

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

OBOR GEODÉZIE, KARTOGRAFIE A GEOINFORMATIKA



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**ANALÝZA HVĚZDNÝCH KATALOGŮ MEZINÁRODNÍHO NEBESKÉHO
REFERENČNÍHO RÁMCE**

**ANALYSIS OF THE STAR CATALOGS OF THE INTERNATIONAL CELESTIAL
REFERENCE FRAME**

VEDOUCÍ PRÁCE: DOC. ING. JAKUB KOSTELECKÝ, PH.D.

KATEDRA GEOMATIKY

KVĚTEN 2021

TEREZA KRÁLOVÁ

Zadání

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6


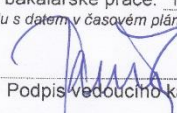


ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Králová</u>	Jméno: <u>Tereza</u>	Osobní číslo: <u>477052</u>
Zadávací katedra: <u>155 - geomatika</u>		
Studijní program: <u>Geodézie a kartografie</u>		
Studijní obor: <u>Geodézie, kartografie a geoinformatika</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Analýza hvězdných katalogů Mezinárodního nebeského referenčního rámce</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Analysis of the star catalogs of the International Celestial Reference Frame</u>	
Pokyny pro vypracování: Na základě nastudované literatury porovnejte jednotlivé realizace ICRF Mezinárodní služby rotace Země a referenčních systémů IERS.	
1. Popište způsob realizace ICRF a techniky kosmické geodézie, které k realizaci slouží.	
2. Určete rozdíly realizací u identických kvazarů.	
3. Vhodné veličiny graficky znázorněte.	
Seznam doporučené literatury: Kabeláč J., Kostecký J. st.: Geodetická astronomie 10. Skripta ČVUT, 2001 Kostecký, J. ml.: Globální polohové souřadnicové systémy. Skripta ČVUT, 2019 International Earth Rotation and Reference Systems Service. webová stránka www.iers.org	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>doc. Ing. Jakub Kostecký, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>19.2.2021</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>16.5.2021</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
<u>12.2.2021</u> Datum převzetí zadání	<u>Králová</u> Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Analýza hvězdných katalogů Mezinárodního nebeského referenčního rámce vypracovala samostatně. Veškeré podklady a použité informace uvedeny v seznamu zdrojů. Citace provedeny v souladu s normou ISO 690.

V Berouně dne 10.5.2020

Králová

Poděkování

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu docentu Jakubu Kosteckému doc. Ing. Ph.D. za odborné vedení a trpělivost v průběhu zpracování práce. Také děkuji za poskytnutí literatury a možnost konzultací. Rovněž musím poděkovat za rady a čas věnovaný mě a řešení této problematiky.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá realizacemi ICRF (International Celestial Reference Frame) a jejich porovnáním. Vzhledem k postupnému rozšiřování seznamu zdrojů, byly porovnávány ty, které se nacházejí ve více realizacích. Rozdíly souřadnic a přesnosti byly pro lepší představu znázorněny graficky. Pro pochopení této tematiky taktéž je v práci definován systém ICRS (International Celestial Reference System) a jeho rámec ICRF, společně se souřadnicovým systémem. Taktéž je popsán princip metody Interferometrie z velmi dlouhých základen VLBI (Very Long Baseline Interferometry) použité při realizaci ICRF.

Klíčová slova

ICRS, ICRF, VLBI, kvazar, deklinace, rektascenze

Anotace

Bachelor's thesis deal with realization of the ICRF (International Celestial Reference Frame) and their comparison. Due to expansion of the list of sources, only those which are in both realizations can be compared. Coordinate differences and accuracy are shown graphically. To understand this topic the thesis defines the ICRS (International Celestial Reference System) and its frame ICRF with coordinate system. The VLBI (Very Long Baseline Interferometry) method which was used for ICRF realisation is also described.

Keywords

ICRS, ICRF, VLBI, quasar, right ascension, declination

Obsah

1	ICRS a ICRF.....	8
1.1	Vznik systému.....	8
1.2	Definice systému.....	8
1.3	Definice rámce.....	8
1.4	Realizace ICRF.....	8
2	Souřadnice.....	10
2.1	Systém souřadnic.....	10
2.2	Důležité termíny.....	10
2.3	Rovníkové souřadnice 1. druhu.....	11
	Rovníkové souřadnice 2. druhu.....	12
2.4	Deklinace a rektascenze.....	12
3	Interferometrie z velmi dlouhých základen.....	14
3.1	Definice a princip VLBI.....	14
3.2	Radiové zdroje.....	15
3.3	Stanice, korelátory a datová centra.....	15
	Vliv atmosféry na signál.....	16
3.4	VGOS.....	16
4	Měření času.....	18
4.1	Čas a atomové hodiny.....	18
4.2	Časové zpoždění.....	19
5	Porovnání realizací ICRF.....	23
5.1	Porovnání realizací.....	23
5.2	Rozmístění zdrojů.....	25
6	Program.....	28
6.1	Porovnání dat – program.....	28
6.2	Grafy.....	29
7	Závěr.....	33
7.1	Výsledky porovnání.....	33
7.2	Závěr práce.....	33
8	Seznam obrázků.....	35
8.1	obrázky.....	35
8.2	grafy MATLAB.....	35
9	Seznam tabulek.....	36

10	Použitý software	37
11	Přílohy	37
12	Seznam zdrojů	38

1 ICRS a ICRF

1.1 Vznik systému

Podnětem ke vzniku tohoto systému byl požadavek Mezinárodní astronomické unie (International Astronomical Union, dále jen IUA), aby nový referenční systém nebyl založený na dynamickém pohybu Země, nýbrž na kinematické základně s použitím souřadnic mimogalaktických radiových zdrojů.

Z rozhodnutí IUA byl 1.1.1998 systém FK5 (The Fifth Fundamental Catalogue, nejpřesnější souřadnicový systém nebeské sféry určený metodami klasické astronomie) nahrazen systémem ICRS (International Celestial Reference System). Systém FK5 se vztahoval k dynamicky definovanému rovníku a jarnímu bodu v juliánské epoše J2000, tedy 1. ledna 2000 ve 12 hod. Pro návaznost nového systému na ten již existující, byly ztotožněny základní směry systému ICRS v epoše J2000.0 se směry z katalogu FK5.

1.2 Definice systému

ICRS (International Celestial Reference System) je mezinárodní nebeský referenční systém. Jednou z částí tohoto systému je ICRF (International Celestial Reference Frame), další část tvoří technologie, metody, algoritmy a konstanty. Referenčním systémem se rozumí soubor pravidel pro definování kartézské soustavy souřadnic, tedy os X, Y, Z v jakémkoliv čase. Druhou část tvoří dohodnuté parametry, např. rychlost světla, zploštění Země, ale i způsob výpočtu precese a nutace. Technologiemi rozumíme např. metody pozorování.

1.3 Definice rámce

Rámec je definován jako souřadnice kvazarů získané z nejpřesnějších dat a nevhodnějších metod v době jeho vzniku. Neméně důležité jsou odhady chyb, výběr a analýza dat a třídění výsledků. Pro tento účel byla vytvořena pracovní skupina IAU (WGRF - Working Group for Reference Frame), jež měla práce na starost.

Pravouhlé souřadnice X, Y, Z systému ICRF mají počátek v barycentru sluneční soustavy. Pro splnění tohoto požadavku není dostačující pozorování ve 3-rozměrném prostoru. Veškerá pozorování probíhají ve 4-rozměrném časoprostoru se zaváděním korekcí. Osa X směřuje k jarnímu bodu (průsečík rovníku a ekliptiky), osa Z směřuje ke střednímu pólu. Rovina XY je totožná s rovinou rovníku. Rámec je dán souřadnicemi radiových zdrojů v soustavě rovníkových souřadnic 2. druhu (rektascenze, deklinace) – více viz kapitola 2.

Charakteristika polohy radiových zdrojů je určena z dat získaných metodou VLBI (Very Long Baseline Interferometry) – více viz kapitola 3. Pro zařazení objektu do kategorie D platí přísná kritéria. Tato kritéria třídění objektů zaručují spolehlivost realizací ICRF.

1.4 Realizace ICRF

První realizace je značena ICRF až do roku 2009, kdy byl přijat nový rámec ICRF2, později je značena ICRF1. Úplný popis ICRF1 a použitých postupů zapsán v Technical Note 23 [1]. Jedním z důvodů vzniku rozšíření (extension) je zařazení nově pozorovaných zdrojů. Dalším důvodem je aktuální zhodnocení vhodnosti radiových zdrojů pro zařazení do ICRF. Rámec ICRF2 obsahuje pětikrát více radiových zdrojů než ICRF1. Přidání definujících zdrojů se stabilní polohou, vhodně rozprostřených po obloze eliminuje nedostatky ICRF1. Veškeré informace o ICRF2 nalezneme v Technical Note 35 [2]. Nový rámec ICRF3 navazuje na předchozí realizace. Oproti předchozím rámcům byl změněn jeho model, který zahrnuje účinek galaktocentrického zrychlení sluneční soustavy vlivem její rotace kolem středu

Mléčné dráhy. Jeho zanedbání způsobí významnou deformaci rámce kvůli časovému rozsahu dat. Zahrnuje 40 let měření metodou VLBI (na dvou frekvencích), ale také nová měření v širším frekvenčním pásmu. Jedná se o poslední a dodnes platný rámec. Realizace byly vypočteny na základě pozorování výhradně metodou interferometrie s velmi dlouhými základnami (VLBI - Very Long Baseline Interferometry).

2 Souřadnice

2.1 Systém souřadnic

V kosmické geodezii se setkáváme s pravouhlými souřadnicemi. Jedná se o pravotočivý souřadnicový systém, s daným počátkem 0 a osami X, Y, Z, jenž jsou na sebe kolmé. Také se používají další tři druhy sférických souřadnic: ekliptikální, rovníkové a obzorníkové souřadnice. Každý sférický souřadnicový systém má rozdílnou základní rovinu a směr. Souřadnice radiových zdrojů jsou uváděny v rovníkových souřadnicích. Jsou známy matematické vztahy pro převod mezi jednotlivými systémy (např. rovnice 2-4,7-9).

Rovníkové souřadnice rozlišujeme na 2 druhy. Oba systémy mají stejnou základní rovinu, tedy rovinu rovníku. A také základní směr, jímž je osa rotace Země. Osa rotace prochází severním i jižním pólem a svírá pravý úhel s rovinou rovníku. První souřadnicí je deklinace, jenž je stejná v obou souřadnicových soustavách. Druhá souřadnice není totožná. Zásadní rozdíl je závislost na čase. Souřadnice prvního druhu jsou závislé na čase – zde je druhou souřadnicí hodinový úhel, ale souřadnice druhého druhu nikoliv – zde je druhou souřadnicí rektascenze.

2.2 Důležité termíny

- **Nebeská sféra**
Jedná se o model jednotkové koule v jejímž středu stojí pozorovatel. Na povrch koule se promítají objekty a dráhy jejich pohybu. Z pohledu pozorovatele není možné určit vzájemnou polohu dvou těles (co je blíže a co dále). Nebeská sféra se otáčí kolem osy, stejně jako Země. Osa rotace prochází nebeskými póly, což jsou promítnuté zemské póly.
- **Světový rovník (nebeský rovník)**
Je kružnice na nebeské sféře, na které se nachází jarní a podzimní bod. Jedná se o průřez zemského rovníku. Objekty v okolí nebeského rovníku je možné pozorovat téměř na celé Zemi např. souhvězdí Orion.
- **Deklinační kružnice**
Jedná se o kružnici na nebeské sféře, jenž prochází oběma póly. Tedy je kolmá na rovník. Na Zemi bychom ji přirovnali k poledníku. Úhlová vzdálenost deklinační kružnice od místního poledníku (meridián) se nazývá hodinový úhel. Úhlová vzdálenost od jarního bodu se nazývá rektascenze.
- **Ekliptika**
Je průsečnice nebeské sféry s rovinou dráhy, ve které Země obíhá Slunce. Slovo je odvozeno z řec. *Ekleipsis* což znamená zatmění. Zatmění Slunce a Měsíce nastává právě v blízkosti ekliptiky. Sklon ekliptiky oproti nebeskému rovníku je přibližně $23,5^\circ$.
- **Jarní bod**
Jedná se o bod na nebeské sféře, jenž je průsečíkem ekliptiky a nebeského rovníku. Jeho rovníkové souřadnice jsou deklinace= 0° rektascenze= $0s$. V tomto bodě se nachází slunce v okamžiku jarní rovnodennosti. Jeho protějškem je podzimní bod.

- **Pólová vzdálenost**

Úlová vzdálenost značená p se měří od severního pólu. Na rovníku se pólová vzdálenost rovná 90° . Z toho vychází následující rovnice.

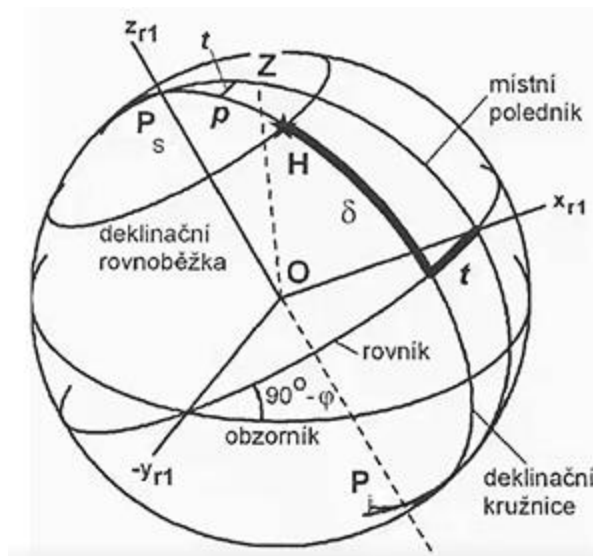
$$p + \delta = 90^\circ \quad (1)$$

2.3 Rovníkové souřadnice 1. druhu

Jedná se levotočivý souřadnicový systém. Osa Z prochází oběma póly, tedy je identická s osou rotace Země. Rovina XY je kolmá na osu Z , jedná se o rovinu světového rovníku. Souřadnicemi je deklinace δ , úhel udávaný ve stupních, a hodinový úhel t , jenž nabývá hodnot 0 až 24 hod. Tato souřadnicová soustava je závislá na čase. Pomocnou rovinou je rovina místního poledníku, ta však vlivem rotace mění svou polohu vůči hvězdám. Tento systém rotuje společně se Zemí.

$$\begin{aligned} x_{r1} &= \cos \delta \cos t \\ y_{r1} &= -\cos \delta \sin t \\ z_{r1} &= \sin \delta \end{aligned} \quad (2-4)$$

$$t = \arctan -\frac{y_{r1}}{x_{r1}} \quad \delta = \arcsin z_{r1} \quad \delta = \arctan \frac{z_{r1}}{\sqrt{y_{r1}^2 + x_{r1}^2}} \quad (5-6)$$



obr. 1 rovníkové souřadnice prvního druhu – převzato z [3]

Rektascenze, druhá souřadnice α , je úhel mezi rovinou deklinační kružnice, ve které se nachází těleso a deklinační kružnicí, která prochází jarním bodem. Rektascenze se neuvádí ve stupních, ale v časových jednotkách. Tedy 0-24 hod po směru hodinových ručiček (matematicky v kladném smyslu). V tabulkách dále je značena zkratkou RA.

3 Interferometrie z velmi dlouhých základů

3.1 Definice a princip VLBI

VLBI (Very Long Baseline Interferometry) je jedna z pozorovacích metod kosmické geodézie. Patří do skupiny radiotechnických metod. Radiotechnické metody nezávisí na viditelnosti (počasí), ale jsou ovlivněny množstvím nabitých částic v atmosféře (ionty, elektrony). Protože se pozorovaný signál nachází v mikrovlnné části spektra, nezávisí na denní či noční době, a tím vznikla možnost celodenního pozorování. Podle umístění zařízení, obdobně jako laserový družicový dálkoměr (SLR), je řazena do metod s přístrojem na zemském povrchu a tělesem jako pasivním zařízením. Je částečně nezávislá na družicích, nejsou k observacím potřeba, ale využívají se k synchronizaci času. Byla použita pro všechny realizace rámce ICRF. Observační program je složen ze série 24hod seancí.

Tato metoda slouží k pozorování kvazarů (mimogalaktických rádiových zdrojů – více viz podkapitola 3.2). Vedle definice souřadnicových systémů ICRS a ITRS (International Terrestrial Reference System), lze pozorování využít k určení parametrů **EOP** (Earth Orientation Parameters). Je to jediná metoda kosmické geodézie, která je schopna určit $DUT1 = UT1 - UTC$ tj. rozdíl mezi rotačním časem a světovým koordinovaným časem. Parametry Orientace Země EOP jsou světový čas (UT1), souřadnice pólu CEP (Celestial Ephemeris Pole) X_p, Y_p a změny souřadnic pólu (Celestial pole offsets) vlivem precese a nutace.

Parametry určované z pozorování VLBI jsou rozděleny do dvou skupin. Zprvė vnitřní parametry určované pro každou seanci, tyto parametry jsou časově proměnné, a tedy konstantní pouze po dobu jedné seance.

- 2 nutační parametry (oprava modelu nutace)
- Variace rotačního času DUT1
- Troposférické parametry (pro 1hod pozorování) a gradient troposférických parametrů
- Parametry kvadratického polynomu aproximující chování atomových hodin na stanici
- Změny v chodu hodin (v době 1hod), skoky v chodu hodin
- Rozdíl v měření času mezi základnami (offset)
- Souřadnice stanic – konců základny – používané pro definici International Terrestrial Reference Frame (ITRF)
- Souřadnice referenčního objektu příslušejícího k dané seanci (VLBI neměří směry, ale úhly)

Druhou skupinu tvoří vnější parametry nezávislé na místě, jsou společné pro všechny stanice. Tyto parametry jsou společné pro více observačních seancí.

- Relativní souřadnice rádiových zdrojů
- Centrační parametry radioteleskopů (antény VLBI)
- Parametry charakterizující variaci rotace Země

3.2 Radiové zdroje

Kvazar je překlad z anglického quasar, což je akronym pro quasi-stellar radio source. Jedná se o velmi vzdálený objekt, jenž je zdrojem rádiového záření. Značení jednotlivých objektů (designation) vychází z přibližných souřadnic (deklinace a rektascenze) v epoše J2000.0, obsahuje také znaménko souřadnic. Formát označení vypadá takto: JHHMMSS.s+DDMMSS či JHHMMSS.s-DDMMSS (*obr.13*).

Vzhledem k historii pozorování a vhodnosti některých objektů mají souřadnice zdrojů získané analýzou dat VLBI různou přesnost. Objekty v rámci ICRF jsou rozděleny do tří kategorií: Define (D), Candidate (C), Others (O). Pro zahrnutí nějakého rádiového zdroje do ITRF platí tato vylučovací kritéria (při splnění kritéria tedy objekt není vhodný a je ze seznamu vyloučen):

- 1) Formální střední chyba v poloze překročí 1 mas v průběhu jedné seance
- 2) Zdroj je observován méně než dvacetkrát
- 3) Zdroj je observován po dobu kratší než 2 roky
- 4) Zdroj má rozptyl v poloze trojnásobek jednotkové střední chyby či větší
- 5) Zdroj má nepravidelnou či měnící se strukturu
- 6) Zdroj vykonává velký vlastní pohyb vůči okolním objektům
- 7) Zdroj je výchozím bodem seance, tedy má funkci počátku

3.3 Stanice, korelátory a datová centra

Pozorování metodou VLBI koordinuje Mezinárodní služba VLBI pro geodézii a astrometrii (IVS – International VLBI Service for Geodesy and Astrometry). Pozorování jsou prováděna na stanicích s radioteleskopy a záznamovým zařízením, naměřená data jsou nejprve zpracována v korelátoch a uložena v datových centrech. Následné zpracování produktů provádí analytická centra, výsledky opět ukládají v datových centrech.

Radioteleskopy

Slouží k příjmu velmi slabých rádiových signálů z kvazarů a jsou rozmístěny na stanicích po celém světě – včetně např. Antarktidy – viz obr. 3.



obr. 3 rozmístění stanic VLBI – převzato z https://www.gsi.go.jp/ENGLISH/page_e30214.html

korelátoři (7)

- 2x USA
- 2x Japonsko
- Čína
- Německo

primární datová centra (3)

- Francie: Pařížská observatoř
- Německo: BKG Lipsko
- USA: CCDIS

datová centra (2)

- Japonsko: National Institut of Information and Communications Technology
- Itálie: Institut Radioastronomie INAF v Bologni

Analytická centra (30) slouží ke zpracování dat do výsledných produktů např. souřadnice kvazarů nebo parametry orientace Země. Jsou rozdělena do tří kategorií: plná (všechny produkty), přidružená (speciální produkty), kombinační (výsledky z více center).

Vliv atmosféry na signál

Pro eliminaci zpoždění signálu vlivem ionosféry je prováděno měření na dvou frekvencích (v pásmech S a X). Vliv troposféry (tj. elektricky neutrální atmosféry) takto eliminovat nelze, proto se využívá model závisející na výškovém úhlu (na kterém závisí délka cesty signálu při průchodu troposférou) a meteorologických parametrech (teplota, atmosférický tlak, vlhkost vzduchu). Zenitové zpoždění je ovlivněno mokrou a suchou složkou troposféry. Odhad vlivu zenitového zpoždění se modeluje při zpracování aproximací při rozdělení na krátké časové úseky. Dalším zpřesněním modelu vlivu troposféry je odhad azimutální závislosti zpoždění (tzv. gradient). Oprava troposférického zpoždění je hlavním zdrojem chyb v metodě VLBI.

tabulka 2 observace VLBI frekvence (dual-frequency Mark III)

	S	X
Frekvence [GHz]	2.3	8.4
Vlnová délka [cm]	13	3.5

3.4 VGOS

Od roku 2005 vyvíjen systém VLBI2010 čili VGOS. Nový systém nahradí stávající S/X systém z 60. a 70. let 20. století. Náhrada je nutná z důvodu stárnutí zařízení: jak antén, tak elektroniky a s tím rostoucí náklady na udržení současné přesnosti a dostupnosti. Problémem jsou radiové interference (frekvenční rušení), do pásma S spadají frekvence WiFi a mobilních operátorů. Nový systém VGOS je založen na širokopásmovém zpoždění, tedy měření na 4ech nebo více frekvencích v rozsahu 2.5-14 GHz. Pozorování budou prováděna pomocí rychle natáčených 12metrových antén s hustotou záznamu 8Gb/s či více. To povede ke snížení vlivu chyb a zvýšení přesnosti výsledných produktů.

Požadavky nového systému VGOS, které vycházejí ze simulací:

- Minimálně 3 pravidelně pozorující stanice na každé význačné tektonické desce
- Minimálně 8 pravidelně pozorujících stanic na jižní polokouli
- Minimálně 6 pravidelně pozorujících stanic rovnoměrně pokrývajících zemský povrch a v reálném čase připojených k 1 či více korelátorům pro určení EOP v čase blízkém reálnému
- Minimálně 8 velkých antén s průměrem 20m a více (4 na každé polokouli) pro zhušťování ICRF (určování souřadnic kvazarů)
- Umístění stanic VGOS blízko existující či plánované geodetické stanice (priorita pro stanice SLR – laserových družicových dálkoměrů)
- Vytvoření kapacity korelátorů pro kontinuální observace minimálně 24 stanic (s finálním cílem minimálně 32 stanic)

System VGOS je v současnosti budován a jsou testovány koncepce a technologie, které vyhoví definovaným požadavkům.

4 Měření času

Jak ukážeme dále, jednou ze základních podmínek pro realizaci pozorování VLBI je zajištění přesného času na každé stanici. V současnosti se k měření co nejpřesnějšího času využívají atomové hodiny.

4.1 Čas a atomové hodiny

První **atomové hodiny** byly sestrojeny v roce 1949 v USA (jednalo se o čpavkový maser). Atomové hodiny zdokonalil Američan Norman Foster Ramsey Jr. Nové cesiové atomové hodiny byly sestrojeny v Anglii roku 1955. Hlavní částí atomových hodin je oscilátor s křemenným krystalem napojeným na vysílač rádiových vln. Frekvence oscilátoru je řízena elektronicky. Princip spočívá ve shodě frekvence oscilátoru a vlastní frekvence kmitání atomů. Nejprve jsou atomy v základním stavu exponovány frekvencí z křemenného oscilátoru. Pokud je frekvence oscilátoru velmi blízká vlastní frekvenci atomů, jsou atomy excitovány. Pomocí magnetického pole jsou detekovány atomy v excitovaném stavu. Podle jejich množství je laděna frekvence oscilátoru na 9 192 631 770 Hz, tedy rezonanční frekvenci atomů cesia. Po úspěšné realizaci cesiových atomových hodin byla roku 1967 definována jedna sekunda počtem kmitů atomu cesia.

V roce 1989 získal Norman Foster Ramsey, Jr. společně s H. Dehmelt a W. Paulem Nobelovu cenu za fyziku, za vynález metody separovaných oscilujících polí a její použití ve vodíkových maserech a jiných atomových hodinách [4].

Atomový čas (tzv. fyzikální čas) je fyzikální veličina, která nahradila efemeridový čas, jenž je odvozen z pohybu planet ve sluneční soustavě (mimo jiné oběh Země kolem Slunce). Je lepší (rovnoměrnější) než časová škála odvozená z rotace Země, ta je ovlivněna slapovým třením a dalšími jevy, v důsledku nichž se rotace Země zpomaluje.

Atomová sekunda je podle mezinárodní soustavy měrových jednotek SI definována takto:

Sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření odpovídajícího přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133.

citace 1 starší již neplatná definice s [5]

Můžeme se také setkat s dalšími (odvozenými) jednotkami jako je atomový den, hodina či atomová minuta. Od 20. května (den metrologie) roku 2019 je v planosti nová definice sekundy.

Sekunda, symbol s, je SI-jednotka času. Je definována fixováním číselné hodnoty cesiové frekvence $\Delta\nu_{Cs}$, přechodové frekvence atomu cesia 133 v klidovém stavu při přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu, rovné 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotce Hz, jež je rovna s^{-1} .

citace 2 nová definice sekundy v platnosti od 20.5.2019 [5]

4.2 Časové zpoždění

Rádiové zdroje vyzařují **signál** v podobě náhodného Gaussovského šumu. Vzhledem ke vzdálenosti je signál dopadající na Zemi slabý, ale můžeme bez újmy na přesnosti předpokládat, že jeho vlnoplocha je rovina. Přijímačem zachycený signál je popsán jako řada krátkých náhodných impulzů. Kombinací těchto impulzů vzniká vlna s amplitudou, která má Gaussovo náhodné rozdělení. Signál je zachycen více přijímači v radioteleskopech na povrchu Země. Jelikož se poloha antén radioteleskopů vlivem rotace Země v čase mění, taktéž dochází ke změně časového zpoždění. Měří se jak časový posun, tak jeho změny v čase.

Z rozdílné vzdálenosti mezi rádiovým zdrojem a jednotlivými přijímači (viz *obr.4*) lze vyjádřit **délku a směr spojnice přijímačů** – radioteleskopů – tzv. základny D . Jedná se o relativní metodu, která neurčuje přímo souřadnice, ale souřadnicové rozdíly formou polohového vektoru.

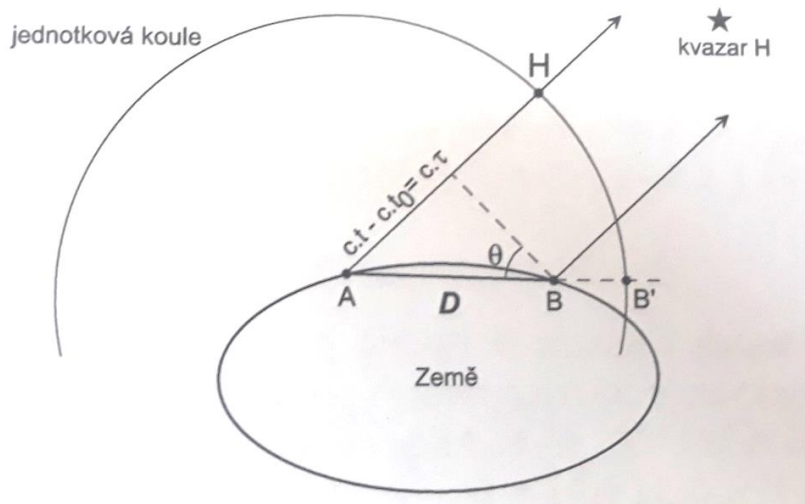
Čas na jednotlivých stanicích je realizován pomocí několika atomových hodin a mezi stanicemi je synchronizován pomocí družic GNSS. Na každé stanici je zaznamenán čas příjmu signálu, moment zachycení čela vlny signálu. Přesný čas je určen pomocí atomových hodin a je zaváděna korekce z chodu hodin. Nasbíraná data jsou digitalizována, to znamená převedena na 0 a 1 a uložena na záznamové zařízení.

V **korelátoru** dojde k načtení digitálních dat z média, na která byla data uložena. Pak se provádí porovnání dat (korelace – viz vztah (12)) ze 2 stanic tvořících základnu. Z časového rozdílu τ mezi zachycením vlny přijímačem A a přijímačem B a ze známé rychlosti šíření signálu c je určen rozdíl vzdálenosti.

Výstup korelátoru pro geodetické aplikace

- a) Časové zpoždění τ a jeho změnu v čase $d\tau/dt$
- b) Frekvence interferenčních proužků F
- c) Fázové posuny – fáze časového zpoždění

cítace 3 výstup korelátoru [3]



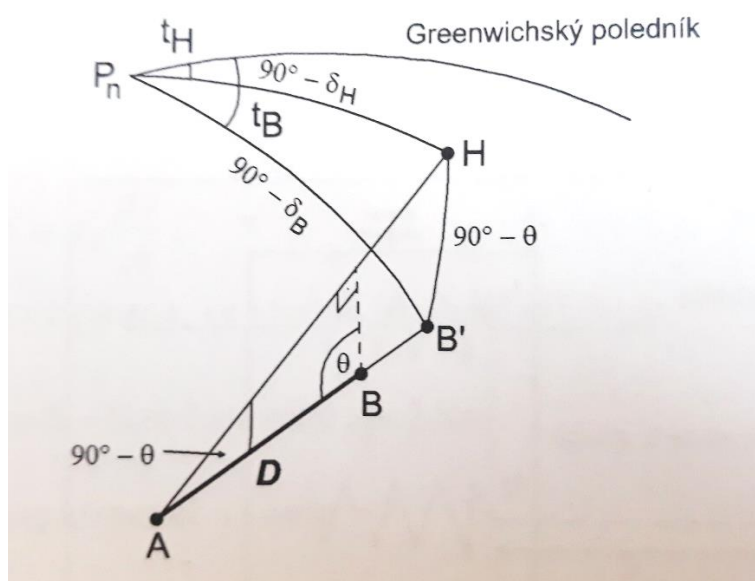
obr. 4 časové zpoždění (dopad signálu na Zemi) – převzato z [3]

Vzhledem k šíření signálu od vzdáleného zdroje všemi směry můžeme považovat dráhy, po kterých se signál šíří za rovnoběžné. Na obrázku (obr.4) je pravoúhlý trojúhelník, ze kterého lze odvodit následující rovnici (13).

$$r(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T S_2(t) S_1(t - \tau) dt \quad (12)$$

$$\tau = \tau_c + \frac{D}{c} \sin\theta \quad (13)$$

Použitím kosinové věty (rovnice 14) ve sférickém trojúhelníku (viz obr.5)



obr. 5 rovnice časové zpoždění (směry) – převzat z [3]

$$\sin\theta = \sin\delta_B \sin\delta_H + \cos\delta_B \cos\delta_H \cos(t_b - t_H) \quad (14)$$

$$t_H = S_{gr} - \alpha_H \approx \Omega t + \alpha_H \quad (15)$$

Dosazením rovnic (rovnice 14) a (rovnice 15) do vztahu (rovnice 13) získáme tuto rovnici

$$\tau = \tau_C + \frac{D}{c} [\sin\delta_B \sin\delta_H + \cos\delta_B \cos\delta_H \cos(t_B - \Omega t + \alpha_H)] \quad (16)$$

$$\tau_C = A_1 + A_2 t \quad (17)$$

- S1, S2 čas dopadu čela vlny na anténu 1 a 2
- 2T časová konstanta integrátoru
- t čas
- **t_B, t_H hodinový úhel antény B** a kvazaru H
- c rychlost světla
- **D délka základny**
- τ časové zpoždění
- τ_C vliv synchronizace hodin na stanici 1,2 na časové zpoždění
- **A₁, A₂ synchronizace atomových hodin**
- **α_H rektascenze kvazaru**
- Ω rychlost rotace Země
- **δ_B, δ_H deklinace = směr k anténě B a ke kvazaru H**
- S_{gr} Greenwichský hvězdný čas

V rovnici č. 16 se nacházejí všechny veličiny, které lze určit metodou VLBI:

- směr a délka základny,
- směr k rádiovému zdroji
- obě stanice tvořící základnu spojeny s rotující Zemí a rádiový zdroj je v inerciálním nebeském systému, je tedy možno určovat parametry transformace mezi oběma systémy, což jsou parametry orientace Země (EOP)

Rovnice frekvence interferenčních proužků (rovnice 18) s veličinou f₀, tedy střední frekvencí pásma.

$$F = f_0 \frac{\partial \tau}{\partial t} \quad (18)$$

Po derivaci časového zpoždění podle času získáme následující rovnici.

$$F = f_0 \left[\frac{\partial \tau_C}{\partial t} + \frac{D\Omega}{c} \cos\delta_B \cos\delta_H \sin(t_B - \Omega t + \alpha_H) \right] \quad (19)$$

Vztah pro časové zpoždění (*rovnice 16*) a frekvence interferenčních proužků (*rovnice 19*), po dosazení (*rovnice 17*) obsahují **7 neznámých**. Pro pozorování v 4 různých časech dostaneme 8 rovnic, následně dojde k vyrovnání. Měření však mají několik omezení. Například nízká deklinace není určena spolehlivě vlivem kosinu (*rovnice 16,19*). Není možno určovat základnu D a zároveň polohu rádiového zdroje. V tomto případě by úloha byla neurčitá, protože člen $f_0 A_2$ neobsahuje geometrickou informaci.

5 Porovnání realizací ICRF

5.1 Porovnání realizací

V průběhu let docházelo ke zhuštění množiny kvazarů. Hlavně docházelo k doplnění zdrojů na jižní nebeské polokouli. Přidávání zdrojů a nových měření (observací metodou VLBI) vedlo k zavedení dalších realizací referenčních rámců a jejich rozšíření. Realizace se liší hlavně přesností a velikostí množiny kvazarů, které obsahují. Při zavedení systému ICRF3 byla přidána měření na dalších frekvencích v souvislosti se zaváděním systému VGOS. V porovnání ICRF2 a ICRF3 se může projevit vliv zahrnutí galaktocentrického zrychlení sluneční soustavy.

tabulka 3 počet rádiových zdrojů v jednotlivých realizacích

realizace	D	C	O	celkem
ITRF1	212	294	102	608
ITRF1 ext1				667
ITRF1 ext2				717
ITRF2	295			3414
ITRF3	303			4536

V tabulce č.3 nejsou chybějící údaje známy. V nových realizacích již nejsou zdroje řazeny do kategorií D (Define), C (Candidate) nebo O (Others). ITRF1 navíc obsahuje označení zdrojů, jenž slouží k propojení Hipparcos hvězdného referenčního rámce s ICRS. Je patrný postupný nárůst počtu kvazarů v realizacích rámce. Velký skok je mezi ICRF1ext2 a ICRF2 – skoro o pětinasobek. Nárůst mezi ICRF2 a ICRF3 je 1,3x.

tabulka 4 statistika porovnávání dat

Realizace A	Realizace B	Porovnané	Přidané	Vyřazené
ICRF1	ICRF1 ex1	608	59	0
ICRF1 ex1	ICRF1 ex2	667	50	0
ICRF1 ex2	ICRF2	710	2704	7
ICRF2	ICRF3 SX	3403	1125	11

Příklad zdroje s největším počtem observovaných párů časového zpoždění (Number of pairs of delay) v realizaci ICRF1. Hodnoty ve sloupci Uncertainty (σ_{RA} , σ_D) jsou považovány za hodnotu směrodatné odchylky dané souřadnice.

tabulka 5 data kvazaru J055530.8+394849 ve všech realizacích

realizace	kategorie	RA [h m s]	σ_{RA} [s]	D [° ' "]	σ_D ["]
ICRF1	C	5 55 30.805608	0.000022	39 48 49.16500	0.00026
ICRF1 ex1	-	5 55 30.805608	0.000017	39 48 49.16500	0.00025
ICRF1 ex2	-	5 55 30.805610	0.000017	39 48 49.16501	0.00025
ICRF2	D	5 55 30.80561150	0.00000355	39 48 49.1649664	0.0000413
ICRF3 SX	D	5 55 30.80561419	0.00000262	39 48 49.1649683	0.0000304

Jak je patrné z tabulky 5, jednotlivé realizace ICRF se pro konkrétní zdroje liší zejména přesností určení rovníkových souřadnic – rektascenze a deklinace. Jako každá metoda měření je i metoda VLBI zatížena systematickými a náhodnými chybami. Z přesnosti měření lze zákonem přenášení směrodatných odchylek získat přesnost souřadnic, která je součástí informace o každém kvazaru v příslušné realizaci rámce.

tabulka 6 Průměr souřadnicových rozdílů

Realizace A	Realizace B	ΔRA [s]	ΔD ["]
ICRF1	ICRF1 ex1	0.0000090132	-0.0004410855
ICRF1 ex1	ICRF1 ex2	0.0001010390	-0.0058294903
ICRF1 ex2	ICRF2	-0.0000176789	0.0000117555
ICRF2	ICRF3 SX	-0.0000611872	-0.0008430383

tabulka 7 Aposteriorní výběrová směrodatná odchylka rozdílu souřadnic

Realizace A	Realizace B	$\sigma_{\Delta RA}$ [s]	$\sigma_{\Delta RA}$ ["]
ICRF1	ICRF1 ex1	0.0006630346	0.0064268783
ICRF1 ex1	ICRF1 ex2	0.0025677903	0.1591490303
ICRF1 ex2	ICRF2	0.0006089423	0.0036004991
ICRF2	ICRF3 SX	0.0028128471	0.0693213507

V tabulce 6 je průměr rozdílů rektascenze a deklinace shodných kvazarů mezi různými realizacemi. Tabulka 7 obsahuje směrodatnou odchylku průměru rozdílů vypočtenou podle vztahu

$$s = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$$

(20)

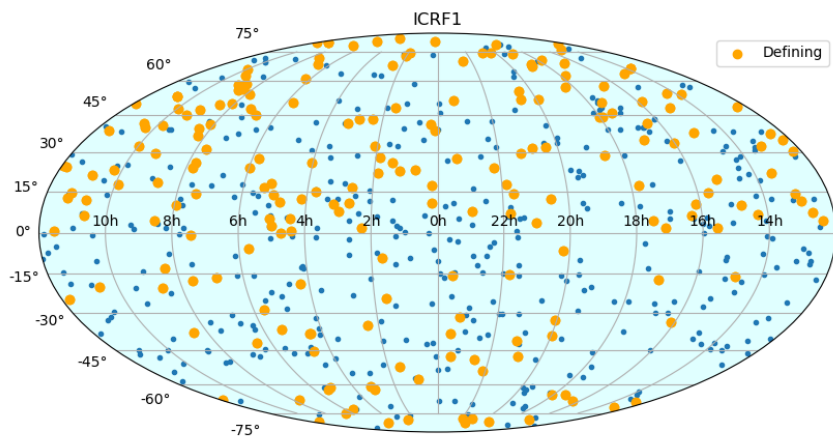
tabulka 8 Překročení přesnosti (přesnost souřadnicového rozdílu < rozdíl souřadnic)

Realizace A	Realizace B	RA	D
ICRF1	ICRF1 ex1	6	3
ICRF1 ex1	ICRF1 ex2	4	6
ICRF1 ex2	ICRF2	23	18
ICRF2	ICRF3 SX	410	385

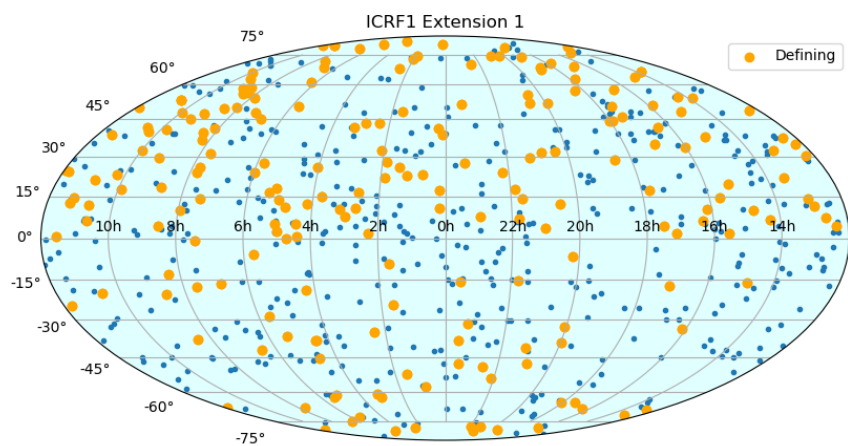
V tabulce 8 je shrnut počet případů, kdy rozdíl souřadnic překračuje směrodatnou odchylku.

5.2 Rozmístění zdrojů

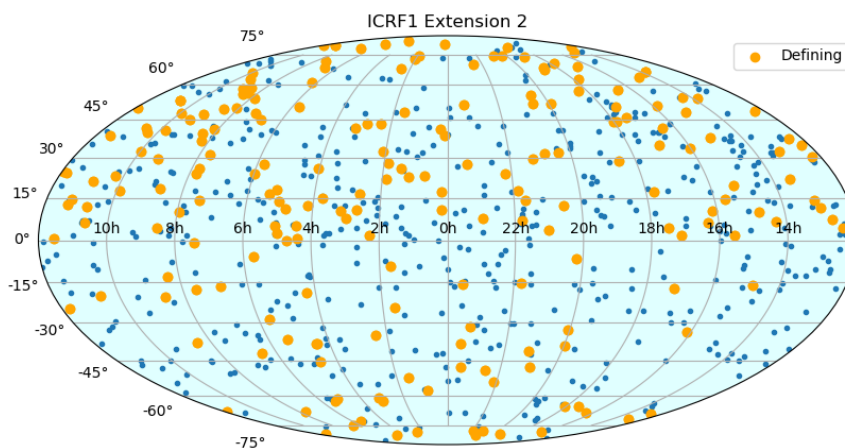
Pohled na rozmístění rádiových zdrojů s barevným odlišením kategorie Define.



obr. 6 ICRF1 – převzato z <https://hpiers.obspm.fr/ics-pc/newwww/icrf/icrf1.png>

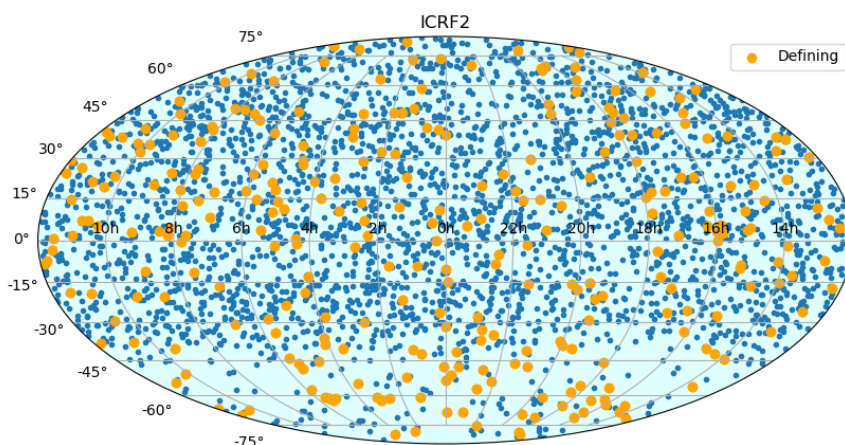


obr. 7 ICRF1 extension1 – převzato z <https://hpiers.obspm.fr/ics-pc/newwww/icrf/icrf1ext1.png>



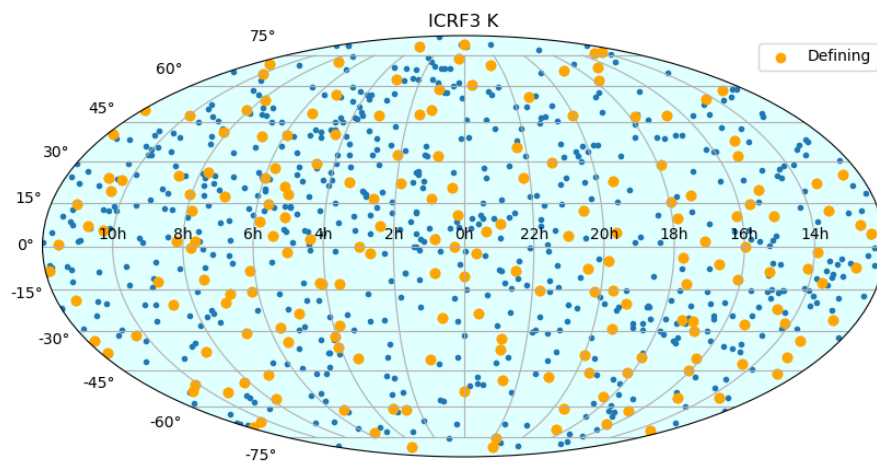
obr. 8 ICRF1 extension2 – převzato z <https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/icrf1ext2.png>

Mezi ICRF1 extension 2 a ICRF2 došlo ke značnému nárůstu počtu radiových zdrojů. Vhodné zdroje byly přesunuty do skupiny Define.

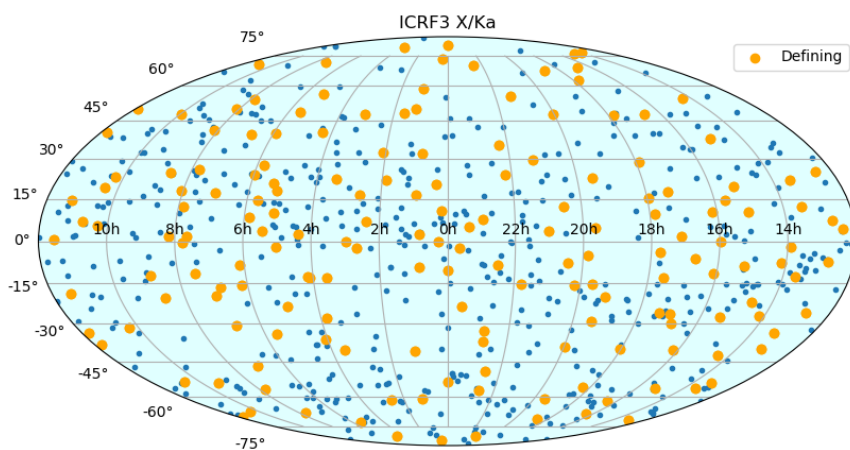


obr. 9 ICRF2 – převzato z <https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/icrf2.png>

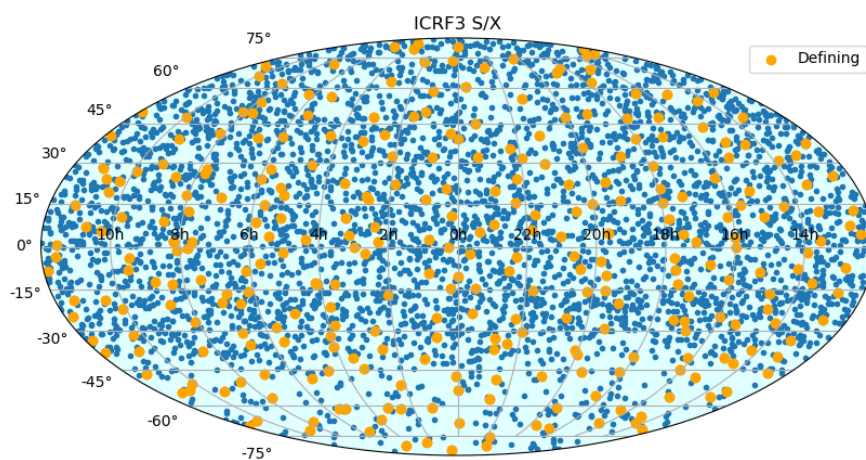
V ICRF3 měřeno více frekvencí. Některé rádiové zdroje měřeny všemi frekvencemi, jiné dvěma či pouze jednou. Nejvíce zdrojů však je ve frekvenčních pásmech S/X odpovídající měřením v předchozích realizacích.



obr. 10 ICRF3 v pásnu K – převzato z <https://hpiers.obspm.fr/icsr-pc/newwww/icrf/icrf3k.png>



obr. 11 ICRF3 v pásmech X/Ka – převzato z <https://hpiers.obspm.fr/icsr-pc/newwww/icrf/icrf3xka.png>



obr. 12 ICRF3 v pásmech S/X – převzato z <https://hpiers.obspm.fr/icsr-pc/newwww/icrf/icrf3sx.png>

6 Program

6.1 Porovnání dat – program

Data

Z webu [6] byly staženy soubory s daty ICRF1, ICRF1 Extension1, ICRF1 Extension2, ICRF2 ve formátu txt. Pro ICRF3 byly staženy verze v různých frekvenčních pásmech ICRF3 S/X, ICRF3 K, ICRF3 X/Ka, pro porovnání byl však použit pouze soubor v pásmu S/X odpovídající frekvenci/vlnové délce využívané v minulosti u předchozích realizací. V ICRF2 a ICRF3 jsou přesnější data, uvedena na 8 desetinných míst namísto šesti v předchozích realizacích ICRF1 (viz ukázka v tabulce 5).

Coordinates of all the 608 sources in ICRF

ICRF Designation (1)	IERS Des. (2)	Inf. (3)	Right Ascension J2000.0	Declination J2000.0
		c X S H	h m s	o ' "
ICRF J000435.6-473619	0002-478	C	0 4 35.655596	-47 36 19.60356
ICRF J000557.1+382015	0003+380	D	0 5 57.175409	38 20 15.14857
ICRF J000613.8-062335	0003-066	C 3 1	0 6 13.892887	- 6 23 35.33485
ICRF J001031.0+105829	0007+106	D	0 10 31.005888	10 58 29.50412
ICRF J001033.9+172418	0007+171	D	0 10 33.990619	17 24 18.76135
ICRF J001052.5-415310	0008-421	C	0 10 52.519641	-41 53 10.78780
ICRF J001101.2-261233	0008-264	C	0 11 1.246752	-26 12 33.37686
ICRF J001331.1+405137	0010+405	D 2 1	0 13 31.130213	40 51 37.14407

Uncertainty R.A. s	Dec. "	Corr. RA-Dc	Mean MJD of observation	First MJD	Last MJD	Nb sess.	Nb del. (4)
0.000079	0.00097	.019	49435.5	49330.5	49524.7	3	7
0.000041	0.00051	-.041	49087.0	48720.9	49554.8	2	41
0.000019	0.00034	-.575	48728.1	47176.5	49565.9	41	114
0.000032	0.00068	.540	47938.9	47288.7	49690.0	10	74
0.000021	0.00035	-.402	48730.8	47931.6	49662.8	19	57
0.000652	0.00728	-.548	48551.8	48162.4	49330.5	2	6
0.000035	0.00040	-.427	48892.4	47686.1	49790.7	7	38
0.000026	0.00034	-.038	49549.6	48434.7	49820.5	7	219
0.000020	0.00037	-.675	48920.3	47394.1	49611.9	27	116
0.000121	0.00026	.012	49505.2	47023.7	49924.8	78	1453
0.000093	0.00039		48894.7	47165.8	49750.8	411	21652

obr. 13 ukázka dat ICRF1.txt

Úpravy a zpracování

Soubory byly upraveny, určeny datové typy, např. pro název obsahující znaménko, číslice i písmena jako řetězec znaků. Odstraněny sloupce se znakem # pro zdroje vhodné jako D (Define) v nadcházející realizaci. Provedena kontrola číslic, z důvodu zarovnání souřadnic program Matlab nenačetl některé hodnoty (např. - 6 xx xxx.xx ručně tedy upravena čísla, tak, aby obsahovala stejný počet znaků, ale nebyla chybně vyřazena z číselného formátu kvůli mezeře, tedy formátem -06 xx xxx.xx)

Funkce programu

Načtení tabulky a matice. Pro každý soubor jsou jiné indexy sloupců. Pomocí funkce stringcompare porovnány řetězce, tedy sloupce s názvy zdrojů ze souboru A a B. Funkcí find dohledán index, tedy číslo řádku shody řetězců. Použita podmínka pro vyloučení zdrojů obsažených pouze v jednom souboru. Provedena statistika z velikosti matic: počet porovnaných, vyřazených a přidaných dat. Pomocí získaných indexů – tedy procházení souboru A a vyhledaných v souboru B – byla vytvořena matice souřadnic a jejich přesností. Souřadnice v šedesátinné míře převedeny na nejmenší jednotku (s ,“) a vypočten rozdíl.

V tabulkách č. 9 a 10 jsou uvedeny příklady velkých souřadnicových rozdílů.

tabulka 9 zdroj J175559.7+182021 (graf1)

	A = 1e1	B= 1e2	Rozdíl souřadnic
RA	17 55 59.717551	17 55 59.781951	0.0643999999956577
sigRA	0.045536	0.001023	-0.044513
D	18 20 21.77756	18 20 17.67132	-4.10624000000826
sigD	0.28574	0.00878	-0.276960

tabulka 10 zdroj J011651.5-205210 (graf2)

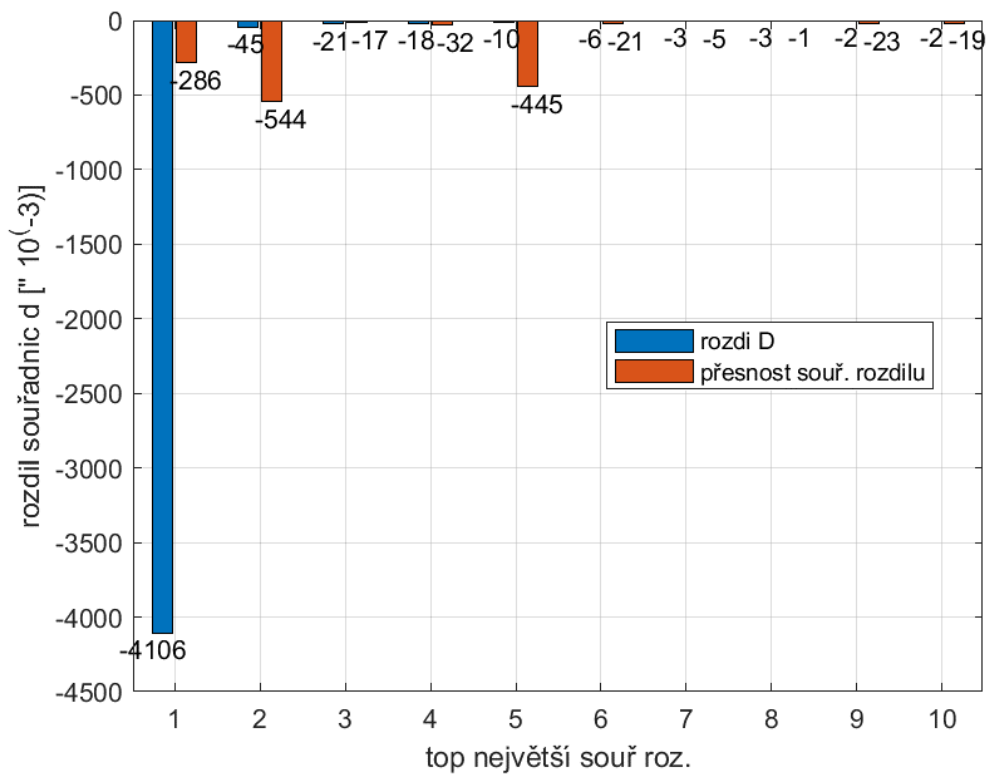
	A = 2	B= 3sx	Rozdíl souřadnic
RA	01 16 51.56103995	01 16 51.40488104	-0.15615891
sigRA	0.01036400	0.00026008	-0.01010392
D	-20 52 10.8021857	-20 52 06.8906316	-3.91155409
sigD	0.2626178	0.0034416	-0.25917620

6.2 Grafy

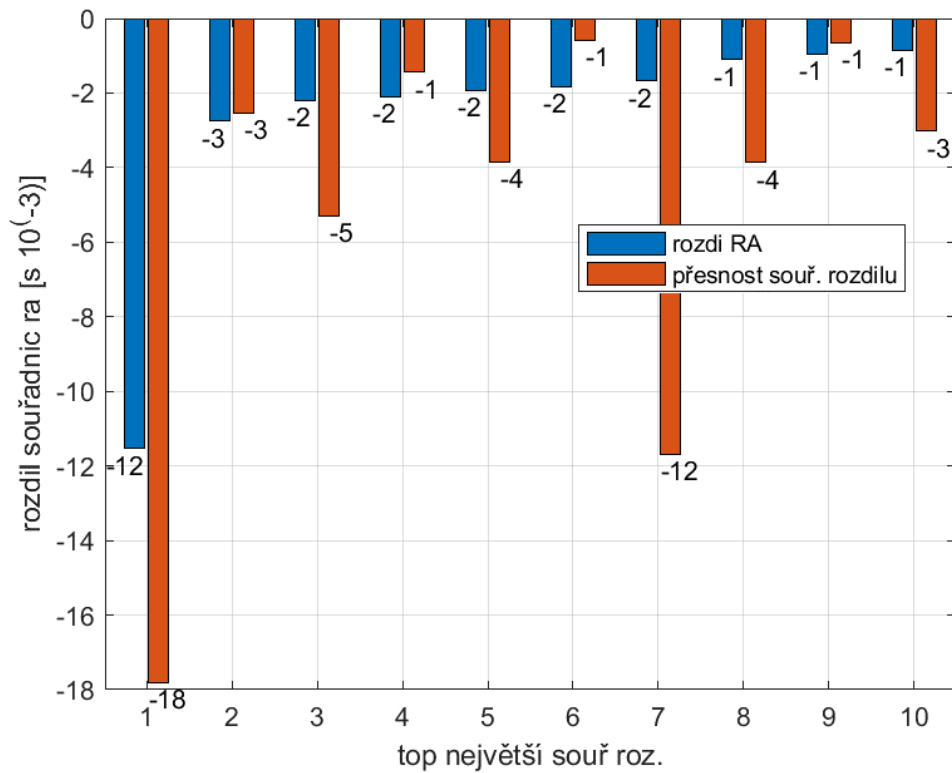
Rozdíly souřadnic mezi realizacemi A a B jsou zobrazeny graficky. Jeden graf je pro RA (rektascenzi) a druhý pro D (deklinaci). Z důvodu velkého množství dat jsou v grafu zobrazeny pouze zdroje s největším souřadnicovým rozdílem. Zároveň byla data porovnána se směrodatnou odchylkou rozdílu souřadnic. Popisky dat jsou zaokrouhlené hodnoty. Znaménko rozdílu souřadnic určuje znaménko směrodatné odchylky rozdílu souřadnic (rovnice 21), za účelem snadnějšího vykreslení grafu a optického porovnání.

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (21)$$

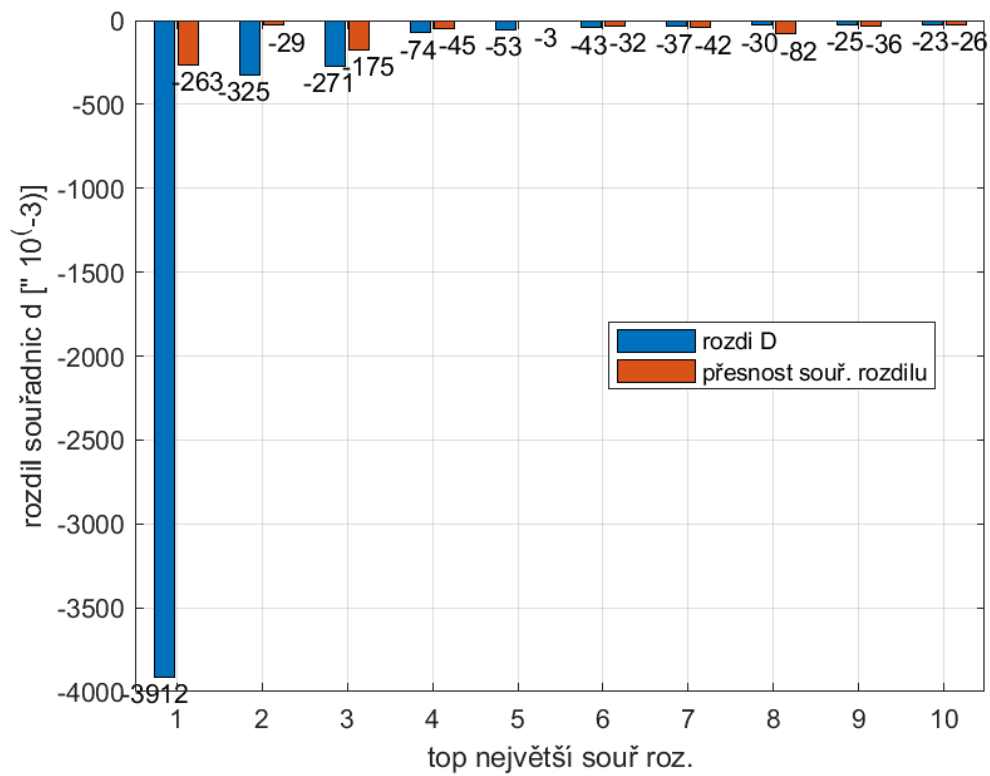
Velkosti chyb byly pro další statistiky rozděleny do histogramu. Z něj vyplývá, že malé rozdíly jsou výrazně četnější než ty velké. Následuje ukázka grafů souvisejících s hodnocením porovnání realizací. Ostatní grafy a histogramy jsou uloženy v příloze.



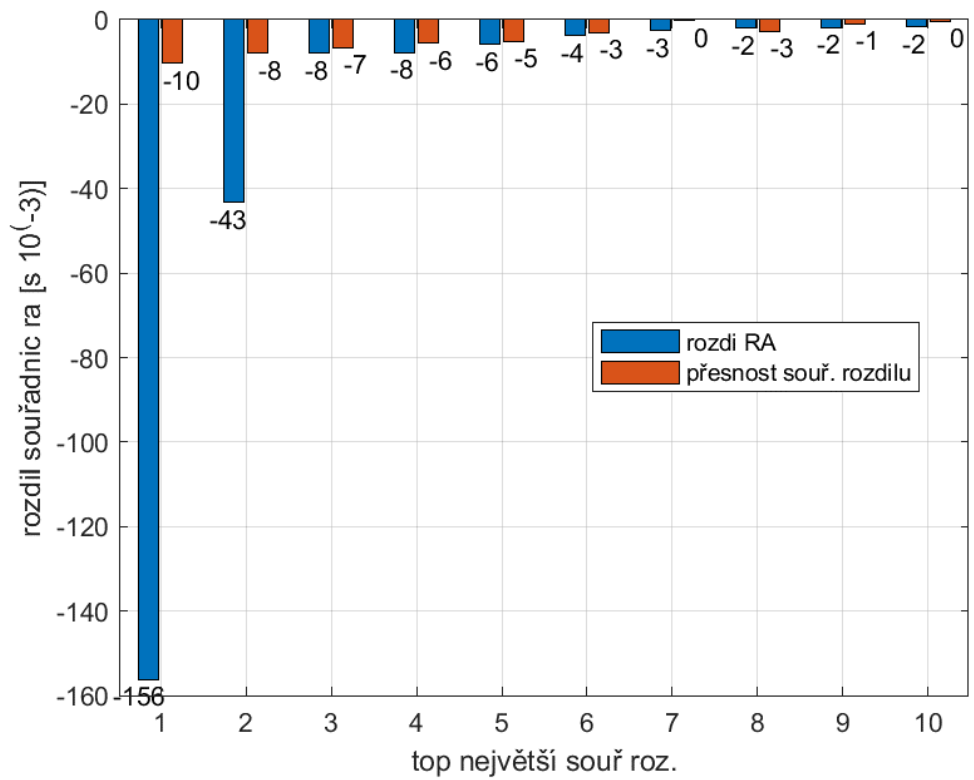
graf 1 porovnání ICRF1ex1 a ICRF1ex2 top10 rozdílů deklinací



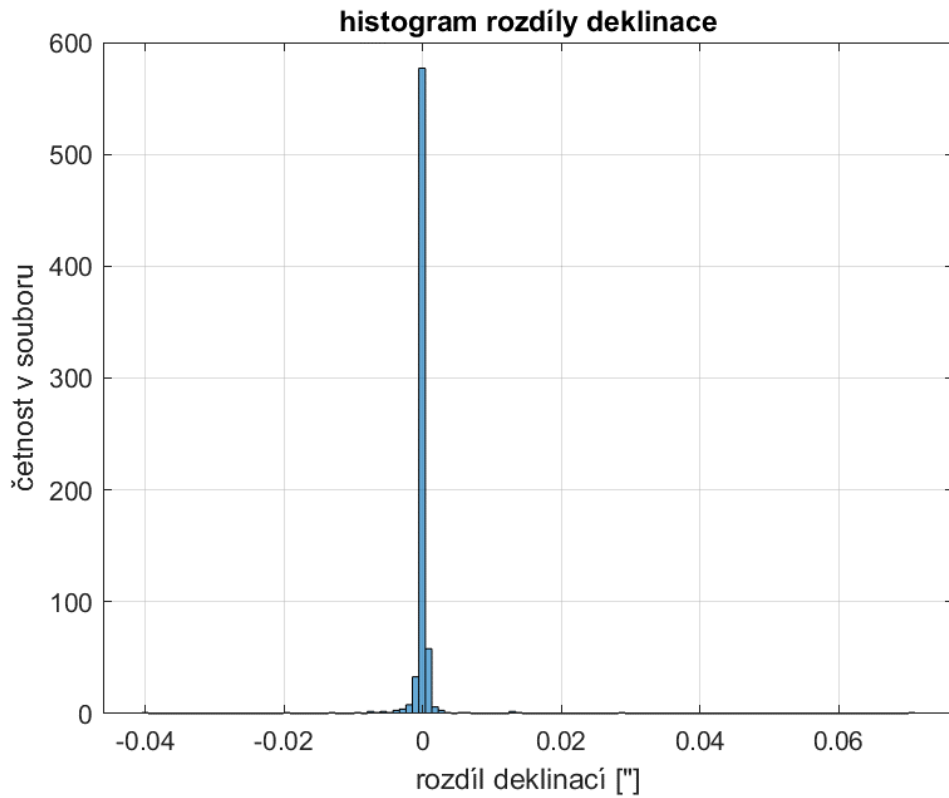
graf 2 porovnání ICRF1ex2 a ICRF2 top10 rozdílů rektascenzí



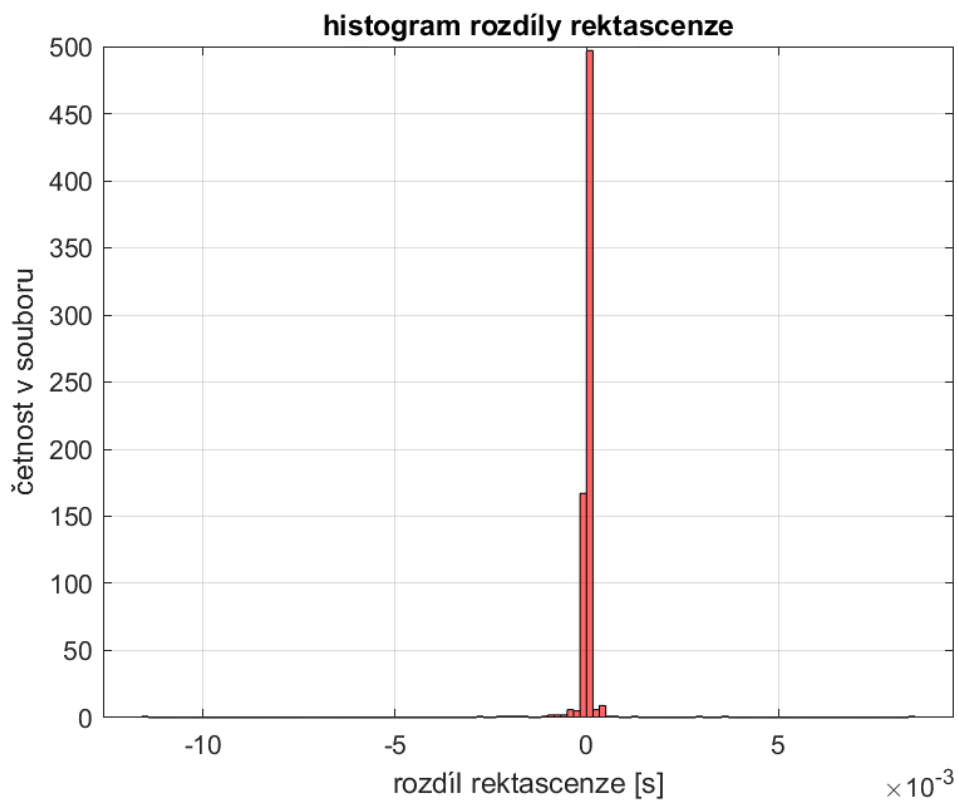
graf 3 porovnání ICRF2 a ICRF3sx top10 rozdílů deklinací



graf 4 porovnání ICRF2 a ICRF3sx top10 rozdílů rektascenzí



graf 5 histogram rozdíl deklinací pro porovnání ICRF1ex2 a ICRF2



graf 6 histogram rozdíl rektascenzí pro porovnání ICRF1ex2 a ICRF2

7 Závěr

7.1 Výsledky porovnání

Bylo zpracováno chronologické porovnání, byly tedy porovnávány po sobě jdoucí realizace. Porovnání lze provést pouze u dat (souřadnic kvazarů) obsažených v obou souborech.

ICRF1 extension1 oproti ICRF1 byl rozšířen o 59 zdrojů, žádný nebyl vyřazen (*tabulka 4*). Bylo nalezeno 6 překročení přesnosti souřadnicových rozdílů pro deklinaci a 3 pro rektascenzi (*tabulka 8*). Z histogramů je patrné, že rektascenze má menší souřadnicové rozdílů než deklinace. Potvrzením tohoto tvrzení je průměr rozdílů rektascenze, který je o dva řády menší u deklinace (*tabulka 6*).

Z porovnání ICRF1 extension1 a ICRF1 extension2 byly zjištěny pro deklinaci malé rozdílů s několika výjimkami. Jeden velmi velký rozdíl deklinace, větší než 4" (*tabulka 9*). Tento případ je ukázkou překročení přesnosti (*graf 1*). Toto porovnání má největší průměrný rozdíl souřadnic (*tabulka 6*).

Základním rozdílem mezi ICRF1 extension2 a ICRF2 je, že v souborech ICRF2 jsou přesnější data, která jsou uvedena na více desetinných míst. Došlo ke značnému nárůstu počtu radiových zdrojů, tedy i chyb a množství nepřesných dat (*graf 5,6*). Jeden větší rozdíl nastal u souřadnic v rektascenzi (*graf 2*). V tomto grafu je hned několik souřadnicových rozdílů, které překročily přesnost (*rovnice 21*). Toto porovnání má u obou souřadnic nejmenší aposteriorní směrodatnou výběrovou odchylku rozdílu souřadnic (*tabulka 7*).

V dalším případě byly porovnány realizace, obě v pásmech S/X, ICRF2 a ICRF3sx. Byl nalezen jeden velký rozdíl v deklinaci (*tabulka 10*) a dva větší rozdílů v rektascenzi. Velké rozdílů souřadnic často překračují přesnost (*graf 3,4*). Z porovnání grafu č.3 a č.4 je patrné, že rozdílů souřadnic u rektascenze jsou menší než u deklinace.

7.2 Závěr práce

Vznik nových realizací je ovlivněn pozorováním nových extragalaktických zdrojů. Než je schválena a uvedena v platnost nová realizace, je provedeno mnoho měření a analýz velkého množství dat. Hlavním důvodem pro vznik nových realizací referenčního rámce ICRF je vývoj metod a zpřesňování výsledků. Metodou VLBI získáváme jak informace o vzdálených radiových zdrojích, tak i o planetě Zemi a její geokinematice. Omezením metody je nemožnost přesněji měřit čas. ICRF je zajímavý jak z geodetického, tak astronomického hlediska. Realizace referenčního rámce ICRF vznikly díky celosvětové spolupráci.

V tomto odvětví stále dochází k vývoji. Jednak dochází k rozšiřování technologických možností, taktéž k budování nových radioteleskopů, stanic a center zpracovávajících data. Stejně tak jsou vyvíjeny nové postupy, jako je měření na více frekvencích (např. VGOS). Rovněž zde dochází k uplatnění znalostí o Vesmíru, Mléčné dráze a fyzikálních zákonů (např. teorie relativity). Taktéž se různí modely a pohled na složení atmosféry a jejich vrstev.

Cílem práce bylo porovnat jednotlivé realizace ICRF. Z dostupných dat bylo provedeno chronologické porovnání všech existujících realizací. Součástí práce (v příloze) je naprogramovaný kód v prostředí Matlab, ve kterém bylo porovnání provedeno. Program je univerzální a může být uplatněn i pro další způsoby porovnání. Jedinou podmínkou je úprava a kontrola vstupních dat. Cíle bylo dosaženo a výsledky zapsány do tabulky výstupů (viz. přílohy) a významná data zakreslena do grafů.

Postup navržený v této bakalářské práci může být použit i k porovnání realizací, jež teprve vzniknou. Taktéž jsou v práci popsány metody, které dávají informace o kvazarech pro astronomické účely.

8 Seznam obrázků

8.1 obrázky

obr. 1 rovníkové souřadnice prvního druhu – převzato z [3].....	11
obr. 2 rovníkové souřadnice druhého druhu – převzato z [3]	12
obr. 3 rozmístění stanic VLBI – převzato z https://www.gsi.go.jp/ENGLISH/page_e30214.html	15
obr. 4 časové zpoždění (dopad signálu na Zemi) – převzato z [3]	20
obr. 5 rovnice časové zpoždění (směry) – převzat z [3]	20
obr. 6 ICRF1 – převzato z https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/icrf1.png	25
obr. 7 ICRF1 extension1 – převzato z https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/icrf1ext1.png	25
obr. 8 ICRF1 extension2 – převzato z https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/icrf1ext2.png	26
obr. 9 ICRF2 – převzato z https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/icrf2.png	26
obr. 10 ICRF3 v pásmu K – převzato z https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/icrf3k.png	27
obr. 11 ICRF3 v pásmech X/Ka – převzato z https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/icrf3xka.png	27
obr. 12 ICRF3 v pásmech S/X – převzato z https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/icrf3sx.png	27
obr. 13 ukázka dat ICRF1.txt	28

8.2 grafy MATLAB

graf 1 porovnání ICRF1ex1 a ICRF1ex2 top10 rozdílů deklinací.....	30
graf 2 porovnání ICRF1ex2 a ICRF2 top10 rozdílů rektascenzí.....	30
graf 3 porovnání ICRF2 a ICRF3sx top10 rozdílů deklinací	31
graf 4 porovnání ICRF2 a ICRF3sx top10 rozdílů rektascenzí	31
graf 5 histogram rozdíl deklinací pro porovnání ICRF1ex2 a ICRF2	32
graf 6 histogram rozdíl rektascenzí pro porovnání ICRF1ex2 a ICRF2	32

9 Seznam tabulek

tabulka 1 deklinace ukázka	12
tabulka 2 observace VLBI frekvence (dual-frequency Mark III)	16
tabulka 3 počet rádiových zdrojů v jednotlivých realizacích	23
tabulka 4 statistika porovnávání dat.....	23
tabulka 5 data kvazaru J055530.8+394849 ve všech realizacích	23
tabulka 6 Průměr souřadnicových rozdílů	24
tabulka 7 Aposteriorní výběrová směrodatná odchylka rozdílu souřadnic	24
tabulka 8 Překročení přesnosti (přesnost souřadnicového rozdílu < rozdíl souřadnic).....	24
tabulka 9 zdroj J175559.7+182021 (graf1)	29
tabulka 10 zdroj J011651.5-205210 (graf2)	29

10 Použitý software

MATLAB verze R2020b academic use

11 Přílohy

Přílohy byly nahrány na přiložený disk (CD)

Seznam příloh

- 1) Stažená data (.txt)
- 2) Upravená data (.txt)
- 3) Program (.m/.txt)
- 4) Výstup tabulky (.xlsx)
- 5) Grafy a Histogramy (.bmp)

12 Seznam zdrojů

- [1] International Earth Rotation and Reference Systems, Technical Note 23 [online dokument]. Copyright © [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote23/tn23.pdf?blob=publicationFile&v=1>
- [2] International Earth Rotation and Reference Systems Technical Note 35 [online dokument]. Copyright © [cit. 8.5.2021] Dostupné z: <https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote35/tn35.pdf?blob=publicationFile&v=1>
- [3] **skripta**
- KOSTELECKÝ, Jakub. Globální polohové souřadnicové systémy. V Praze: České vysoké učení technické, 2019. ISBN 978-80-01-06571-6
- [4] The Nobel Prize in Physics 1989 - NobelPrize.org. The official website of the Nobel Prize - NobelPrize.org [online]. Copyright © Nobel Prize Outreach AB 2021 [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1989/summary/>
- [5] NOVÉ DEFINICE ZÁKLADNÍCH JEDNOTEK MEZINÁRODNÍ SOUSTAVY SI | Česká metrologická společnost, z.s. [online]. Copyright © [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.spolky-csvts.cz/cms/content/nove-definice-zakladnich-jednotek-mezinarodni-soustavy-si>
- [6] **Vstupní data ve formátu txt**
- The International Celestial Reference Frame (ICRF) | IERS webové stránky 8.5.2021 Dostupné z: <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ICRF/icrf.html>
- [7] **Soubor ReadMe + obrázky (obr.6-12)**
- The ICRF | IERS ICRS Center webové stránky 8.5.2021 Dostupné z: <https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/newwww/icrf/index.php>
- [8] **skripta**
- ŠVÁBENSKÝ, Otakar a Jan FIXEL. Astronomie a kosmická geodézie. 2., upr. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1990.
- [9] IVS Terms of Reference. IVS Home Page [online]. [cit. 10.05.2021] Dostupné z: <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/about/org/documents/ivsTOR.html>
- [10] A Brief History of Atomic Clocks at NIST | NIST. National Institute of Standards and Technology | NIST [online]. [cit. 10.05.2021] Dostupné z: <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/time-services/brief-history-atomic-clocks-nist>
- [11] IVS Terms of Reference. IVS Home Page [online]. [cit. 10.05.2021] Dostupné z: <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/about/org/documents/ivsTOR.html>