T| + |Z_Z - Z_T|,$$
(13)

kde  $A_Z$  je změřený azimut,  $A_T$  je teoretický azimut,  $Z_Z$  změřený zenit a  $Z_T$  teoretický zenit. Pokud je tato odchylka vypočtena pro každý bod Zemského povrchu, výsledkem je průběh odchylky na obr. 22.



Obrázek 22: Mapování odchylky měřené a teoretické pozice Slunce pro celý Zemský povrch

Testovaným bodem je pozice 49.3052028 N, 14.1633511 E v jižních Cechách s nadmořskou výškou 378 m, to ale není podstatné vzhledem k symetrii Země, kterou algoritmus SPA předpokládá. Při omezení rozsahu zemského povrchu na sektor 20° x 20° je výsledkem mnohem jednodušší průběh na obr. 23.



Obrázek 23: Mapování odchylky měřené a teoretické pozice Slunce pro sektor  $20^{\circ} \ge 20^{\circ}$ 

Tento test lze provést s libovolnou přesností (s omezeními danými použitým výpočetním softwarem a hardwarem) a pro libovolný bod, vždy je výsledkem podobný graf s jednou klíčovou vlastností. Funkce popisující takto vykreslený graf v omezeném rozsahu 20° x 20° má jediné lokální minimum a je klesající nebo rostoucí. To je možné ověřit i jednoduchou úvahou, kdy lze dospět k závěru, že nad Zemským povrchem nelze najít takovou posloupnost zkoumaných bodů se stejnou nadmořskou výškou, aby hodnota odchylek spočítaných výše uvedeným způsobem byla konstantní.

Nejprve je tedy zajištěno nalezení sektoru, ve kterém se nachází globální minimum, které je hledaným bodem. Z obr. 22 je vidět, že pokud je povrch země rozdělen na dostatečný počet sektorů, cca 40, lze nalézt sektor, ve kterém se nachází hledané globální minimum. Ve středu každého sektoru je tedy vypočtena hodnota odchylky dle (13). Sektor s nejmenší odchylkou je označen jako cílový sektor.

Výše popsaný postup lze rekurzivně opět aplikovat na nalezený cílový sektor, dokud není dosaženo požadované přesnosti. To je ale výpočetně náročné. Vzhledem k vlastnostem funkce popisující odchylku v omezeném rozsahu lze s úspěchem použít obdobu tzv. **gradientního algoritmu**. Nejprve je zvolen počáteční bod, například ve středu prohledávaného sektoru. Pro všechny body v jeho okolí vzdálené o aktuální hodnotu kroku (viz dále) i pro bod, jehož okolí je prohledáváno, je vypočtena hodnota odchylky opět dle (13). Pokud algoritmus v okolí prohledávaného bodu nenalezne bod, který by měl nižší odchylku než je odchylka bodu, ve kterém se nachází, označí aktuální bod jako lokální minimum a ukončí se. Pokud nalezne bod s nižší odchylkou, přesune se do něj a opakuje stejný postup, dokud minimum nenalezne. Co se týče výše zmiňovaného kroku, ten není vhodný volit jako konstantní, mohlo by dojít k minutí správného bodu, pokud by byl krok moc velký. Naopak, při příliš nízkém kroku by byl algoritmus příliš pomalý. Je tedy vhodné volit proměnný krok, a to na základě odchylky v aktuálním bodě. Pro správné fungování algoritmu je nutné zajistit, aby vypočtený následující krok byl vždy menší, než skutečná vzdálenost k hledanému minimu. To je ale obtížné zajistit vzhledem ke způsobu výpočtu odchylky. Do velmi vysoké (i když stále nedostatečné) přesnosti funguje výpočet nového kroku jako polovinu aktuální odchylky. Po dosažení bodu, kdy tento vztah přestává fungovat (nelze najít okolní body s nižší odchylkou, ale nebylo dosaženo požadované přesnosti) je nový krok vypočten jako polovina předchozího. Tento postup se opakuje, dokud není dosaženo dostatečné přesnosti. I když není tento postup optimální, ukazuje se jako dostatečně rychlý a přesný. Zjednodušený vývojový diagram takového algoritmu je na obr. 24 a příklad ilustrující průběh jeho vyhledávaní na obr. 25.



Obrázek 24: Zjednodušený vývojový diagram gradientního algoritmu



Obrázek 25: Příklad vyhledávání gradientním algoritmem

### Odhad orientace

Algoritmus pro odhad pozice vychází ze znalosti orientace senzoru vůči Zemi. Ta je zatím neznámá a je třeba ji určit. To zajišťuje právě algoritmus pro odhad orientace. Využívá znalostí změřených poloh Slunce na obloze v čase, které jsou výstupem bloku **proložení křivkou**. Algoritmus prohledává všechny možné orientace senzoru, tedy interval orientace  $\langle 0^{\circ}, 360^{\circ} \rangle$ . Tuto prohledávanou množinu rozdělí do sektorů o stejném rozsahu. Pro každý sektor (resp. hodnotu orientace v jeho středu) a každý ze změřených bodů na vstupu je vypočtena pomocí algoritmu pro **odhad pozice** zeměpisná poloha. Sektor, ve kterém mají pozice vypočtené na základě všech bodů nejmenší směrodatnou odchylku, respektive součet směrodatné odchylky zeměpisné šířky a zeměpisné délky, je opět rozdělen na sektory a rekurzivně opět prohledán stejným postupem. Rekurze se opakuje, dokud není dosaženo požadované přesnosti. Tedy matematicky je nalezeno minimum funkce

$$dif(\mathbf{LO}_n, \mathbf{LA}_n) = \sigma(\mathbf{LO}_n) + \sigma(\mathbf{LA}_n), \tag{14}$$

kde  $\mathbf{LO}_n$  a  $\mathbf{LA}_n$ jsou vektory obsahující vypočtené zeměpisné délky a šířky pro daný sektorn.

## 3.2 Realizace v MatLabu

Na přiloženém CD je kompletní zdrojový kód pro řešení v MatLabu, ve 32 bitové verzi 2011b. Pro připojení ke kameře je ještě třeba nainstalovat Simple Video Camera Frame Grabber Toolkit dostupný na serveru MatLab File Exchange (k datu vydání této práce) a ze stejného serveru také stáhnout script algoritmu SPA, *sun\_position.m*, který je implementací algoritmu uvedeného v kapitole 3.1.2, autorem je Vincent Roy. V příloze 2 je snímek aplikace, zajišťující samotné měření, která průběžně zobrazuje získaná data. Samotné vyhodnocení dat již probíhá pouze textově do konzole. Následuje stručný popis základních funkcí zdrojového kódu.

#### 3.2.1 Stručný popis základních funkcí

results = Measure(runTime, g, utc) vrátí po uplynutí časového intervalu *runTime* strukturu obsahující naměřené polohy Slunce na obloze a polohy na stínítku snímače *results* v tomto časovém úseku. Vyžaduje znalost vektoru směřujícího do středu země vůči osám snímače g a časového pásma *utc*, ve kterém je informace o času (čas počítače).

points = processData(data, m, n, g, fl) vrátí tři body křivky, kterou byla proložena naměřená a transformovaná *data*. Údaje m a n jsou rozměry snímacího senzoru v pixelech, g je vektor náklonu senzoru a fl je ohnisková vzdálenost snímací kamery.

oap = determineOaP(data, sector, altitude, ex) odhadne pozici a orientaci snímacího senzoru *oap* (oap.position, oap.orientation) na základě několika údajů o poloze Slunce na obloze v čase. Vstupní *data* jsou ve tvaru data(n).position a data(n).time. Je prohledáván *sector*, vymezující prohledávanou oblast. Hledání probíhá v nadmořské výšce *altitude*. Probíhá s přesností *ex* rekurzivně. Pokud je ex = 0, pak probíhá bez rekurze. Rozsah *ex* je 0 - 1, přičemž čím nižší číslo, tím vyšší přesnost. Pro použití s testovacím senzorem postačuje hodnota 0,01.

## 3.3 Návrh a realizace hardwarového řešení

Pro základní testování slouží webkamera s rozlišením 352 x 288 pixelů. Její původně proměnná ohnisková vzdálenost byla zafixována na velikosti 660 pixelů (viz dále). Na objektiv kamery je přilepena dvojice optických filtrů - svářečských skel o tloušťce 2,5 mm a stupni ochrany 10. Celá tato sestava je umístěna do čtvercové konzole umožňující libovolný sklon senzoru. Schématický model zařízení je obr. 26 a fotografie na obr. 27. Několik dalších fotografií z průběhu konstrukce a měření je v příloze 1.



Obrázek 26: Schématický model testovacího zařízení



Obrázek 27: Testovací zařízení během měření

Vzhledem k provedení vykazuje toto testovací zařízení následující vlastnosti:

- 1. Ohnisková vzdálenost 660 pixelů byla stanovena měřením, navíc s dále uvedenými vlastnostmi senzoru, tedy její hodnota je jen přibližná.
- Náklon senzoru je měřen na povrchu optického filtru, ke kterému je přilepen objektiv. Chyba vzniklá tímto lepením byla odhadnuta na 0,1 stupně.
- 3. Náklon byl měřen inklinometrem s přesností 0,5 stupně.

Z výše uvedených vlastností, i když v některých případech za daných podmínek pouze odhadovaných, lze s jistotou udělat závěr, že takto zkonstruované měřicí zařízení může sloužit pouze pro prvotní testování. Očekávaná přesnost je v okruhu 100 km od místa měření.

## 3.4 Zhodnocení navržených postupů a zařízení

Co se týče algoritmu pro zpracování dat ze senzoru, funguje dostatečně rychle, na počítači s frekvencí procesoru 2,8 GHz dokáže vzorkovat obraz z kamery s frekvencí až 30 Hz, což je pro danou aplikaci více než dostačující. Problém nastává ve chvíli, kdy se detekovaný bod, tedy Slunce, blíží ke svému zenitu. V tuto chvíli totiž neúměrně vzrůstá vliv chyby určení azimutu způsobené malým rozlišením snímací kamery. Tato chyba je řešena proložením dat křivkou, nicméně jen do jisté přesnosti. V případě použití přesnějšího senzoru by již vliv této chyby nebyl zanedbatelný a současný stav vyhodnocovacích algoritmů by byl nevyhovující. Zde je jednoznačně prostor pro další modifikaci některých postupů.

Výpočet polohy a orientace funguje spolehlivě. Přesnost algoritmu je závislá pouze na použitém výpočetním prostředí, na hloubce rekurze a samozřejmě na kvalitě zaznamenaných dat. Jeho výpočetní a časová náročnost závisí také na hloubce rekurze, viz dále. Až do finální podoby prošel algoritmus několika změnami, jejichž cílem bylo především jeho zrychlení a zjednodušení. Nejradikálnější změnu, co se týče výpočetní náročnosti a potřebného času, přineslo nasazení gradientního algoritmu při určování pozice, důsledkem bylo téměř desetinásobné zrychlení.

Původní snaha převést zmiňovaný algoritmus SPA na algoritmus zajišťující opačnou funkci, tedy místo výpočtu polohy Slunce ze zeměpisné polohy výpočet zeměpisné polohy z polohy Slunce, ztroskotala především na nedostatku potřebné dokumentace. Bylo tedy nutné nasadit pomocné algoritmy, které za pomoci algoritmu SPA tento údaj získají oklikou. Otestováno jich bylo několik, ale nejúspěšnější byl právě výše zmiňovaný gradientní algoritmus.

Při rekurzivním prohledávání s nejmenším krokem testované orientace 0,01° a nejmenším prohledávaným sektorem o velikosti zhruba 1 m<sup>2</sup> trvá celé zpracování pro tři body (které jsou výstupem proložení křivkou a jejichž počet se zatím ukazuje jako dostatečný) na počítači z frekvencí procesoru 2,8 GHz zhruba 110 sekund. V porovnání s časem, potřebným pro změření trajektorie, je tato následná doba výpočtu téměř zanedbatelná. Během této doby se vytížení procesoru pohybuje téměř neustále na maximu. Tedy velmi zhruba lze spočítat, že bylo potřeba zhruba 300 miliard operací. Z tohoto údaje lze dopočítat v případě potřeby orientační dobu zpracování pro daný procesor. Paměťová náročnost algoritmů je minimální.

## 4 Analýza a testování

## 4.1 Testovací měření

S výše popsaným testovacím zařízením a popsanými algoritmy implementovanými v Mat-Labu, viz přiložené CD, bylo provedeno několik kompletních testovacích měření. Měření probí-hala během dubna a května 2013 vesměs v délkách okolo 2 hodin, což je maximální možná doba vzhledem k zornému úhlu senzoru necelých 30°. Všechna měření byla provedena z pozice 49.3052028 N, 14.1633511 E (Písek, jižní Čechy) s nadmořskou výškou 378 m. Zdrojem pro určení odchylky skutečné a změřené pozice byl server *www.mapy.cz*, což je vzhledem k přesnosti testovacího zařízení dostačující. Výčet úspěšných měření a naměřené hodnoty jsou v tabulce 2. Ze dvou důvodů tabulka neuvádí změřené orientace a jejich odchylky od skutečné orientace. Prvním důvodem je skutečnost, že vypočtená orientace souvisí s vypočtenou pozicí, pokud je správně určena pozice, je správně určena i orientace a naopak. Druhým důvodem je absence skutečné orientace, protože změření orientace s dostatečnou přesností nebylo s dostupným vybavením možné.

datum	délka [h:m]	změřená poz.	chyba poz. [km]
15. 4. 2013	1:51	49.649950 N 13.774932 E	47,36
17. 4. 2013	1:46	49.389523 N 14.200241 E	10,46
18. 4. 2013	1:59	49.320705 N 14.215212 E	$4,\!20$
18. 4. 2013	1:38	49.317064 N 13.837532 E	23,72
8. 5. 2013	1:38	49.473089 N 14.239815 E	21,62

Tabulka 2: Výčet provedených měření

Následuje bližší rozbor měření ze dne 14. 4. 2013. V příloze 2 je snímek měřicí aplikace právě z průběhu tohoto měření. Na obr. 28 jsou změřené průběhy relativního azimutu a zenitu. Časová osa je kvůli snadnějšímu programovému zpracování v minutách od začátku dne. Oba změřené průběhy vykazují mírné kolísání způsobené zejména parametry testovacího zařízení.

Důležitým parametrem senzoru je čas potřebný k získání spolehlivého údaje o poloze, tedy, jak dlouho je třeba snímat polohu Slunce, aby byl výsledek v mezích předpokládané odchylky. Pro teoretická data je tato doba rovna několika málo minutám, ale pro reálná data je tomu již jinak. Výsledkem průběžného zpracovávání naměřených dat a počítání



Obrázek 28: Změřené průběhy relativního azimutu a zenitu

odchylky vypočtené a skutečné pozice je průběh na obr. 29. V grafu jsou vyznačeny dva časy. Čas 77 minut je čas, za který bylo dosaženo konstantního výsledku (při zanedbání drobných odchylek vlivem zaokrouhlování atd.), čas 47 minut je čas, za který došlo k překročení hranice předpokládané odchylky pro danou konfiguraci, viz dále.



Obrázek 29: Výsledky průběžného vyhodnocování polohy během měření

## 4.2 Přesnost získaných údajů

Znalost přesnosti získaného výsledku je klíčovým parametrem každého měření. Určení přesnosti získaných výsledků je v tomto případě rozděleno do několika částí vzhledem k různým způsobům realizace jednotlivých dílčích úloh a také diametrálně odlišným předpokladům pro přesné výsledky v těchto dílčích úlohách. Vzhledem ke složitosti někte-rých použitých vztahů a postupů je aplikace klasických metod určení nejistoty měření nereálná. Na konkrétní výsledky lze samozřejmě alespoň v případě měření relativního azimutu a zenitu aplikovat klasický postup vycházející z parciálních derivací podle jednotlivých vstupních proměnných, ale v případě určení celkové přesnosti a spolehlivosti výsledku by bylo třeba tento postup provést pro každý reálně změřitelný bod, což by bylo obtížné. Proto následující určení přesnosti výpočtů vychází z několika provedených testů, kdy byla cyklicky, v rozumném rozsahu a s dostatečným rozlišením testovaným algoritmům podsouvána data zatížená chybou. Následně byla sledována odezva jejich výslupních hodnot na tato data. Následuje popis těchto testů a jejich výsledky.

#### 4.2.1 Přesnost změřeného relativního azimutu a zenitu

Vstupními veličinami algoritmu popsaného v podkapitole 3.1.2 jsou obraz z kamery, nadmořská výška a informace o naklonění senzoru v osách x a y. Nepřesnost měření může být způsobena následujícími faktory:

- 1. Změnou pozice senzoru a dalšími dlouhodobými vnějšími vlivy.
- 2. Otřesy a dalšími krátkodobými vnějšími vlivy.
- Chybným vyhodnocením těžiště snímaného objektu vlivem zakrytí výhledu senzoru či jeho nedostatečným rozlišením.
- 4. Chybným údajem o nadmořské výšce.
- 5. Chybnými údaji o náklonu senzoru.

Předpokladem je stabilní pozice senzoru, tedy první bod lze zanedbat. Druhý a třetí je řešen v případě testovacího senzoru proložením naměřených dat přímkou, viz kapitola 3.1.2, ve které je také nástin řešení pro případ použití mnohem přesnějšího senzoru. Tedy druhý a třetí bod podle druhu použitého senzoru lze pominout, nebo nahradit chybou vzniklou prokládáním. Vzhledem ke vzdálenosti Země od Slunce je vliv nadmořské výšky na změřený údaj hluboko pod hranicí přesnosti současných nejpřesnějších senzorů, a to i za předpokladu takové chyby v řádech kilometrů. Zbývá tedy určit vliv chybného údaje o náklonu senzoru na výsledný vypočtený relativní azimut a zenit. Dalším předpokladem je, že chyba náklonu je konstantní a má stejný vliv na všechny změřené hodnoty. Následující graf na obr. 30 je výsledkem testu vlivu chybně určeného náklonu v jednotlivých osách na vypočtený azimut a zenit. Úhel  $\alpha$  je úhel náklonu podle osy x a úhel  $\beta$  podle osy y. Nejmenší prohledávané čtverce měly stranu 1,5 metru (v nejhlubším stupni rekurze).



Obrázek 30: Výsledky testu vlivu chyby náklonů na vypočtený azimut a zenit

#### 4.2.2 Přesnost změřené zeměpisné polohy a orientace

Vstupními veličinami algoritmu pro finální výpočet polohy a orientace jsou již jen změřené body na trajektorii Slunce, tedy relativní azimut a zenit. Podobně jako v předchozím případě, následující graf na obr. 31 je výsledkem testu chybně změřených hodnot azimutu a zenitu na výslednou vypočtenou polohu, respektive na vzdálenost mezi vypočtenou a skutečnou polohou. Nejmenší krok prohledávání, co se týče rotace, byl 0,01°. Nejmenší prohledávané čtverce měly opět stranu 1,5 metru. Ze získaného grafu je vidět, že přesnost určené pozice ovlivňuje pouze chyba azimutu. Chybná hodnota zenitu, pokud je tato chyba konstantní pro všechny změřené body, viz předpoklady a závěry v předchozí kapitole, výsledek neovlivní. Pokud by chyba nebyla konstantní, byl by graf podobný jehlanu s prakticky totožnými hodnotami.



Obrázek 31: Výsledky testu vlivu chyby změřených dat na výslednou pozici

## 4.2.3 Celková přesnost

Celkové meze, ve kterých se pohybují získané údaje, lze určit na základě výše získaných grafů. Jejich rozlišení nedovoluje přímý odečet, proto následuje výčet důležitých hodnot.

- V grafu na obr. 30 je ve čtverci o rozsahu vstupní chyby 0,6° x 0,6° maximální hodnota chyby azimutu 0,685° a chyby zenitu 0,335°.
- Ve čtverci o rozsahu vstupní chyby 0,1° x 0,1° je maximální hodnota chyby azimutu 0,138° a chyby zenitu 0,069°.
- V grafu na obr. 31 je ve čtverci o rozsahu vstupní chyby 0,685° maximální hodnota chyby v pozici 72,709 km.
- Ve čtverci o rozsahu 0,138° je maximální hodnota chyby v pozici 14,958 km.
- Ve čtverci o rozsahu  $0,016^\circ$  je maximální hodnota chyby v pozici $0,978~{\rm km}.$

Dosazením výsledků (odečtením z grafu) testu měření relativního azimutu a zenitu do změřených hodnot testu určení orientace a polohy lze získat celkový přehled o dosažitelných výsledcích. Při zanedbání chyby vzniklé prokládáním křivkou, která je v řádu setin stupně (výsledek testování), je při použití testovacího zařízení a inklinometru s přesností 0,5° vypočtena pozice s maximální odchylkou 73 km, viz odečtené údaje výše. V případě uvažování přesnějšího určení náklonů, například inklinometrem s přesností 0,1°, lze dosáhnout vypočtené pozice s maximální odchylkou 16 km. Zde již chybu proložení křivkou nelze zanedbat, proto je výsledná chyba stanovena jako odmocnina součtu kvadrátů chyby získané z příslušných grafů a chyby způsobené proložením křivkou. Při uvažování použití současných (k datu vydání práce) nejpřesnějších slunečních senzorů, měřících pozici Slunce s přesností na jednotky úhlových minut (0,016°), lze dosáhnout maximální odchylky pouze 1 km. Přehled získaných výsledků je v tabulce 3. Údaj o chybě ve výpočtu orientace vychází z faktu, že maximální odchylka azimutu nebo zenitu na vzdálenosti 1 km je 0,023° (při pohybu kolmo na směr vektoru dopadajícího záření, jinak je vždy menší, údaj vychází z testování).

použitá konfigurace	max. odchylka poz.	max. odchylka or.	
	[km] (zaokr.)	$[^{\circ}]$ (zaokr.)	
testovací zařízení a inklinometr $\pm 0,5^\circ$	73	1,75	
testovací zařízení a inklinometr $\pm 0,1^\circ$	16	$0,\!35$	
nejpřesnější dostupné senzory	1	0,02	

Tabulka 3: Porovnání dosažitelných přesností

Pro test s teoretickými daty je výstupem přesná hodnota až do desetinného místa dle volby parametru rekurze *ex*. Je tedy zřejmé, že samotný algoritmus má rezervy, a pro přesnost je klíčová realizace samotného senzoru.

Je vhodné otestovat, zda po odstranění chyby vzniklé špatným určením náklonu bude výsledek odpovídat výše uvedeným výpočtům. Aplikací rotačních matic dle (9) a (10) uvedených v kapitole 3.1.1 na změřené vektory dopadajícího záření lze libovolně upravovat již získaná data. Po aplikaci těchto matic tak, aby maximální odchylka mezi teoretickým a změřeným průběhem rel. azimutu i zenitu byla 0,1°, a následném výpočtu polohy, je vzdálenost mezi skutečnou a změřenou pozicí 14,9 km. Tím je výsledek předchozích výpočtů ověřen. Při aplikaci rotačních matic tak, aby maximální odchylka byla 0,016°, a následném výpočtu polohy, je vzdálenost mezi skutečnou a vypočtenou polohou 1,4 km. Překročení předpokládané hodnoty o 400 m je pravděpodobně způsobeno nízkým rozlišením senzoru a proložením křivkou.

## 4.3 Zhodnocení dosažených výsledků

Měření ověřila praktickou funkčnost testovacího zařízení i výpočetních algoritmů. Testovací zařízení dosahuje lepších výsledků, než byl původní předpoklad. Z testu, který ilustruje obr. 29, plyne, že pro určení polohy s dostatečnou přesností (limitovanou parametry zařízení) je třeba Slunce snímat zhruba 45 minut, nicméně k ustálení vypočtených hodnot dojde zhruba po 80 minutách. Simulace prováděné na výpočetních algoritmech za účelem zjištění jejich přesnosti ukázaly, že algoritmy jsou dostatečně přesné pro použití se současnými nejpřesnějšími slunečními senzory, měřícími s přesností v řádech jednotek úhlových minut, a že výsledek je limitován především přesností použitých senzorů a inklinometrů, viz tabulka 3. V sestavě s testovacím zařízením lze dosáhnout přesnosti  $\pm 73$  km a  $\pm 1,75^{\circ}$ , v případě použití nejpřesnějších slunečních senzorů na trhu lze dosáhnout  $\pm 1$  km a  $\pm 0,02^{\circ}$ . Zásadní vliv na celkovou přesnost má určení náklonů senzoru, což bylo i prakticky ověřeno, viz konec předchozí kapitoly.

## 5 Závěr

Práce byla jednoznačně zajímavá a obohacující, i když často komplikovaná a náročná na představivost. Letošní rok 2013 zatím pozorovatelům Slunce příliš nepřeje, což se promítlo především do počtu testovacích měření. Úkolem bylo navrhnout algoritmy pro vyhodnocení pozice a orientace na základě měření trajektorie Slunce, dále pak tyto algoritmy vyzkoušet v simulacích a na reálných datech získaných zkonstruovaným testovacím senzorem. Navržené vyhodnocovací algoritmy pro výpočet pozice z naměřené trajektorie jsou funkční, dostatečně přesné a dostatečně rychlé pro použití v kombinaci se současnými nejpřesnějšími slunečními senzory. Jsou založeny na principech gradientního algoritmu a rekurze. Přesnost s teoretickými daty je v jednotkách metrů, co se týče určení zeměpisné pozice, a až v řádech úhlových sekund, co se týče orientace. V kombinaci s reálným senzorem, dosahujícím přesnosti v řádech jednotek úhlových minut, je přesnost algoritmu mnohem nižší, okolo jednoho kilometru a dvou setin stupně, ale to je způsobeno přesností slunečního senzoru. Výpočetní náročnost se pohybuje okolo 300 miliard operací potřebných k výpočtu pozice z naměřených dat, což na osobním počítači z frekvencí procesoru 2,8 GHz odpovídá času 110 sekund. To je v porovnání s časem potřebným ke změření dat (zhruba 45 minut) zanedbatelný časový interval. Algoritmus pro vyhodnocování dat z kamery vzorkuje dostatečně rychle, při použití procesoru opět s frekvencí 2,8 GHz dosahuje vzorkovací frekvence až 30 Hz. Testovací senzor byl zkonstruován a funguje. Přestože zdaleka nedosahuje přesnosti jako současné senzory dostupné na trhu, splnil požadavky na něj kladené, tedy poskytl potřebný prostor pro testování algoritmů a ověřil jejich funkčnost v reálném nasazení. Také díky němu byla odzkoušena různá filtrovací skla a nepřeberné množství lepidel při pokusech o spojení skla a plastu. Co se týče dalšího vývoje, bude třeba rozhodnout, zda pro finální řešení použít některý ze slunečních senzorů dostupných na trhu, či navrhnout a zkonstruovat vlastní. Dále bude třeba pro takový senzor navrhnout a zrealizovat vyhodnocovací obvod s mikroprocesorem a zajistit migraci kódu z vývojového prostředí v MatLabu do jazyka vhodného pro daný mikroprocesor, tedy pravděpodobně do jazyka C. Samozřejmostí pak bude testování a optimalizace kódu na dané platformě.

## Reference

- Dominik von Mangden, Development and Integration of a Sun Sensor for the Pico-Satellite MOVE.
- Y. Winetraub, S. Bitan, A. Heller, Attitude Determination Advanced Sun Sensors for Pico-satellites, 2011.
- [3] NASA, Spacecraft sun sensors (NASA-SP-8047) 1970.
- [4] Nicolas Blanc, CCD versus CMOS dostupné k 15.11.2012
   z http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/Blanc.pdf
- [5] Milan Šurkala, Fotomobily: snímací čipy CMOS vs. CCD dostupné k 15.11.2012 z http://www.digimanie.cz/art\_doc-67BCCD2DF7A9F53EC125763F0044663D.html
- [6] C.W. de Boom, J.A.P.Leijtens, L.M.H.v.Duivenbode, N van der Heiden, Micro Digital Sun Sensor: System in a Package, 0-7695-2189-4/04 © 2004 IEEE.
- [7] Carl Christian Liebe, MEMS Based Sun Sensor, 0-7803-6599-2/01 © 2008 IEEE.
- [8] Edgar Berry, Cosmic Rays, 1942.
- [9] Jiří Grygar, Kosmické záření o extrémních energiích, 2005.
- [10] ISSI, Cosmic Rays, 2003.
- [11] NASA, Solar superstorm dostupné k 18.1.2013 z http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/23oct\_superstorm/
- [12] I. Reda, A. Andreas, Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, NREL/TP-560-34302, 2008
- [13] Zdeněk Hurák, Mathematical modeling using Lagrange approach, 2012
- [14] Griffin M. D., French J. R., Space Vehicle Design, 2. Edition, ISBN:1-56347-539-1
- [15] M. Pěchouček, M. Rollo, Alternativní algoritmy prohledávání stavového prostoru, přednášky k předmětu Kybernetika a umělá inteligence, ČVUT FEL 2012
- [16] Moog, Inc., Fine Sun Sensor datasheet, 2013
- [17] Engineering Solutions from the Global Navigation Satellite System Community, webové stránky http://www.insidegnss.com/

# Příloha 1 - Několik fotografií

Vlevo nahoře: objektiv připevněný k filtru, vpravo nahoře: nosná konzole, prostřední řada: hotový testovací senzor, dolní řada: senzor při měření.



Obrázek 32: Několik fotografií senzoru

# Příloha 2 - Snímek měřicí aplikace v MatLabu

Měřicí aplikace spuštěná zavoláním funkce *Measure()* průběžně zobrazuje aktuální data z kamery, zaznamenanou trasu a zaznamenané průběhy relativního azimutu a zenitu. Změřená data náleží k měření dne 8. 5. 2013. Obraz z kamery má automaticky pozměněné rozměry tak, aby se vešel na obrazovku, což je patrné i z tvaru Slunce na snímku.



Obrázek 33: Snímek měřicí aplikace v MatLabu