

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VIRTUÁLNÍ MODEL POHYBU GEOSTACIONÁRNÍ DRUŽICE

Vypracoval: Ondřej Bruna

Vedoucí práce: Ing. Petr Hušek, PhD.

# 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 změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ondřej Bruna

# PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Petru Huškovi, PhD. za rady a připomínky k bakalářské práci a za jeho ochotu, se kterou se mnou problémy řešil. Také bych chtěl poděkovat všem kolegům ze školy, kteří mi poradili s dalšími technickými detaily ohledně virtuálního světa – konkrétně Bc. Pavlu Mlýnkovi za vysvětlení práce s VRMLPadem.

## ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje, jakým způsobem vytvářet jednoduché virtuální světy pomocí jazyka Virtual reality modeling language (VRML) a jak je propojovat se Simulinkem. V práci je popsáno vytvoření modelu geostacionární družice v jazyce VRML. V souvislosti s vytvářením modelu geostacionární družice se v práci vysvětlují také základní pojmy související se simulací oběhu tohoto tělesa kolem země – uvažují se různé druhy vnějších vlivů, chování družice bez regulátoru a s použitím regulace.

## ABSTRACT

Bachelor's project covers how to create simple virtual worlds using Virtual reality modeling language (VRML) and how to connect them with Simulink. This work describes creation of virtual model of geostationary satellite in VRML and it describes how geostationary satellite's orbit is influenced by disturbance. This work explains basic rules of spacecraft's orbit and its behavior on the orbit. Simulation is created with control system and without control system.

# OBSAH

1	Geostacionární družice .....	1
1.1	Úvod .....	1
1.2	Oběžné dráhy .....	1
1.3	Geostacionární dráha .....	2
2	Virtual Reality Modeling Language – VRML .....	4
2.1	Úvod .....	4
2.2	Popis jazyka VRML .....	4
2.3	Stromy ve VRML.....	8
2.4	Propojení VR a Simulinku .....	9
2.4.1	Virtual Reality Toolbox.....	9
2.4.2	Propojení VR světa a Toolboxu.....	10
2.4.3	Poznámky k propojení VR světa a SIMULINKu .....	11
3	Fyzikální stránka simulace .....	12
	Symbole použité v této kapitole .....	12
3.1	Úvod .....	13
3.2	Model orbity satelitu a Měsíce .....	13
3.3	Poruchy ideální geostacionární dráhy.....	14
3.4	Vlivy, které poruchy způsobují .....	15
4	Simulace a její zapojení .....	16
4.1	Úvod .....	16
4.2	Srovnání modelů s reálným světem.....	16
4.3	Simulace měsíce.....	18
4.4	Podoba objektů ve virtuálním světě .....	20
4.5	Simulace ideálního oběhu satelitu.....	21
4.6	Simulace oběhu reálného satelitu (satelitu, kde se uvažují poruchy dráhy letu) .....	23
5	Závěr .....	27
	Reference .....	28
	Použité programy.....	28
	Poznámka k přiloženému CD .....	29

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Orbyty podle vzdálenosti od Země. ....	2
Obrázek 2.1 : Židle vytvořená ve VRML. ....	7
Obrázek 2.2 : Strom židle ve VRML. ....	8
Obrázek 2.3 : Dialogové okno bloku VR sink se stromem VR světa ....	10
Obrázek 3.1 : Poruchy ideální geostacionární dráhy: a) posun vzhledem k východní a západní délce, b) změna úhlu roviny ekliptiky, c) změna excentricity vlivem slunečního záření.....	14
Obrázek 4. 1: Blok pro převod souřadnic kubických na sférické.....	16
Obrázek 4.2: Vnitřní zapojení bloku z obrázku 4.1. ....	17
Obrázek 4.3 : Porovnání kubických a sférických souřadnicových systémů. ....	17
Obrázek 4.4 : Blok The_Moon_Orbit_Simulator ....	18
Obrázek 4.5 : Zapojení bloku The_Moon_Orbit_Simulator ....	19
Obrázek 4.6 : Satelit ASTRA 2A. ....	20
Obrázek 4.7 : Satelit ASTRA 2A ve virtuální realitě. ....	20
Obrázek 4.8 : Zapojení pro simulaci ideální geostacionární dráhy.....	21
Obrázek 4.9 : Snímek ze simulace ideální orbity, boční pohled. ....	21
Obrázek 4.10: Pohled na scénu shora.....	22
Obrázek 4.11: Pohled na scénu ze satelitu. ....	22
Obrázek 4.12: Zapojení modelu pro simulaci reálného satelitu. ....	23
Obrázek 4.13 : Snímek ze simulace reálného satelitu, pohled ze strany. ....	24
Obrázek 4.14: View point SceneTopView. ....	24
Obrázek 4.15: View point SceneFarSideView.....	25
Obrázek 4.16: View point RealSatView. ....	25
Obrázek 4.17: View point SatView. ....	26
Obrázek 4.18: Souřadnice pohybu satelitu. ....	26

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 : Výšky oběžných drah z obrázku 1.1. ....	3
Tabulka 2.1 : Vlastnosti statických uzlů. ....	5
Tabulka 2.2 : Bloky Virtual Reality Toolboxu v SIMULINKu.....	9
Tabulka 4.1: Počáteční podmínky pro simulaci Měsíce ....	18

## POZNÁMKA K NOTACI POUŽITÉ V TEXTU

- Kurzíva* - kurzívou jsou psané proměnné
- Courier* - typem písma Courier s kurzívou jsou psány názvy souborů a klíčová slova v kódu virtuálního světa, termíny související se SIMULINKem – názvy bloků, vstupů a výstupů bloku
- Tučné** - tučným písmem jsou označovány vektory, nebo slouží ke zvýraznění části textu
- Courier* - typ písma Courier je použit pro části kódu

# 1 GEOSTACIONÁRNÍ DRUŽICE

## 1.1 Úvod

Tato kapitola má za cíl přiblížit význam geostacionárních družic v dnešní době a popsat jaké jsou jejich základní charakteristiky a vlastnosti. Není cílem rozebírat celou nauku o družicích, ale poskytnout úvodní přehledové informace o jejich činnosti, poloze, vlastnostech orbity a o dalších orbitách kolem Země.

Družice nabývají v posledních letech stále většího významu. Slouží k účelům výzkumným, telekomunikačním (IRIDIUM), meteorologickým (METEOSAT, NOAA) a dalším.

## 1.2 Oběžné dráhy

Satelity mohou obíhat Zemi na různých drahách podle úkolu, který je jim přidělen. Orbity se dělí podle mnoha vlastností a jejich základní dělení je podle:

- ohniska oběhu,
- výšky,
- inklinace,
- excentricity,
- synchronnosti,
- speciální orbity,
- pseudo – orbity.

Z hlediska této práce je nejdůležitější dělení podle výšky oběžné dráhy. Ta rozlišuje družice podle jejich vzdálenosti, ve které Zemi obíhají. Jednou z drah podle této klasifikace je i tzv. geostacionární dráha. Podle výšky oběhu se oběžné dráhy dělí na:

- LEO – Low Earth Orbit, nízká oběžná dráha,
- MEO – Medium Earth Orbit, střední oběžná dráha,
- GEO – High Earth Orbit, vysoká oběžná dráha.

Podrobné dělení včetně konkrétní polohy geostacionární dráhy uvádí Tabulka 1.1. Více o typech orbit může být nalezeno ve (Wikipedia, 2007).



## 1.3 Geostacionární dráha

Zvláštní skupinou těchto družic jsou ty, které obíhají na tzv. **geostacionární dráze**. Pohyb těchto družic bude tato práce **simulovat ve virtuální realitě**.

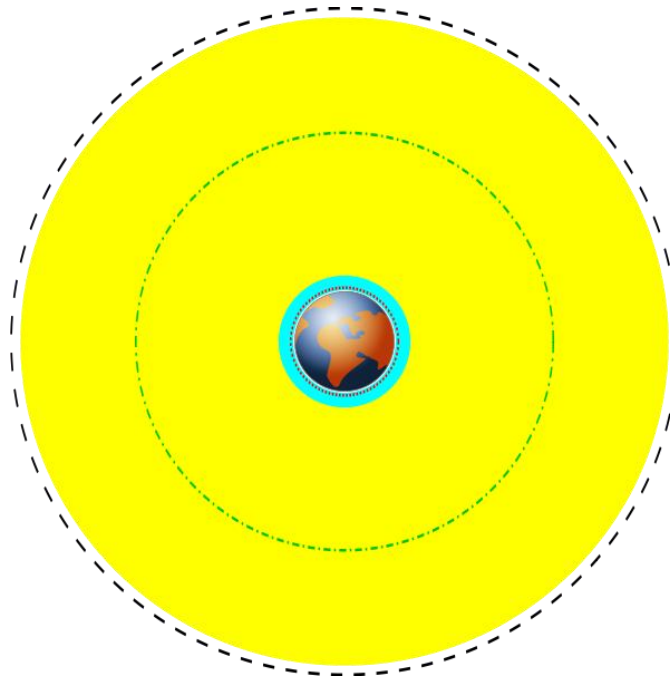
Geostacionární dráha má následující vlastnosti:

- je geosynchronní,
- je kruhová,
- leží v rovině rovníku (tedy družice na této dráze se pohybují přesně nad rovníkem).

Geosynchronní dráha je taková, která má stejnou dobu oběhu kolem Země jako je doba otočení Země kolem vlastní osy – tedy 23 hodin 56 minut a 4 sekundy. Geostacionární dráha je tedy zvláštní případ geosynchronní. Důsledkem oběhu satelitu po této dráze je, že se pozorovateli na Zemi jeví satelit stále na stejném místě.

V dnešní době se na geostacionární orbitě pohybuje několik desítek satelitů. Nejčastějšími satelity jsou meteorologické - viz (Johnston, 2008).

Následující obrázek orientačně ukazuje, kde se nachází geostacionární oběžná dráha v porovnání s ostatními orbitami. Konkrétní vzdálenosti orbit od země jsou popsány v Tabulce 1.1.



**Obrázek 1.1:** Orbity podle vzdálenosti od Země.

Zjistit aktuální polohy satelitů, které v současnosti obíhají Zemi a udělat si srovnání se zde uvedeným obrázkem lze v (NASA, 2007).

## 1 Geostacionární družice

Orbita	Barva v obrázku 1.1	Vzdálenost od povrchu [km]	Vzdálenost od středu Země [km]
Země (nejedná se o orbitu)	Obrázek Země	0	6370
Low Earth Orbit (LEO) – Nízká orbita	Tyrkysová	160 – 2000	6530 – 8370
Medium Earth Orbit (MEO) – střední orbita	Žlutá	2000 – 34 780	8 370 – 41 150
Mezinárodní kosmická stanice	Červená tečkovaná	500	6 870
GPS satelity	Zelená čerchovaná	20 230	26 600
Geostacionární orbita	Černá čárkovaná	35 794	42 164

Tabulka 1.1 : Výšky oběžných drah z obrázku 1.1.

Dalším typem oběžné dráhy, na které obíhají družice, jsou vysoce eliptické dráhy – tzv. Molnya orbit – podle prvního ruského satelitu Molnya, který po této dráze obíhal. Posledním odpočinkem pro družice je speciální orbita – tzv. Graveyard Orbit, která se nachází jen pár stovek km za orbitou geostacionární a jsou na ni poslány družice na konci svého života, aby na své stávající dráze neohrožovaly funkční družice.

Družice na geostacionární dráze slouží k účelům snímkování zemského povrchu (jako např. METEOSAT7 a METEOSAT8) nebo k zajištění televizního či rádiového vysílání (ASTRA2A). Doba pobytu geostacionárních satelitů se pohybuje v jednotkách let. Průměrně se jedná o dobu více než 10 let. Po této době je snaha satelit nahradit novým typem a starý přesunout na Graveyard orbit.

Satelity jsou vybaveny speciálními zařízeními pro sledování povrchu Země podle účelu, ke kterému mají soužit. Může se jednat o barevné fotografie, černobílé, IR spektrum, tepelné spektrum, sledování mlh apod. Samozřejmě jsou vybaveny zařízením pro komunikaci se Zemí.

## 2 VIRTUAL REALITY MODELING LANGUAGE – VRML

### 2.1 Úvod

Virtuální realita je velice užitečný nástroj pro přiblížení problému ve stádiu realizace a umožňuje utvořit si komplexní pohled na řešenou situaci. Je to odvětví, které má velkou perspektivu v průmyslových aplikacích, kde může sloužit pro plánování a pro vývoj nových produktů a umožní odhalit případné problémy ještě před konstrukcí prvního prototypu. S velkým úspěchem by je šlo využít i ve školství, kde by simulace virtuální reality mohly výrazně přispět k pochopení učiva probírané látky.

Jazyk VRML byl v práci použit na vytvoření scény virtuální reality (VR). Tato kapitola popisuje, jak se s jazykem VRML pracuje a jakým způsobem se virtuální svět spojuje se SIMULINKem, který produkuje pro simulaci samotná data.

Jsou zde také zmíněny aplikace nutné pro správný běh programu a pro vytvoření světa VR.

### 2.2 Popis jazyka VRML

VRML je standardem pro popis trojrozměrných scén včetně světelného nasvícení scény a zvukových efektů. Umožňuje zobrazení objektů v internetovém prohlížeči (Internet Explorer, Opera, Firefox) se zvláštním rozšířením, které realizuje zobrazení světů vytvořených ve VRML (například Cortona). Svět vytvořený ve VRML se propojuje se SIMULINKem.

VRML je ve své podstatě typ programovacího jazyka, který pracuje se zobrazovanou scénou, jako se stromem objektů. Jedná se v podstatě o textový soubor s příponou *\*.wrl* (wrl = world = svět). Tento soubor se standardně spouští v internetových prohlížečích.

Programování ve VRML umožňuje i použití *javascriptu* pro potřeby simulovaného světa.

Scéna se skládá z několika uzlů, které jsou vůči sobě umístěny v hierarchickém stromu. Uzly se vytváří klíčovými slovy jazyka VRML. U každého uzlu lze nastavit jeho parametry od tvaru a velikosti až po barvu a jiné charakteristické rysy. Například u uzlu *box* nelze definovat poloměr *radius*. Křehle totiž nemůže mít poloměr. Ten lze definovat pouze v případě koule – uzlu *sphere* (Mlýnek, 2006).

## 2 Virtual Reality Modeling Language – VRML

Uzly se dělí na statické, které popisují vlastnosti objektu ve scéně, a na dynamické, které slouží ke generování událostí, které jsou schopny měnit stávající vlastnosti statických objektů – např. posunutí, velikost, barva.

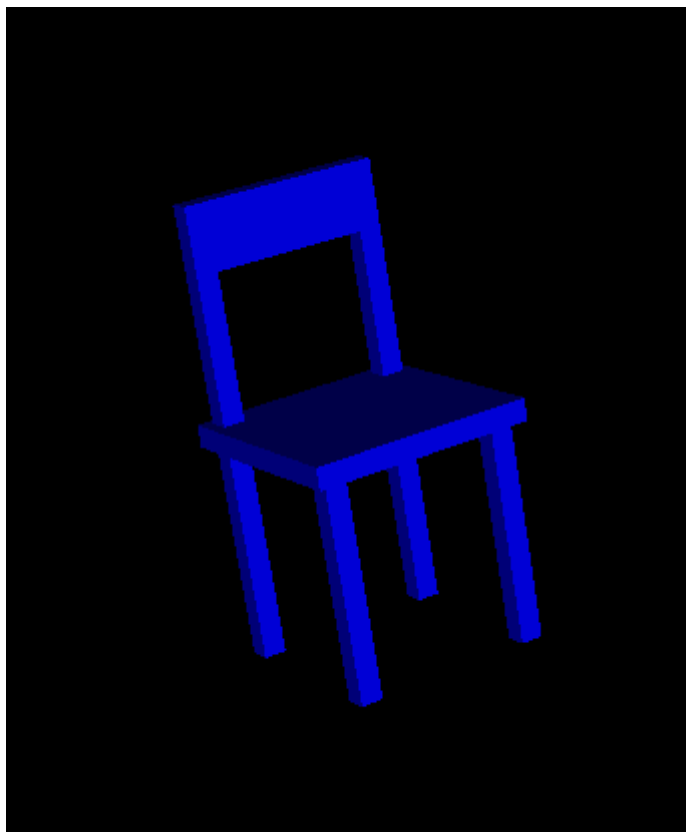
<b>Typ</b>	<b>Klíčová slova</b>	<b>Popis</b>
<b>Geometrické</b>	<i>Box, Sphere, Cone, IndexedLineSet</i>	Charakterizuje tvar, polygony, body, spojnice
<b>Velikosti a polohy</b>	<i>Scale, Rotation, Translation</i>	Posunutí, relativní vzdálenost,
<b>Vzhledu</b>	<i>DiffuseColor, Texture, Material</i>	Nastavuje material, texturu, lesk, barvu
<b>Světla a zvuku</b>	<i>Sound, ViewPoint, LightPoint</i>	Nasvícení scény a objektu, zvukové efekty
<b>Speciální</b>	<i>proximitySensor, TouchSensor</i>	Použití pro interakci s uživatelem
<b>Skupinové</b>	<i>Group</i>	Seskupení více uzlů do jednoho celku

Tabulka 2.1 : Vlastnosti statických uzlů.

## 2 Virtual Reality Modeling Language – VRML

Příklad použití jazyka VRML pro vytvoření jednoduchého modelu židle:

```
#VRML V2.0 utf8
NavigationInfo {
  type "EXAMINE"
}
DEF zidle Transform {
  children [
    Transform {
      translation -0.4 -0.5 -0.4
      children [
        DEF latka Shape {
          appearance DEF modra Appearance {
            material Material {
              diffuseColor 0 0 1
            }
          }
          geometry Box {
            size 0.1 1 0.1
          }
        }
      ]
    }
    Transform {
      translation 0 0 0
      children [
        DEF sedatko Shape {
          geometry Box {
            size 1 0.1 1
          }
          appearance USE modra
        }
      ]
    }
    Transform {
      translation 0.4 -0.5 -0.4
      children [
        USE latka
      ]
    }
    Transform {
      translation 0.4 -0.5 0.4
      children [
        USE latka
      ]
    }
    Transform {
      translation -0.4 -0.5 0.4
      children [
        USE latka
      ]
    }
    Transform {
      translation 0.4 0.5 0.4
      children [
        USE latka
      ]
    }
    Transform {
      translation 0.4 0.5 -0.4
      children [
        USE latka
      ]
    }
    Transform {
      translation 0.4 0.85 0
      children [
        DEF operatko Shape {
          geometry Box {
            size 0.1 0.3 0.8
          }
          appearance USE modra
        }
      ]
    }
  ]
}
```



Obrázek 2.1 : Židle vytvořená ve VRML.

Na VRML kódu židle je možné popsat, jakým způsobem se vytváří virtuální scény. Jako první začíná kód hlavičkou, která slouží k určení použitého kódování a verze VRML. Po této řádce začíná samotný program. V této úrovni se definují kořenové uzly. U modelu židle slouží první část kódu *NavigationInfo* k nastavení typu prohlížení vytvořeného objektu. *EXAMINE* má za následek, že objektem lze otáčet kolem jednotlivých os *X*, *Y*, *Z*. Po nastavení typu prohlížení objektu následuje samotný popis scény.

Židle je vytvořena ze tří různých objektů, které byly pro jednoduchost práce pojmenovány. To je užitečné, pokud se s objekty ve scéně pracuje opakovaně. Pak stačí objekt definovat pouze jednou a dále už jeho definici pouze využívat. Tímto způsobem je vytvořený objekt **laťka**, ze kterého má židle nohy, **opěrátko** a **sedátko**.

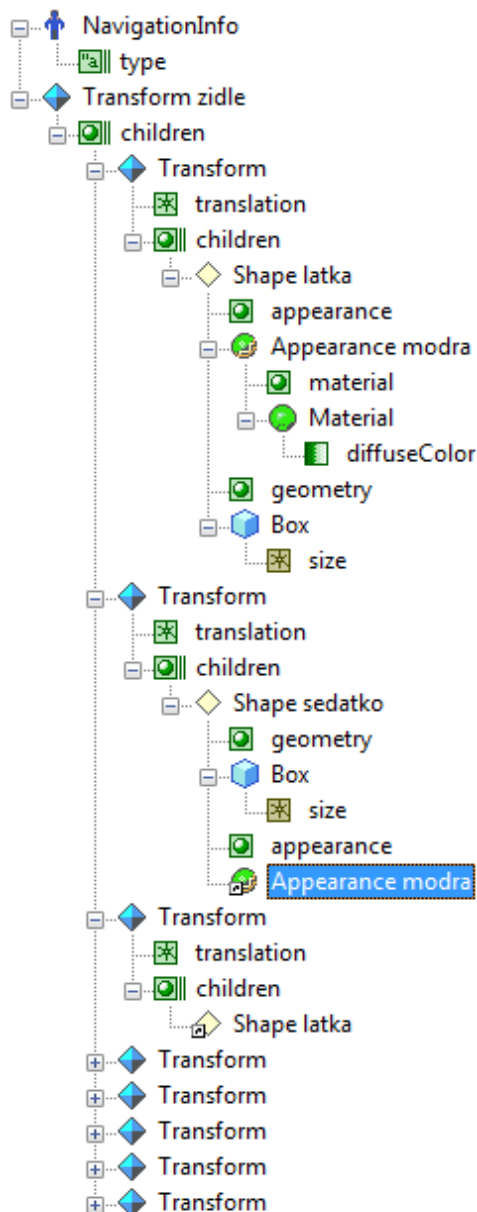
Každému objektu v rámci scény je dána poloha. Tato poloha se nastavuje pomocí příkazu *translation*. Za ním následuje umístění objektu v rámci scény. V případě že je objekt potomkem jiného uzlu, vztahuje se poloha tohoto dceřiného objektu k poloze hlavního. Momentálně je model židle umístěn v počátku systému souřadnic. Pokud Změníme polohu kořenového uzlu, automaticky se s ním posunou i ostatní potomci – tedy židle se posune jako celek a není nutné upravovat jednotlivé objekty samostatně.

Všechny objekty jsou umístěny v jednom uzlu Transform pojmenovaném židle. Tyto objekty jsou vzájemně umístěny ve stromu, který je uveden v následujícím obrázku 2.2.

## 2.3 Stromy ve VRML

Scéna VR je popsána vlastním kódem a stromem. Strom je užitečný pro orientaci v již vytvořeném světě. Uspadňuje hledání potřebných uzlů v kódu a je dobrou pomůckou pro zařazení jednotlivých dětí a rodičů stromu. Orientace v kódu je často nepřehledná. Pomocí stromu je mnohem snazší. Lze si snáze představit, jakým způsobem bude ovlivněn kód programu a hlavně jaké uzly budou změnou poznamenány.

Z následujícího obrázku 2.2 je zřejmá struktura programu židle ve virtuální realitě.


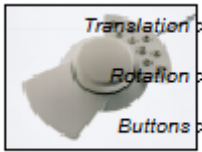
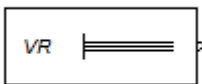
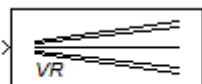
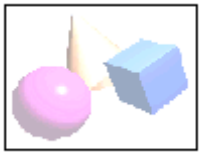
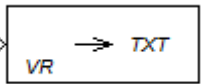


Obrázek 2.2 : Strom židle ve VRML.

## 2.4 Propojení VR a Simulinku

### 2.4.1 Virtual Reality Toolbox

V Simulinku existuje **Virtual Reality Toolbox** s nástroji pro propojení virtuální reality ve VRML a matematického modelu v Simulinku. Tato kapitola popíše nástroje SIMULINKu.

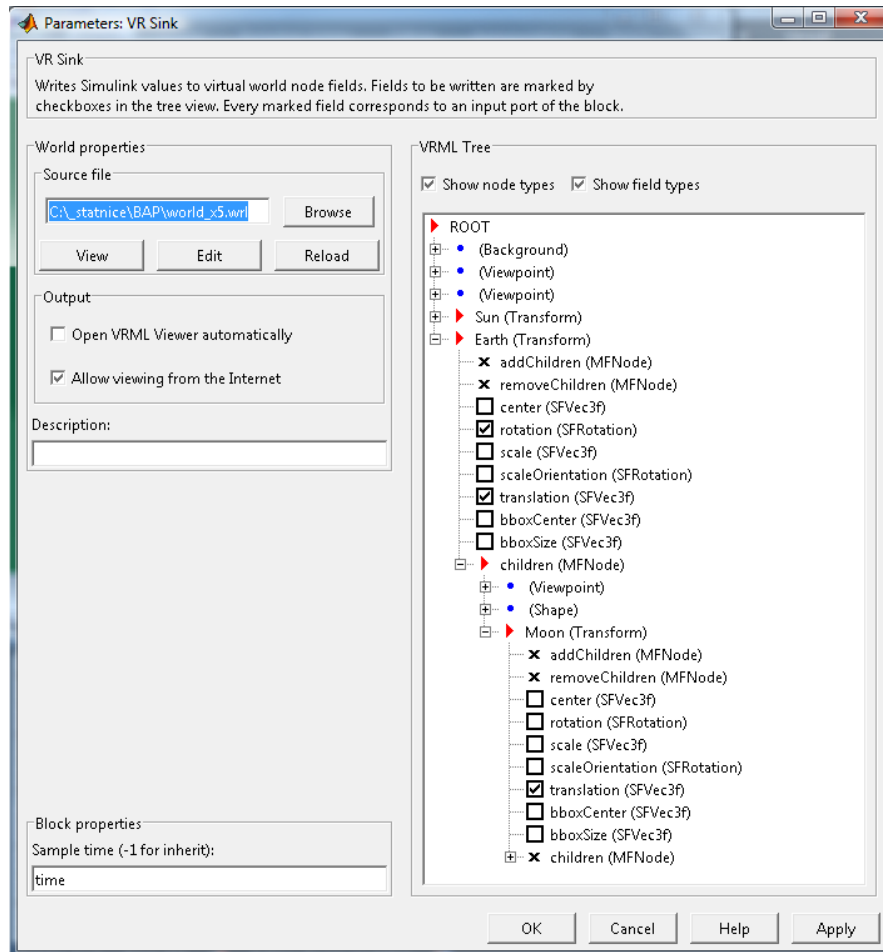
Blok	Popis
 <p>Joystick Input</p>	<p>Tento blok umožňuje ovládat svět vytvořený ve virtuální realitě joystickem. Joystick se musí před spuštěním simulace připojit. Funguje jako jakýkoliv jiný vstupní blok z knihovny <i>sources</i>. Jeho výstup je typu double a udává informace o poloze páky a stisknutí tlačítek.</p>
 <p>Magellan Space Mouse</p>	<p>Vstupní blok pro <i>Magellan Space Mouse</i>. Funkce stejná jako u joysticku, ale má více ovládacích prvků.</p>
 <p>VR Placeholder</p>	<p><i>VR place holder</i> se používá, jestliže je nutné zabránit změnám hodnot některých veličin ve virtuální realitě (VR). Hodnota výstupu tohoto bloku je virtuální realitou interpretována jako nespecifikovaná, takže hodnota této veličiny ve VR zůstane stejná.</p>
 <p>VR Signal Expander</p>	<p>Blok <i>VR signal expander</i> se používá pro rozšíření vektoru na vstupu na vektor o dané šířce na výstupu. Je možné nastavit, jaké signály ze vstupu se mají přenášet na jaké signály výstupu.</p>
 <p>VR Sink</p>	<p>Tento blok představuje samotnou virtuální realitu naprogramovanou ve VRML. Má různé vstupy, které definuje uživatel v parametrech bloku. Tam se zobrazí také strom virtuální reality a pomocí jednoduchých checkboxů si uživatel zvolí, které vstupy si přeje zpřístupnit v prostředí simulinku.</p>
 <p>VR Text Output</p>	<p>Slouží textovému zobrazení vstupních dat ve virtuální realitě například prostřednictvím HUD textu.</p>

Tabulka 2.2 : Bloky Virtual Reality Toolboxu v SIMULINKu.



## 2.4.2 Propojení VR světa a Toolboxu

Pro načtení světa do modulu VR sink je nutné nejdřív vybrat správnou cestu k souboru se světem. Po té je svět načten. Pokud se načel správně, v dialogovém okně je vidět strom popisující scénu. V tomto stromě si je možnost zkontrolovat strukturu světa a vybrat, které proměnné mají být přístupné simulinku. Vzhled okna je na následujícím obrázku.



Obrázek 2.3 : Dialogové okno bloku VR sink se stromem VR světa

V parametrech bloku na předcházejícím obrázku je vidět, jak může struktura virtuálního světa vypadat. Zde jde o model simulující pohyb Země a Měsíce kolem Slunce. V pravé části dialogového okna je strom scény. Každá proměnná, která je potenciálně přístupná ze simulinku, má na svém řádku checkbox. Pokud je checkbox zaškrtnut, značí to jeho zpřístupnění s v simulinku. V tomto případě je nastaveno zpřístupnění rotace Země a pozice Země vzhledem k počátku souřadného systému a relativní pozice Měsíce vzhledem k Zemi.

### 2.4.3 Poznámky k propojení VR světa a SIMULINKu

Pro realizaci virtuálního světa v prostředí Simulinku je potřebný inicializační soubor *Init.m*, který nastaví všechny potřebné konstanty a parametry simulace.

V levé spodní části dialogového okna je položka *Sample time*. Tato je velice důležitá pro parametry simulace, protože ovlivňuje, jakou rychlostí bude simulace probíhat – tedy jak rychle se budou objekty ve scéně pohybovat. Může se totiž při malé velikosti stát, že pohyb objektů bude tak pomalý, že nebude rozlišitelný. Proto je místo číselné hodnoty uvedena proměnná *time*, kterou je možno změnit v inicializačním souboru.

S rychlostí simulace také souvisí nastavení řešitele diferenciálních rovnic v okně SIMULATION|CONFIGURATION PARAMETERS|SOLVER. Empiricky bylo zjištěno, že simulace probíhá rychleji, pokud je nastaven pevný krok simulace. V případě proměnného kroku trvají výpočty výrazně delší dobu.

### 3 FYZIKÁLNÍ STRÁNKA SIMULACE

#### Symbolsy použité v této kapitole

$\mathbf{r}[m]$	- vektor pohybu družice po orbitu
$\varphi[rad]$	- úhel rotace kolem tělesa
$\mu \left[ \frac{m^3}{s^2} \right]$	- součin univerzální gravitační konstanty G a hmotnosti Země
$r[m]$	- modul pohybového vektoru $ \mathbf{r} $
$v_r \left[ \frac{m}{s} \right]$	- poruchy působící na vektor pohybu družice
$v_\varphi \left[ \frac{rad}{s} \right]$	- poruchy působící na úhel rotace družice
$p_r \left[ \frac{kg \cdot m}{s} \right]$	- hybnost planety v daném radiu
$p_\varphi \left[ \frac{kg \cdot rad}{s} \right]$	- hybnost planety ve směru obíhání planety
$p_\vartheta \left[ \frac{kg \cdot rad}{s} \right]$	- hybnost planety ve směru odklonu od roviny ekliptiky
$m[kg]$	- hmotnost Měsíce
$M[kg]$	- hmotnost Země
$\vartheta[rad]$	- úhel odklonu od roviny ekliptiky
$G \left[ \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \right]$	- univerzální gravitační konstanta $6,673 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$
$R_E[m]$	- rovníkový poloměr Země
$\lambda[rad]$	- zeměpisná šířka
$J_2[-]$	- koeficient kulatosti Země, $J_2 = 0.00108263$
$\Phi \left[ \frac{m^2}{s^2} \right]$	- gravitační potenciál

### 3.1 Úvod

Tato práce se opírá a simulaci vytvořenou již dříve pro prostředí MATLABu a SIMULINKu jako diplomovou práci od Kleanthise Neokleouse. Jejich výsledků je použito k simulování pohybu těles ve virtuální realitě. Níže uvedené údaje popisují, jak byla úloha řešena a co vše bylo při návrhu uvažováno. Není zde prostor pro kompletní rozbor této problematiky, ale ten je k dispozici v (Neokleous, 2007).

### 3.2 Model orbity satelitu a Měsíce

Pokud by na družici nepůsobily žádné rušivé vlivy, dala by se její dráha popsat následující rovnicí:

$$\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \cdot \dot{\varphi}^2 - \frac{\mu}{r^2} \quad (1)$$

$$\ddot{\varphi} = 0 \quad (2)$$

První rovnice popisuje pohybový vektor, jedná se o diferenciální rovnici, jejímž řešením je geostacionární orbita družice. Druhá rovnice sděluje, že rychlost oběhu kolem planety je konstantní. Na geostacionární dráze je tato rychlost  $3,1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Takto je také generována oběžná dráha pro vodící bod. V případě kdy uvažujeme rušení, rovnice přejdou do tvaru:

$$\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \cdot \dot{\varphi}^2 - \frac{\mu}{r^2} + \mathbf{v}_r \quad (3)$$

$$\ddot{\varphi} = -\frac{2 \cdot \dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\varphi}}{r} + \frac{1}{r} \cdot v_\varphi \quad (4)$$

Kde  $v_r$  a  $v_\varphi$  představují poruchy. Vzorce pro výpočet jednotlivých typů rušení a podrobnější odvození je možné nalézt v (Sidi, 2005).

Simulace oběhu Měsíce kolem Země je prováděna prostřednictvím rovnic

$$\dot{r} = \frac{p_r}{m} \quad (5)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{p_\varphi}{m \cdot r^2 \cdot (\sin \vartheta)^2} \quad (6)$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{p_\vartheta}{m \cdot r^2} \quad (7)$$

$$\dot{p}_\vartheta = \frac{p_\varphi^2 \cdot \cos \vartheta}{m \cdot r^2 \cdot (\sin \vartheta)^3} \quad (8)$$

$$\dot{p}_r = \frac{p_\vartheta^2}{m \cdot r^3} + \frac{p_\varphi^2}{m \cdot r^3 \cdot (\sin \vartheta)^2} - \frac{G \cdot m \cdot M}{r^2} \quad (9)$$

$$\dot{p}_\varphi = 0 \quad (10)$$

Předcházející rovnice jsou rovnicemi pohybu v gravitačním poli v prostoru. Pohyb popisují prostřednictvím sférických souřadnic a zobecněných hybností. Odvození těchto rovnic lze provést podle (Kulhánek, 2008), kde je popsán podobný případ pro oběh tělesa v gravitačním poli v rovině. Tyto rovnice jsou v SIMULINKu prováděny blokem *The\_Moon\_Orbit\_Simulator*, který slouží pro výpočet oběhu Měsíce kolem Země.

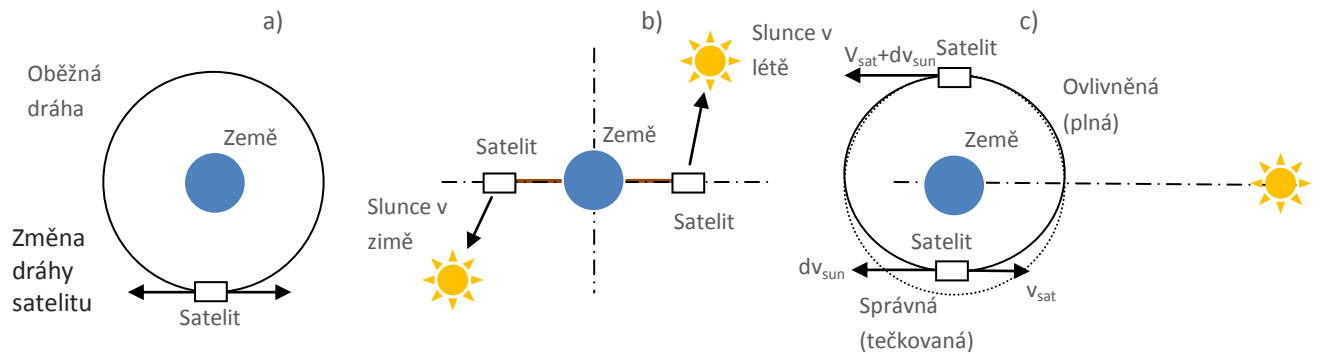
Vnitřní stavba tohoto bloku je ukázána na následující kapitole v obrázku 4.5.

### 3.3 Poruchy ideální geostacionární dráhy

Geostacionární družice obíhá po dráze, která byla popsána v předchozích kapitolách. Zde se rozebere podstata fyzikálního modelu a veličin, které na družici působí a mohou ovlivnit její oběh po oběžné dráze. Družice se snaží udržet svou polohu na požadovaných souřadnicích. Snaží se sledovat ideální oběžnou dráhu. Sledování této ideální dráhy je však ovlivňováno vnějším rušením, které satelit od dráhy vzdaluje. Všechny podrobnější informace o typech rušení a jejich matematickém vyjádření lze nalézt v (Neokleous, 2007) nebo v (Sidi, 2005), kde je celá problematika probrána do detailu nejen u geostacionárních těles. V této kapitole budou stručně uvedeny informace o jednotlivých typech a jejich konečné použití v simulaci.

Hlavní poruchy dráhy jsou:

- změna polohy satelitu vzhledem východní/západní délce,
- změna excentricity oběžné dráhy,
- změna úhlu roviny ekliptiky.



Obrázek 3.1 : Poruchy ideální geostacionární dráhy: a) posun vzhledem k východní a západní délce, b) změna úhlu roviny ekliptiky, c) změna excentricity vlivem slunečního záření.

Obrázek 3.1 popisuje poruchy oběžné dráhy satelitu. Tyto informace byly převzaty z (Neokleous, 2007). Podrobněji jsou popsány v kapitole 3.3.

### 3.4 Vlivy, které poruchy způsobují

Poruchy dráhy popsané v předchozí kapitole mají své původce popsány na následujících řádcích. Poruchy jsou převážně způsobeny:

- různá přitažlivost Země nad jiným místem povrchu (různá hustota povrchu), nekulatost,
- přitažlivost velkých kosmických těles,
- slunečním zářením od x – paprsků až po rádiové vlny, sluneční vítr
- odpor prostředí (atmosférický odpor).

První bod se projevuje takzvaným  $J_2$  efektem. Různá přitažlivost zemského povrchu je způsobena různou hustotou materiálů na Zemi, a tedy jinou hmotností jednotlivých území. Zemi by bylo možné modelovat koulí s hmotností  $M$ , ale docházelo by tím k odchylkám ve výpočtu. Ideálně se tento problém zemské přitažlivosti řeší rozložením Země na jednotlivé elementární hmotnosti a počítá se přitažlivá síla družice ke každé této elementární hmotnosti. Vypočítané síly se pak sečtou a získá se tak celková přitažlivost. Gravitační potenciál planety se vyjadřuje následujícím vzorcem:

$$\Phi = \frac{\mu}{r} \left[ 1 - J_2 \cdot \left( \frac{R_E}{r} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (3 \cdot \sin^2 \lambda - 1) \right] \quad (11)$$

Zde uvedený koeficient  $J_2$  představuje vliv tzv.  $J_2$  efektu, který udává, jak se zkresluje přitažlivost vlivem tvaru Země.  $J_2 = 0.00108263$  podle (Neokleous, 2007).

Dalším vlivem, který významně ovlivňuje dráhu satelitu, je přitažlivost dalších kosmických těles jako jsou planety a Slunce. Ve zpracovávaném modelu je uvažován vliv sluneční přitažlivosti a vliv přitažlivosti Měsíce. Ten má na oběžnou dráhu satelitu vliv největší, protože to je nejbližší těleso s velkou hmotností a satelit obíhá Zemi v poměrně velké vzdálenosti, čímž vliv Měsíce narůstá. Slunce satelit také ovlivňuje a ve výpočtech je zohledněno.

Slunce ovlivňuje satelit nejen svou přitažlivostí, ale také dalšími vlivy jako je sluneční záření a sluneční vítr. Sluneční vítr je tvořen ionizovanými částicemi, které naráží do zařízení na oběžné dráze a tím na něj působí tlak. Na tuto skutečnost je brán zřetel a v simulaci je zahrnuta.

Poslední zdroj poruch oběžné dráhy je způsobován odporem prostředí a je relevantní hlavně na nižších oběžných drahách, kde je možné přijít do kontaktu s horními vrstvami atmosféry a tím k zbrzdění družice. Vzhledem k vzdálenosti, ve které ale geostacionární satelity obíhají (42 164km), není tento typ poruch uvažován.

Všechny výše popsané rušivé vlivy se mění v závislosti na čase. Například družice, která se pohybuje na své orbitě, je v několika fázích dne různě vzdálená od měsíce a tím se také mění síla, kterou Měsíc na družici působí. Stejně tak je jiný vliv slunečního záření, když se družice pohybuje proti němu nebo je její pohyb se směrem pohybu záření souhlasný.

## 4 SIMULACE A JEJÍ ZAPOJENÍ

### 4.1 Úvod

Simulace se opírala o vypracovaný model sil působících na satelit. Propojení s virtuálním světem vyžadovalo vyřešení otázky měřítka – protože simulace s reálnými vzdálenostmi a velikostmi v prostředí virtuální reality by byla příliš objemná a náročná. V následující kapitole bude popsán způsob propojení VR a SIMULINKu.

Pro spuštění simulace je nutné nejprve spustit soubor, který obsahuje počáteční podmínky a nastavení parametrů simulace. Jmenuje se *Init.m* a po jeho spuštění funguje jak simulace ideálního oběhu v souboru *bp\_ideal\_simulation.mdl*, tak simulace reálného oběhu v souboru *bp\_LQ\_controller.mdl*.

### 4.2 Srovnání modelů s reálným světem

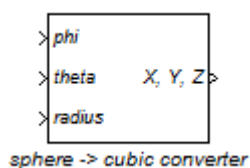
Scéna simulace satelitu obsahuje Slunce, Zemi, Měsíc a družici na geostacionární dráze. Existují dva soubory. V prvním je možné pozorovat pouze simulaci oběhu geostacionární družice kolem Země za ideálních podmínek (soubor *bp\_ideal\_simulation.mdl*). Druhý soubor simuluje oběh skutečného satelitu kolem Země se všemi výše uvažovanými poruchami. V souboru *bp\_LQ\_controller.mdl* je modelován reálný a ideální satelit. Reálný satelit je označený žlutou barvou a ideální červenou kuličkou. V průběhu simulace je cílem žlutého blížít se co nejvíce svou oběžnou dráhou ideálnímu satelitu.

Pro sledování odchylek a aktuální polohy satelitu je v simulaci umístěn head – up display (HUD). Ten zobrazuje informace a aktuální odchylce satelitu od ideální orbity (tedy ideálního satelitu). Zobrazuje také informace o poloze ideálního satelitu vzhledem k Zemi.

Pro potřeby simulace bylo nutné zvážit, jaké rozměry bude mít simulovaný prostor. V práci se uvažuje s konverzí  $1:1 \cdot 10^8$ , takže například vzdálenost Země od Slunce by nebyla skutečných 152 000 000 km, ale 15,2 jednotek v SIMULINKu.

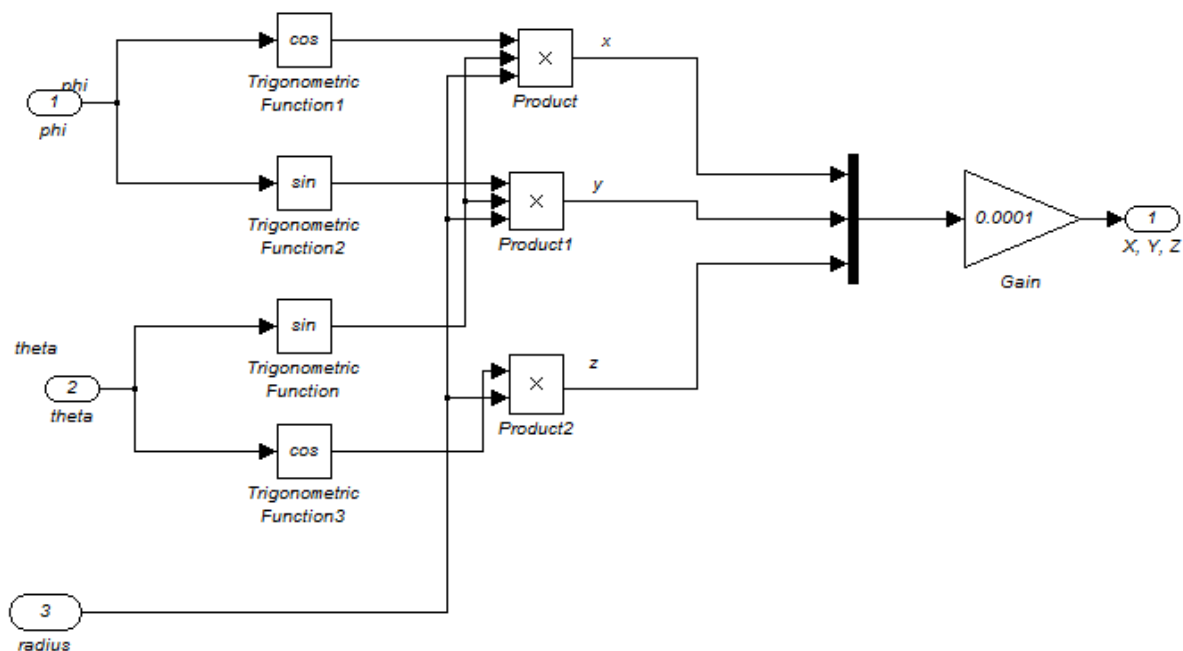
Velikost jednotlivých kosmických těles neodpovídá skutečnosti, protože rozdíly v jejich velikosti by byly obrovské. I přesto je zachována vzdálenost oběhu geostacionární družice v poměru k poloměru Země a je ve vzdálenosti  $6,6 \cdot R_E$ , jak je tomu ve skutečnosti. Vzdálenost Měsíce by měla být 12 krát více než je vzdálenost oběhu geostacionární družice. Ve virtuálním světě je vzdálenost Měsíce od Země v nepoměru k realitě. Je přibližně dvojnásobná než vzdálenost satelitu.

Pro počítání konverzí mezi reálnými vzdálenostmi a prostorem ve virtuální realitě se používá blok *sphere -> cubic converter*. Kromě převodu jednotek zabezpečuje také správný přepočítání souřadného systému. Simulace se provádí ve sférickém souřadném systému, ale virtuální realita pracuje s kubickým systémem. Tento blok byl vytvořen speciálně pro potřeby této práce. Jeho struktura je na obrázku 4.2.



Obrázek 4. 1: Blok pro převod souřadnic kubických na sférické.

#### 4 Simulace a její zapojení



Obrázek 4.2: Vnitřní zapojení bloku z obrázku 4.1.

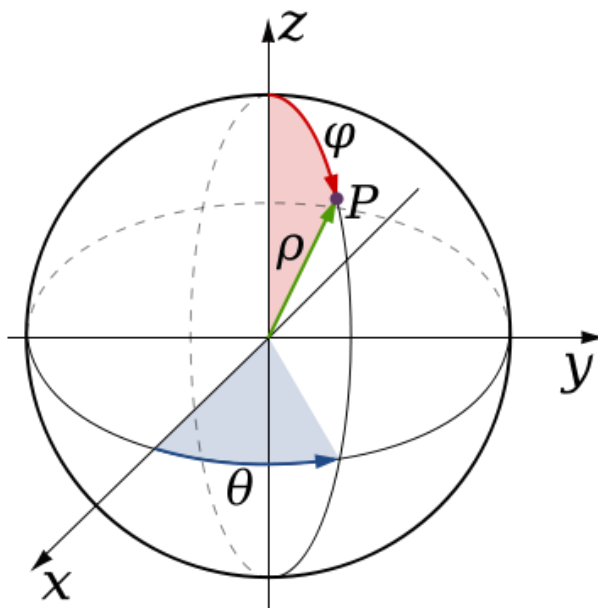
Převod ze sférických do kubických se provádí prostřednictvím následujících rovnic:

$$x = \rho \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \quad (12)$$

$$y = \rho \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \quad (131)$$

$$z = \rho \cdot \cos \varphi \quad (142)$$

Rovnice byly odvozeny z následujícího obrázku pomocí goniometrických funkcí. Symboly použité v rovnicích odpovídají těm uvedeným v obrázku 4.3.



Obrázek 4.3 : Porovnání kubických a sférických souřadnicových systémů.

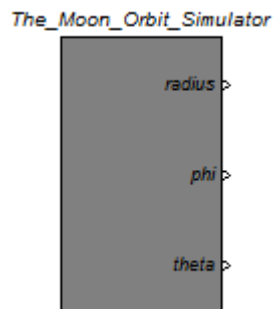


### 4.3 Simulace měsíce

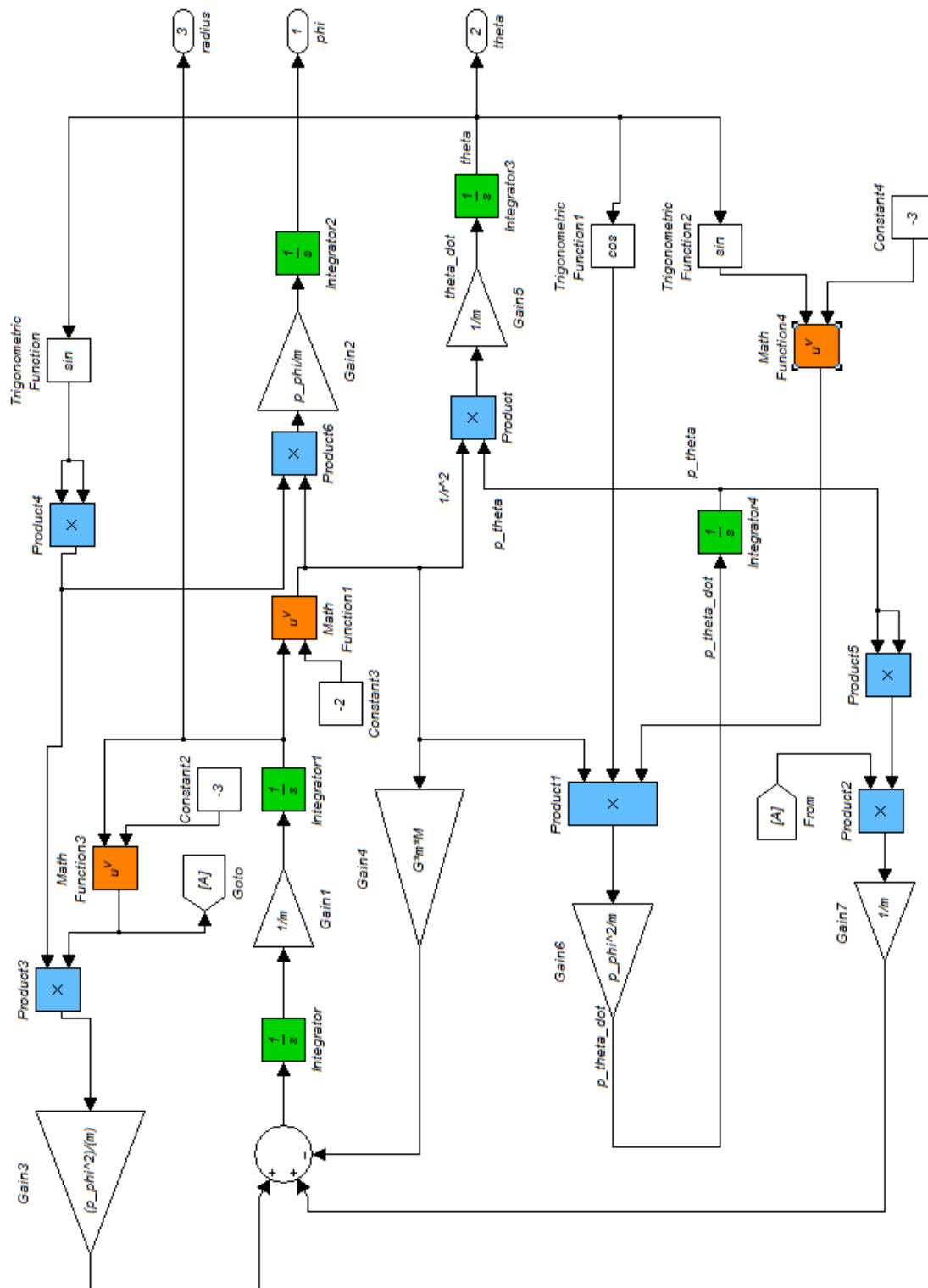
I když simulace oběhu Měsíce kolem Země nebyla cílem této práce, byl navržen speciální blok *The\_Moon\_Orbit\_Simulator*, který jeho oběh modeluje. Zapojení bloku je na obrázku 4.5. Jde vlastně o rovnice (6) až (11) převedené do integrálního schématu. Počáteční podmínky pro simulaci jsou uvedené v tabulce na této stránce.

Veličina	Značení v <i>Init_v2.mat</i>	Hodnota
Hmotnost měsíce	$m_m$	7,3477e22 kg
Hmotnost Země	$m_z$	5,9736e24 kg
Vzdálenost Měsíce od Země	$r_m$	405,696e6 m
Hybnost měsíce	$P_{\phi}$	$3,62e34 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}}$
Sklon k rovině ekliptiky	$\theta$	5,145°

Tabulka 4.1: Počáteční podmínky pro simulaci Měsíce



Obrázek 4.4 : Blok *The\_Moon\_Orbit\_Simulator*



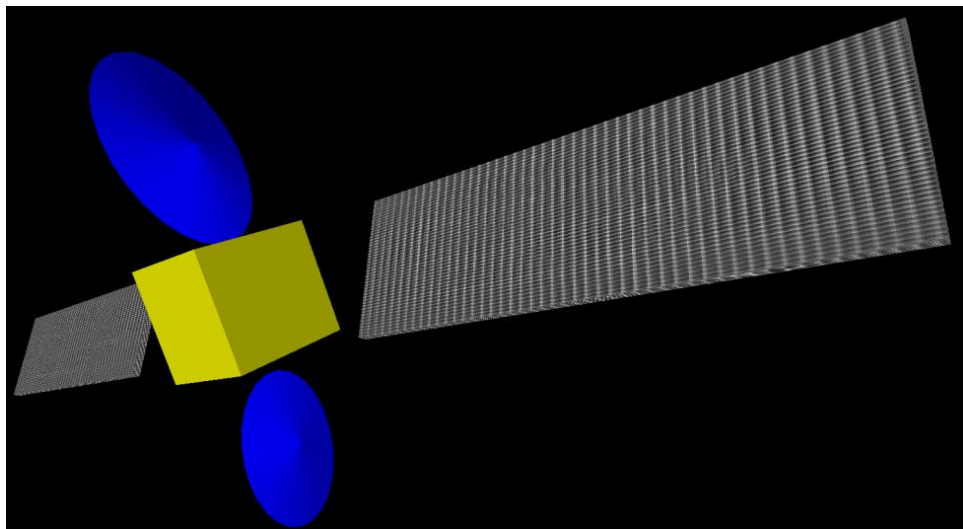
Obrázek 4.5 : Zapojení bloku The\_Moon\_Orbit\_Simulator

## 4.4 Podoba objektů ve virtuálním světě

Podoba satelitu byla inspirována ASTROU 2A, viz obrázek níže. Její model ve virtuální realitě následuje po obrázku originálu. Jedná se o satelit zabezpečující televizní vysílání.



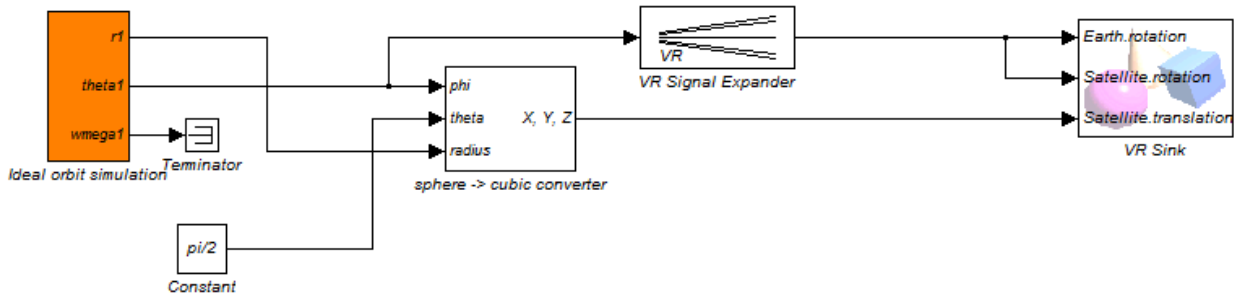
Obrázek 4.6 : Satelit ASTRA 2A.



Obrázek 4.7 : Satelit ASTRA 2A ve virtuální realitě.

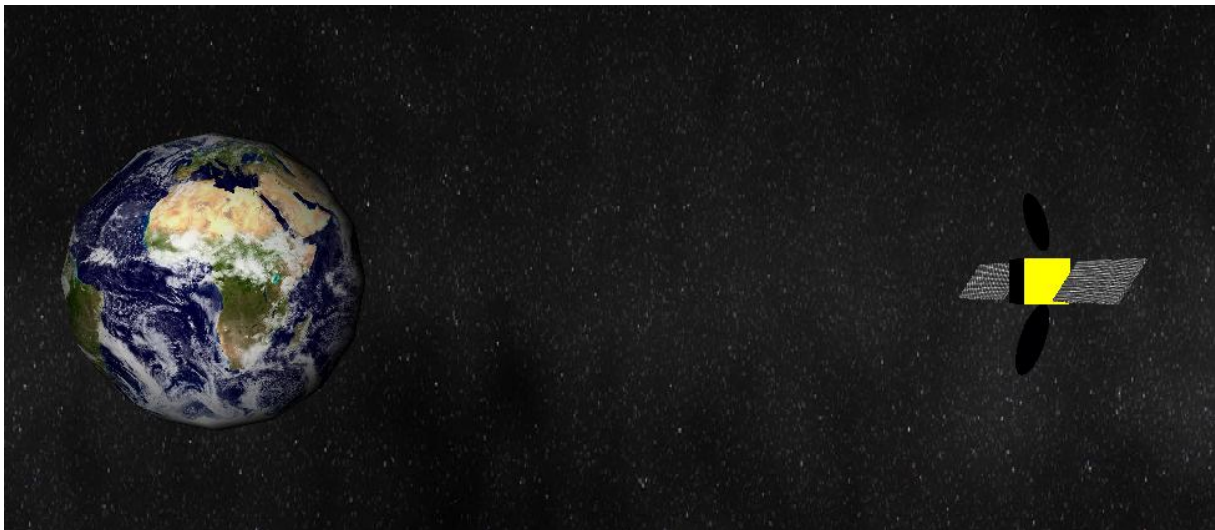
## 4.5 Simulace ideálního oběhu satelitu

K propojení virtuálního světa s modelem bylo použito modulu *VR Sink*. Jako model simulace se využilo výsledků z práce (Neokleous, 2007), které byly k dispozici pro účely této bakalářské práce. Mezi modelem (na obrázku 4.8 oranžově) a virtuálním světem jsou použité pomocné moduly *VR signal expander*, převodník souřadnic. *VR signal expander* posílá do modelu informaci o natočení země a satelitu. Satelit tedy směřuje tak, aby byl natočený vždy k povrchu Země. Zároveň se otáčí i Země kolem své osy a model satelitu zůstává stále nad stejným místem planety. Pro potřeby virtuálního světa je výstup *womega1* zbytečný, proto je ukončen modulem *terminator*. Model počítá s reálnými vzdálenostmi a ty jsou převáděny tak, aby se ve virtuální realitě vhodně zobrazily.



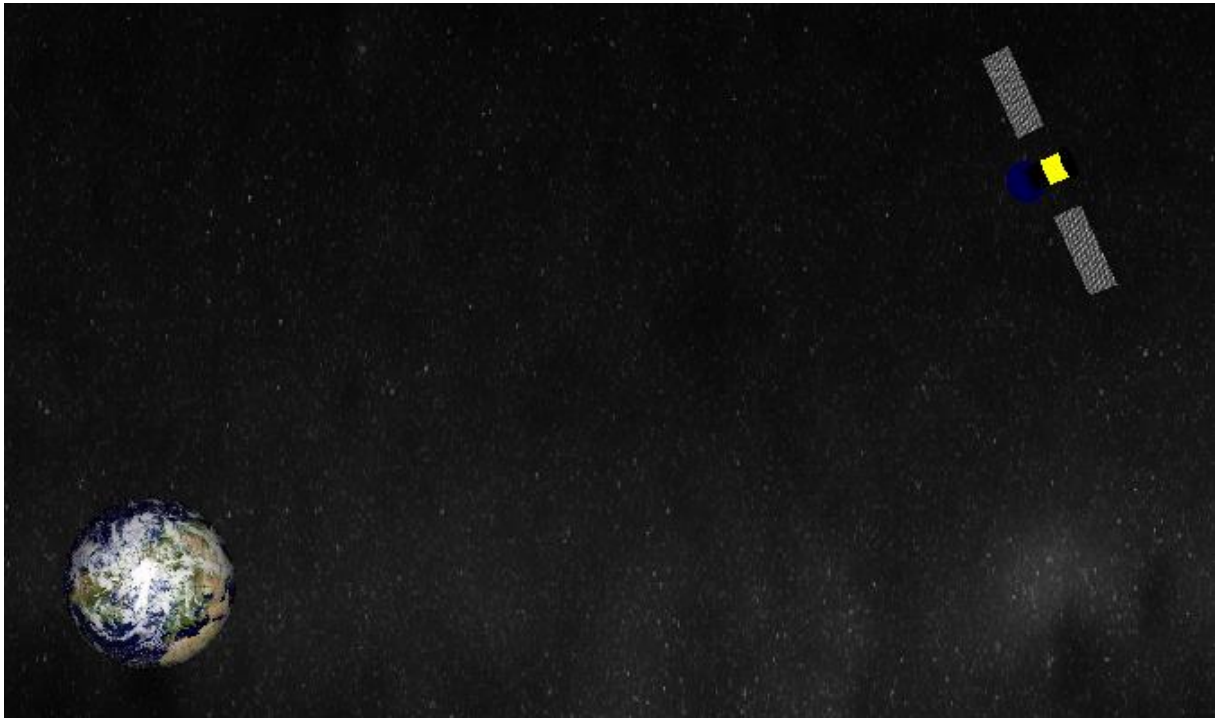
Obrázek 4.8 : Zapojení pro simulaci ideální geostacionární dráhy.

Model simulace ideálního oběhu je v souboru *bp\_ideal\_simulation.mdl*. Na následujících obrázcích jsou výsledky simulací ve virtuální realitě (VR). Při simulaci ideální dráhy nejsou zobrazovány žádné údaje o poloze satelitu vůči zemi. Protože při ideální simulaci se neuvažovalo působení Slunce, Měsíce ani *J2* efektu, nejsou tyto tělesa ve VR zobrazeny. Je vidět, že se družice pohybuje nad rovníkem Země a je stále nad stejným místem zemského povrchu. Proto není v simulaci ideálního oběhu použit žádný informační text s údaji o poloze satelitu.



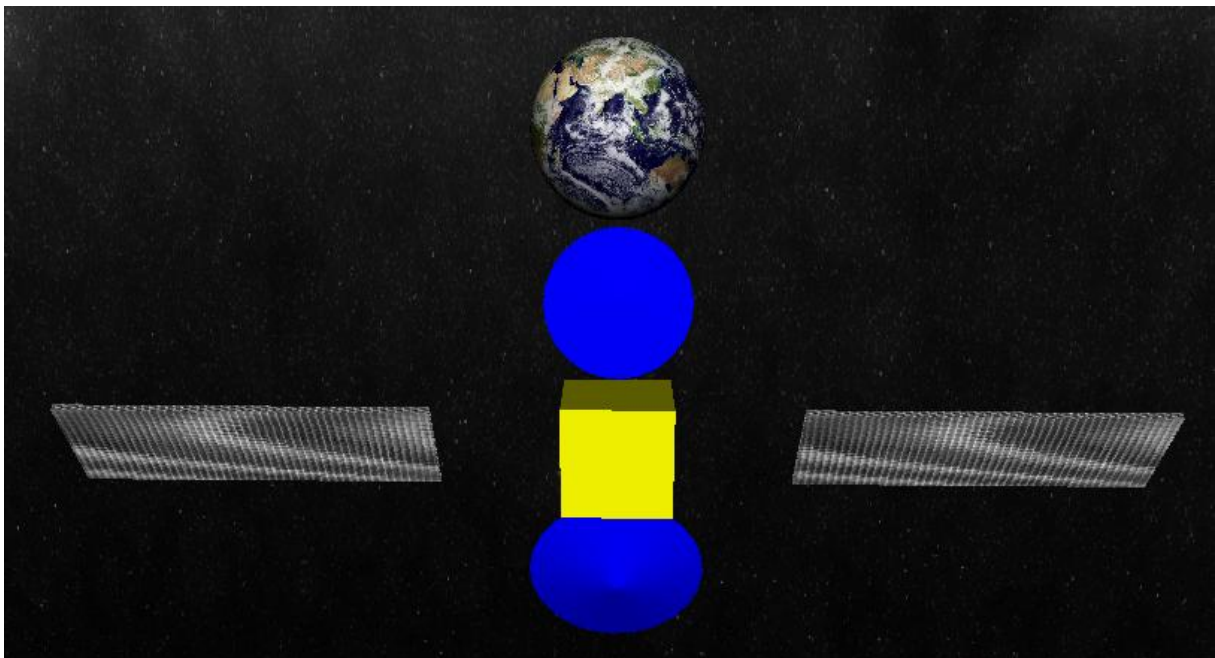
Obrázek 4.9 : Snímek ze simulace ideální orbity, boční pohled.

Snímek z virtuální reality na obrázku 4.10 ukazuje boční pohled. Úhel pohledu je možné si zvolit. K dispozici je pohled z boku (*SceneSideView*), zobrazený na obrázku 4.10, pohled shora (*SceneTopView*) a pohled na satelit obíhající nad zemským povrchem (*SatView*).



Obrázek 4.10: Pohled na scénu shora.

Při pohledu na scénu shora je vidět, že se satelit pohybuje přibližně ve vzdálenosti 6,6 poloměru Země – je tedy zachováno měřítko.



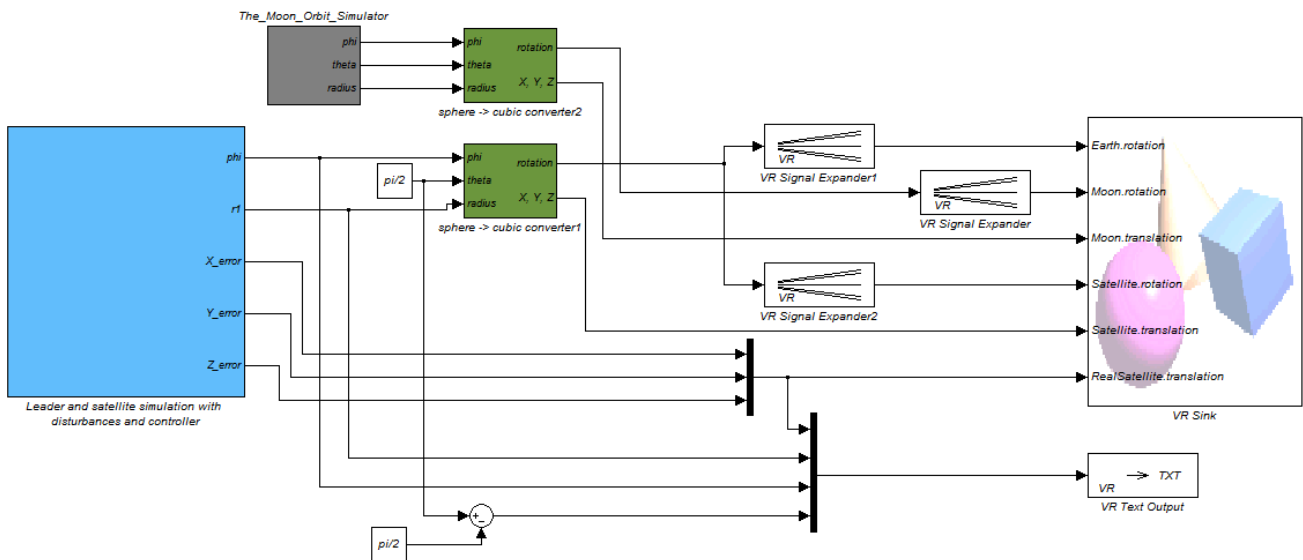
Obrázek 4.11: Pohled na scénu ze satelitu.

Při pohledu ze satelitu je vidět, že sleduje neustále stejný bod na Zemi.

## 4.6 Simulace oběhu reálného satelitu (satelitu, kde se uvažují poruchy dráhy letu)

Simulace reálného nebo ovlivňovaného satelitu je založena na sledování referenčního bodu. Reálný satelit se snaží tomuto bodu co nejvíce blížit. Konverguje svou dráhou k dráze tohoto bodu. Tento bod je v angličtině nazýván Leader a v simulaci této jej představuje červená kulička, která se pohybuje po ideální orbitě simulované stejně jako v předchozí kapitole.

V tomto světě už jsou uvažovány všechny zdroje poruch, zmíněné v předcházejících kapitolách. Proto simulace obsahuje kromě samotného modelu satelitu, Země a leadera také virtuální model Slunce – to se nepohybuje a zůstává na místě – a model Měsíce, jehož dráha je simulována blokem *The\_Moon\_Orbit\_Simulator*. Zapojení modelu je na následujícím obrázku.

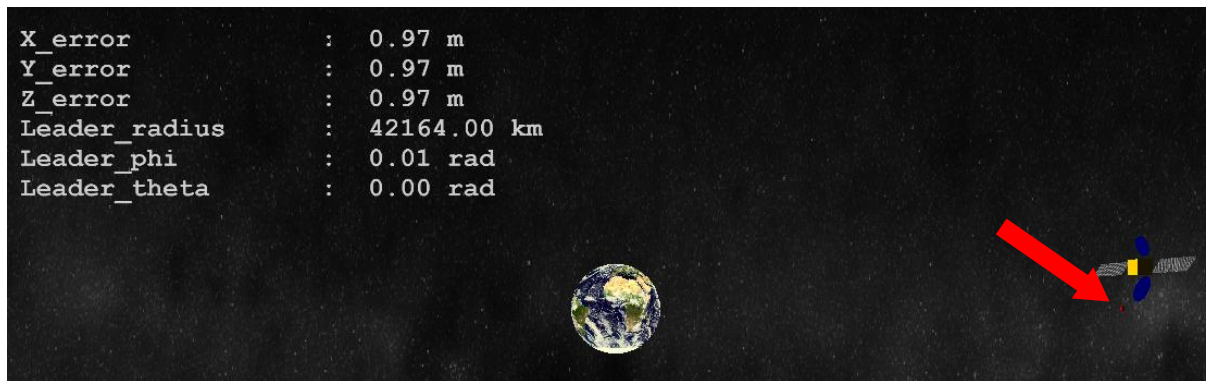


Obrázek 4.12: Zapojení modelu pro simulaci reálného satelitu.

Modrý blok generuje informace o poloze ideálního satelitu a o odchylce reálného satelitu od ideálního. Výstupy *phi* a *r1* představují polohu ideálního satelitu a výstupy *X\_error*, *Y\_error*, *Z\_error* jsou informace o tom, o kolik metrů je reálný satelit vlivem poruch mimo požadovanou dráhu. Informace jsou vzhledem k ideálnímu satelitu uváděny v kubických souřadnicích.

Samotný blok VR Sink má vstupy pro polohu ideálního satelitu – *Satellite.translation*, a pro polohu reálného satelitu – *RealSatellite.translation*. Protože se satelit musí natáčet směrem k povrchu Země je vstupem do VR také jeho natočení *Satellite.rotation*. Stejně se musí otáčet kolem vlastní osy i Země a Měsíc. Proto do bloku vstupuje i *Earth.rotation* a *Moon.rotation*. Protože model simuluje i obíhání Měsíce kolem Země, je vstupem i poloha Měsíce – *Moon.translation*.

Ve vlastním světě je zobrazena poloha satelitu ideálního a reálného. Reálný má počáteční odchylku od požadované dráhy přibližně 1 metr. Pro účely sledování pohybu satelitu je zobrazena poloha reálného ve sférických souřadnicích a odchylka reálného satelitu od skutečného v kubických souřadnicích. O zobrazení těchto údajů ve virtuálním světě se stará blok *VR Text Output*.

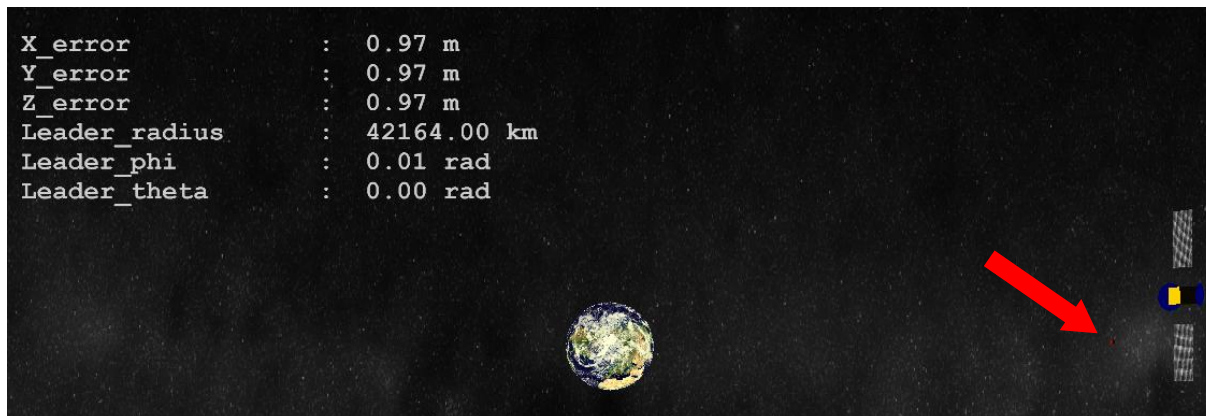


Obrázek 4.13 : Snímek ze simulace reálného satelitu, pohled ze strany.

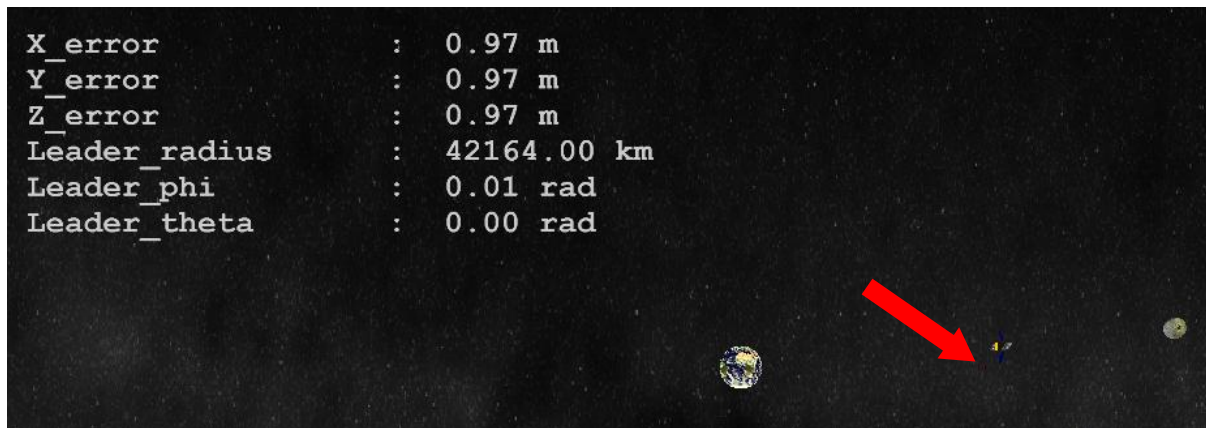
Samotnou simulaci je možno sledovat z několika předdefinovaných pohledů, které usnadňují orientaci v prostoru virtuálního světa. V simulaci reálného satelitu jsou k dispozici pohledy:

- ze strany (*SceneSideView*),
- shora (*SceneTopView*),
- ze strany z dálky (*SceneFarSideView*, aby byl vidět i Měsíc),
- reálný satelit (*RealSatView*),
- pohled na Leadera (*SatView*).

Na následujících obrázcích jsou uvedeny popořadě všechny pohledy, které VR nabízí. Protože je na obrázcích těžko rozeznatelný leader, byl dodatečně na obrázku zvýrazněn červenou šipkou.

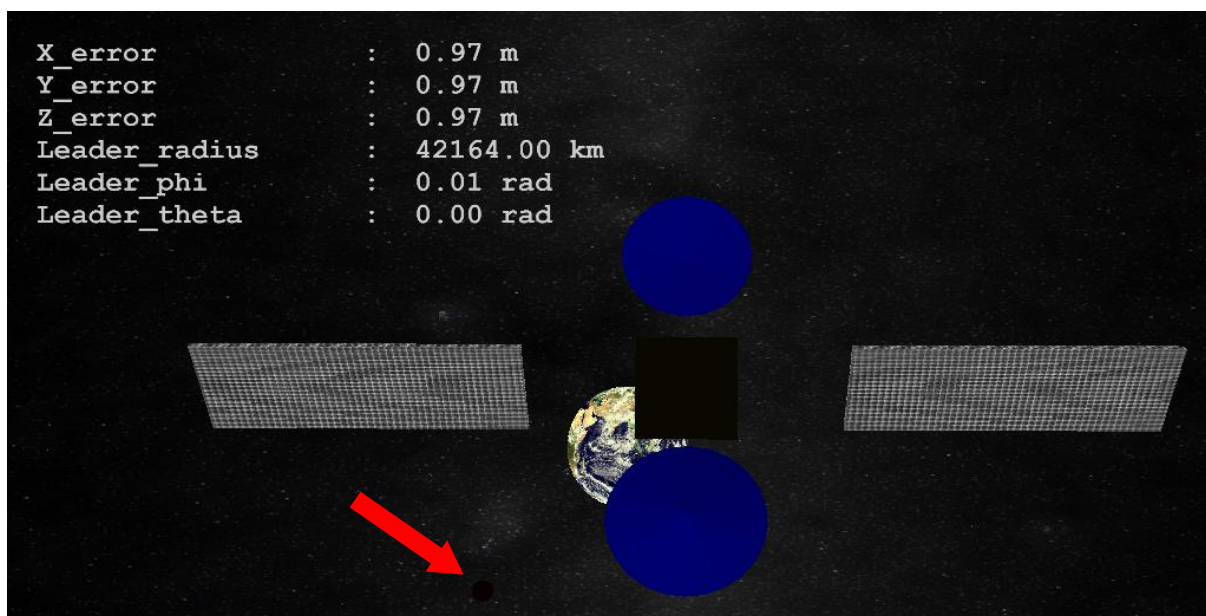


Obrázek 4.14: View point SceneTopView.



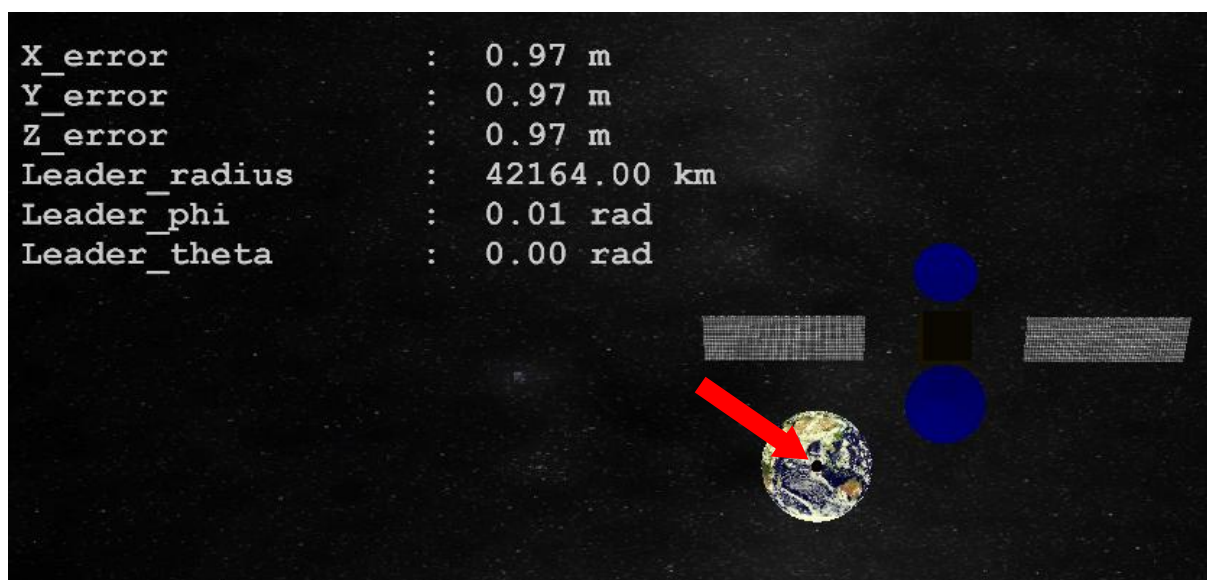
Obrázek 4.15: View point SceneFarSideView.

Obrázky 4.13 až 4.15 ukazují pohledy na scénu z dálky, aby bylo možné sledovat pohyb satelitu kolem Země. Obrázek 4.15, neboli view point *SceneFarSideView*, ukazuje pohled na scénu zdálky za účelem srovnání pohybu satelitu a měsíce.



Obrázek 4.16: View point RealSatView.



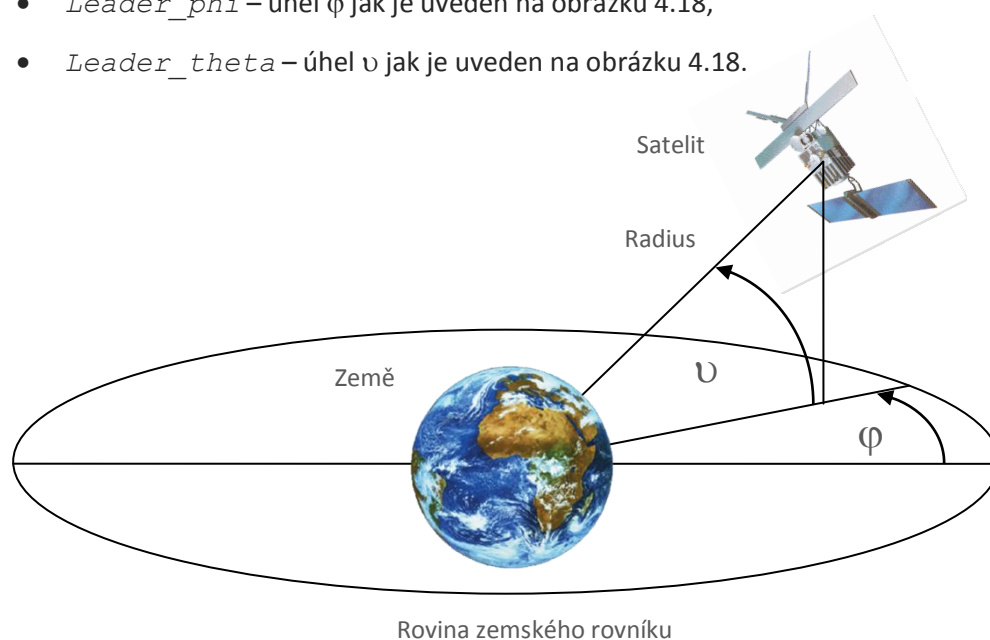


Obrázek 4.17: View point SatView.

Obrázky 4.16 a 4.17 ukazují pohled na satelit. Z těchto pohledů se pozoruje, jak se pohybuje satelit nad povrchem Země. Pohled *RealSatView* je pohledem na reálný satelit a slouží ke sledování pohybu satelitu řízeného regulátorem. Pohled *SatView* je podobný jako pohled *RealSatView*, ale jeho centrem je leader a celkový pohled je z větší vzdálenosti. Je to záměrně proto, aby bylo vidět, jak se reálný satelit pohybuje kolem požadovaného bodu.

V každém okně jsou textové popisky – tzv. HUD (head – up display) text. Tento text slouží pozorovateli ke zlepšení orientace v prostoru. Díky HUD textu je jasně vidět, jaká je zrovna aktuální odchylka satelitu od požadované polohy a jaká je poloha leadera. HUD display zobrazuje tyto údaje:

- $X\_error$ ,  $Y\_error$ ,  $Z\_error$  – vypisují aktuální odchylku reálného satelitu od požadované polohy v kubických souřadnicích,
- $Leader\_radius$  – vzdálenost leadera od středu Země,
- $Leader\_phi$  – úhel  $\varphi$  jak je uveden na obrázku 4.18,
- $Leader\_theta$  – úhel  $\nu$  jak je uveden na obrázku 4.18.



Obrázek 4.18: Souřadnice pohybu satelitu.

## 5 ZÁVĚR

V práci se podařilo úspěšně provést simulaci ideální geostacionární dráhy, družice se pohybovala nad rovníkem nad stále stejným místem. Při simulaci reálné geostacionární družice docházelo k odchýlkám jen v počátku simulace, ale po ustálení se družice pohybovala po dráze téměř totožné s dráhou ideální. Virtuální simulace tedy potvrdila funkčnost matematického modelu.

Virtuální realita je momentálně omezena na simulování pohybu družice pouze po geostacionární dráze, ale bylo by možné ji případně upravit i pro simulaci družic na nižších orbitách. K tomu by ovšem bylo nutné do matematického modelu doplnit model chování atmosférického tření. S tímto by bylo možné simulovat i družice na nižších orbitách.

V případě, že by se virtuální realita doplnila o další kosmická tělesa a v případě, že by se vhodně upravil matematický model, bylo by možné simulovat i meziplanetární lety. Pokud by ale měly mít tyto simulace relevantní, bylo by nutné pro ně používat reálná data o polohách planet a jednotlivých družic. Spolu s nimi by také bylo nutné uvažovat reálné parametry planet a družic. Informace o aktuálních polohách družic a planet je možné získat na webu NASA (NASA, 2007).

Vypracovaná simulace může sloužit například i jako demonstrace v předmětech SAM (Systémy a modely) nebo SRI (Systémy a řízení). Případně pro podporu programu SPACEMASTER na naší univerzitě.

## REFERENCE

Johnston, E. (10. květen 2008). *List of Satellites in Geostationary Orbit*. Získáno 2. 6 2008, z Satellite Signals: <http://www.satsig.net/sslist.htm>

Kulhánek, P. (14. únor 2008). *Teoretická mechanika*. Praha, Česká Republika, Praha.

Mlýnek, P. (2006). *Podpora výuky předmětu systémy a modely*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.

NASA. (17. prosinec 2007). *Satellite Tracking*. Získáno 13. 5 2008, z SCIENCE@NASA: <http://science.nasa.gov/temp/NOAA15Loc.html>

Neokleous, K. (2007). *Modeling and control of a satellite's geostationary orbit*. Prague: Czech Technical University in Prague.

Sidi, M. J. (2005). *Spacecraft Dynamics & Control*. New York: Cambridge University Press.

Wikipedia. (21. únor 2007). *List of orbits*. Získáno 19. duben 2008, z Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_orbits](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_orbits)

## POUŽITÉ PROGRAMY

MS Windows Vista Home Premium  
The Mathworks MATLAB & SIMULINK R2006b  
Virtual Reality Toolbox 4.0  
Standardní toolboxy MATLABu  
VRMLPad 2.0  
Cortona VRML Client 4.2  
V – Realm Builder  
MS Office 2007  
Mozilla Firefox

## POZNÁMKA K PŘILOŽENÉMU CD

Na CD se nachází složka *BP\_Sim*, kde je uložen celý program. Před spuštěním samotné simulace je nutné spustit soubor *Init.m*, který obsahuje potřebná data pro běh simulace.

Nejprve je tedy nutné spustit soubor *Init.m*, po něm otevřít soubory *bp\_ideal\_simulation.mdl* a *bp\_LQ\_controller.mdl*. Po otevření souborů je doporučeno nejprve spustit simulaci ideálního oběhu. Dvojklikem na blok *VR sink* se zobrazí virtuální realita a kliknutím na tlačítko „play“ se spustí simulace. Bude vidět rotace Země kolem vlastní osy a družice ji bude obíhat ve stále stejné vzdálenosti nad stejným bodem povrchu. Vše si lze ověřit přepnutím mezi jednotlivými viewpointy.

Virtuální realita se zavře a přepne se do okna s modelem družice a regulátoru. Virtuální svět se opět zobrazí dvojitým kliknutím na blok *VR Sink* a spuštění simulace se provede stejně jako v předchozím případě. Družice bude zpočátku mimo požadovaný bod (leader) označený červenou koulí. Za velice krátkou dobu se ale družice ustálí na požadované dráze a bude obíhat kolem země. Přiblížení na požadovanou orbitu je nevhodnější sledovat z pohledu reálného satelitu nebo z pohledu leadera. Celkový oběh družice kolem Země je po ustálení vhodné sledovat z ostatních viewpointů.

V dalším adresáři *BP\_pdf* je bakalářská práce ve formátu pdf.

Při spuštění simulace se mohou vyskytnout problémy s blokem *VR to TXT*. Pokud se vypíše chybové hlášení, je nutné nastavit přesně cestu k souboru virtuálního světa *Word\_x8.wrl* v tomto bloku. Pak půjde simulace spustit.