České vysoké učení technické Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague Faculty of Civil Engineering

Doc. Ing. Jaroslav Klokočník, DrSc

<u>Speciální úkoly ve studiu gravitačního pole Země</u> <u>družicovými metodami</u>

Specific tasks to study gravitational field of the Earth by satellite methods

Summary

The author was during his 37 years of work in the Ondřejov observatory at the Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences (formerly Czechoslovak Academy of S.) involved in processing observations of artificial Earth satellites (AES) from a camera and a laser radar, in satellite dynamics of AES, namely in study of the resonant phenomena in the orbits of AES for determination of gravitational field parameters, in navigation of meteorological satellites, in satellite (crossover) altimetry, in an evaluation of the accuracy of the models of gravitational field of the Earth, in some questions of archaeoastronomy of Mesoamerica and South America, and in the last few years, also in satellite gradiometry – preparing for the GOCE mission (satellite was launched by ESA in spring 2009). Habilitation work from 2000 dealt with satellite altimetry. This work, a professors' lecture, is about comeback of resonances, focused on the orbit analyses of satellites CHAMP and GRACE, and about some topics of satellite gradiometry.

A motivation to analyse the CHAMP orbit to determine the lumped coefficients (linear combinations of the harmonic coefficients of selected orders) was simple one: the satellite passed through the 46/3 resonance and there was an expectation of further resonances, such as 31/2 or 47/3, orbital effect of those were expected to be large. The orbit accuracy in all orbital components was of order centimeters, i.e. up to three orders better than was usual in time of classic studies of resonances (1973-1990). This is why very precise values of the lumped coefficients were expected. The resonant results could by this way calibrate older Earth's gravitational field models and check coefficients of particular orders of the newest models. Moreover, the satellite was manoeuvred to orbits with higher semimajor axis (to prolong satellite lifetime). This led to repeated passages throughout the same resonance, the 31/2 and later 47/3, which has no equivalent in nature. As a consequence it was feasible to determine the particular lumped coefficients repeatedly. Later on, there was a possibility to analyse the orbits of 'twin' satellites GRACE A and B at the 61/4 resonance.

In 2004, we were informed by our US colleagues that the monthly solutions for the variations of the gravitational potential of the Earth, derived from the GRACE A/B measurements, had very variable precison, apparently without any reason. The precison was the lowest in September 2004. A relationship between the density of ground tracks and the passages of studied satellite through a resonance of a low or lower order (31, 46, 61....) has been discovered. When the satellite orbit not affected by rocket motors, decaying due to the atmospheric drag, is passing through a resonance, the ground track density is decreasing and in turn, the accuracy of the derived gravitational parametres from such data is also decreasing. The case 61/4 of the GRACE satellites was on begining of study of this phenomenon; we predicted existence and impact of further resonances (in GRACE orbit). For GOCE satellite, we suggested a fine orbit tuning such that the orbit will avoid proximity to the most important resonance, through which it might pass, the 16/1, and which would result in a degeneration of the accuracy of measurements from the gradiometer. We closely coopearted with the GOCE project manager Rune Floberghagen (ESA, ESRIN, Frascati) at our study of the GOCE orbit selection and thanks to his information we actively cooperated in proposal leading to the final orbit choice for the 1st measuring phase (situation in August 2009). There was then only a step to study the relationship "accuracy – ground track density – resonance" also for planetary orbiters (of the Moon, Mercury, Venus, Mars). For slowly rotating bodies (the Moon, Mercury, Venus) the resonance has another meaning that we are accustomed to think for the Earth (and for Mars).

We continue in SW preparation and in different simulations for future gradiometry data from the GOCE satellite. We have received a grant by ESA, PECS C 98056, and in its frame we present, among others, checking detection of the impact (meteoritic) structures (craters) on the Earth using the newest Earth's gravitational model EGM 08 (with 5x5 arcmin resolution). At this opportunity, we have discovered new candidates for multiple impact structures.

Souhrn

Autor se v průběhu 37 let práce v Astronomickém ústavu AV ČR (dříve ČSAV) v Ondřejově zabýval zpracováním pozorování umělých družic Země (UDZ) z fotografické kamery a laserového dálkoměru, dráhovou dynamikou UDZ, zejména studiem rezonančních jevů v drahách UDZ pro určení parametrů gravitačního pole, navigací meteorologických družic, družicovou (diferenciální) altimetrií, testováním přesnosti modelů gravitačního pole Země, některými otázkami archeoastronomie střední a jižní Ameriky a v posledních letech také družicovou gradientometrií - přípravou na misi GOCE (družici vypustila ESA na jaře 2009). Habilitační práce z r. 2000 se zabývala družicovou altimetrií. Tato práce, profesorská přednáška, je o comebacku rezonancí se zaměřením na analýzy drah družic CHAMP a GRACE a o některých tématech družicové gradientometrie.

Motiv k analýze dráhy družice CHAMP pro určení lumped koeficientů (lineárních kombinací harmonických koeficientů vybraných řádů) byl prostý: průchod družice rezonancí 46/3 a výhled na další rezonance jako je 31/2 nebo 47/3, jejichž dráhový efekt lze čekat značný. Přitom přesnost dráhy je ve všech složkách dráhy v rámci centimetrů, čili až o tři řády lepší než bývalo v dobách klasických studií rezonančních jevů (1973-1990). Proto se očekávaly velmi přesné hodnoty lumped koeficientů. Rezonanční výsledky tak mohly kalibrovat starší modely gravitačního pole Země a kontrolovat koeficienty vybraných řádů u nejnovějších modelů. Navíc družice dostala povely ke dráhovým manévrům, které opakovaně zvýšily hlavní poloosu dráhy (aby prodloužily její životnost ve dráze). Tím došlo k opakovaným průchodům rezonancí 31/2 a později 47/3, což v přírodě neexistuje. V důsledku toho bylo možno určit příslušné lumped koeficienty opakovaně. Posléze se naskytla možnost analyzovat dráhy dvojice družic GRACE A a B v období rezonance 61/4.

V r. 2004 jsme byli americkými kolegy informováni o tom, že jednoměsíční řešení pro variace gravitačního potenciálu Země určované z měření družic GRACE A/B měla velmi proměnlivou přesnost, zdánlivě bez důvodu. V září 2004 byla přesnost nejnižší. Ukázalo se propojení mezi přesností řešení, hustotou průmětů dráhy na zemský povrch a průchodem studované družice dráhovou rezonancí nízkého či nižšího řádu (31, 46, 61...). V období, kdy se raketovými motorky neovlivňovaná dráha družice díky brzdění o atmosféru dostane do průchodu rezonancí, sníží se hustota ground tracks a tím i přesnost určovaných gravitačních parametrů. Případ 61/4 družic GRACE byl na začátku studia tohoto fenoménu; předpověděli jsme výskyt a dopad dalších rezonancí. Pro družici GOCE jsme navrhli jemné dolaďování dráhy tak, aby se vyhnula nejvýznačnější rezonanci, do které by se mohla dostat, 16/1, a která by zdegradovala přesnost měření z gradientometru. Při studiu výběru dráhy GOCE jsme úzce spolupracovali s vedoucím projektu Rune Floberghagenem (ESA ESRIN, Frascati) a díky

jeho informacím se aktivně zúčastnili návrhů, které vedly k definitivnímu výběru dráhy pro první měřickou fázi (stav v srpnu 2009). Odtud byl jen krok ke studium vztahu "přesnost řesení - hustota ground tracks - rezonance" i pro planetární orbitery (Měsíc, Merkur, Venuše, Mars). U pomalu rotujících těles (Měsíc, Merkur, Venuše) je rezonance něčím jiným než jsme zvyklí u Země (a u Marsu).

Pokračujeme v přípravě softwaru a v různých simulacích pro zpracování budoucích gradientometrických dat z družice GOCE. Získali jsme grant ESA PECS C 98056 a v jeho rámci se věnujeme m.j. i kontrolní detekci impaktních (meteoritických) struktur (kráterů) na Zemi pomocí nejnovějšího modelu gravitačního pole Země EGM 08 (s rozlišením 5x5'). Při té příležitosti jsme objevili možné kandidáty na násobné impaktní struktury.

Klíčová slova

družicová dynamika, umělé družice Země, tíhové/gravitační pole Země, dráhové rezonance, hustota průmětů dráhy družice na zemský povrch, CHAMP, GRACE, GOCE, PECS, družicová altimetrie, družicová gradientometrie, jemné dolaďování dráhy GOCE

Keywords

satellite dynamics, Earth artificial satellites, gravity/gravitational field of the Earth, orbit(al) resonances, density of satellite ground tracks, CHAMP, GRACE, GOCE, PECS, satellite altimetry, satellite gradiometry, fine tuning of GOCE orbit

Obsah

1. Úvod	6
2. Dráhové rezonance umělých družic Země 1	2
2.1. Klasické práce	2
2.2. Výsledky s novými družicemi CHAMP a GRACE 1	3
3. Aplikace rezonancí při studiu přesnosti určení	
parametrů gravitačního pole planety z družicových dat 1	5
3.1. Nástup družicové gradientometrie	5
3.2. Přesnost určení variací parametrů gravitačního pole z GRACE	8
3.3. Poučení z GRACE pro GOCE a ovlivnění výběru dráhy pro GOCE 1	9
3.4. Aplikace pro družice Marsu, Měsíce, Merkuru a Venuše 2	1
4. Projekt PECS C 98056	7
5. Závěr a výhled do budoucnosti	8
6. Poděkování	8
7. Literatura	2
8. Vědecký životopis	5

1. Úvod

Předkládaná přednáška zahrnuje dva okruhy z několika okruhů prací uchazeče v oblasti dráhové dynamiky umělých družic Země (UDZ), t.j. aplikované nebeské mechaniky, a to *dráhové rezonance* a *družicovou gradientometrii*. Tyto dva studijní body spolu nesouviseji jen zdánlivě. Souvislosti v následujícím textu vysvětlíme.

"*Rezonance"* znamená souměřitelnost frekvencí dvou jevů. V přírodě najdeme řadu příkladů a ve vědě a technice řadu aplikací. V případě dvou těles ve sluneční soustavě k "rezonanci" dochází velmi často (Příroda jakoby rezonanční stavy vyhledávala), například tehdy, když oběžné doby dvou měsíců planet kolem planety samotné jsou v poměru celých čísel. "Velkou nerovností" v pohybu planet myslí nebeská mechanika fakt, že Jupiter oběhne kolem Slunce (vzhledem k "neměnnému" hvězdnému pozadí) právě pětkrát zatímco Saturn právě dvakrát a to vyvolá velké poruchy jejich drah, onu velkou nerovnost. Podobně existují rezonanční stavy mezi rotací a oběžnou dobou jako je všeobecně známý případ našeho Měsíce, který se otočí jedenkrát kolem své osy zatímco kolem Země oběhne právě také jednou dokola.

Rezonance umělých družic Země (UDZ) nastává, když družice uskuteční β nodálních oběhů (od uzlu dráhy k témuž uzlu) za α hvězdných dnů. Takovou rezonanci označíme jako β/α nebo β : α (α , β čísla celá nesoudělná, poměr β/α neredukovatetelný).

Geometrický význam takovéto rezonance je ten, že po β obězích za α dnů se dráha družice přesně opakuje vůči Zemi (pozorovateli na zemském povrchu), tj družice pak přelétá nad týmiž subsatelitními body. Tento stav, když by jednou nastal a nepůsobily by ve dráze družice ostatní poruchy, hlavně ty nekonzervativní, negravitačního původu, jako je odpor atmosféry a tlak slunečního záření, by trval navěky.

Fyzikální smysl rezonance je, že v ní a v její blízkosti vypadají dráhové poruchy jinak než "dostatečně daleko" od ní. Například malé krátkoperiodické poruchy dráhy působené teserálními harmonickými geopotenciálními koeficienty (v rozvoji gravitačního potenciálu Země v řadu kulových funkcí) se v dráhové rezonanci změní na "velké" pseudosekulární.

Matematický význam rezonance poznáme v pohybových rovnicích jako případ "malého jmenovatele". Analytická teorie prvního řádu v případě exaktní rezonance selže. V praxi to nevadí, neboť dnes se dráhy UDZ integrují numericky a tam žádná rezonance není na překážku.

V reálném případě UDZ jen rezonancí projde a dráha se vyvíjí především díky odporu atmosféry a kontrahuje dál. V každém okamžiku najdeme nějaká čísla celá nesoudělná α a β , takže teoreticky je družice "každou chvíli" v nějaké rezonanci. Praktický význam ale mají jen ty rezonance, kde β/α jsou čísla malá, např 15/1 nebo 127/10.

První příklad spadá do kategorie rezonancí, které mohou ve dráze vyvolat zvláště markantní poruchy (např. pseudosekularní poruchy ve sklonu roviny dráhy k rovině rovníku a v excentricitě dráhy) a byly (či ještě mohou být) použity ke studiu některých parametrů charakterizujicích gravitační pole, spojené s řádem $m = \beta \gamma$ ($\gamma = 1, 2, 3....$) v rozvoji v řadu kulových funkcí.

Druhý případ se změn dráhy příliš netýká, ale je zajímavý v oceánografii ke studium těch jevů, které mají periodicitu kolem jednoho až dvou týdnů - jiné příklady 43/3, 502/35,.... Takové rezonanční dráhy se pak vyhledávají, volí a udržují (občasným zásahem raketovými motorky proti vlivu odporu atmosféry) pro aplikace v oceánologii, glaciologii a dalších disciplinách. Dokonce jsou známy případy, kdy se geodeti studující gravitační pole z dat altimetrických družich, kteří se případné rezonanci nízkého řádu β chtějí vyhnout, aby měli co nejjemnější pokryt zemského povrchu altimetrickými měřeními, "podělili" s ostatními specialisty o jednu družici a ta byla určitou dobu ve

vybraných rezonancích (*Exact Repeat Mission*, ERM) a pak "volně padala" atmosférou (*Geodetic Mission*, GM). Někdy je tudíž rezonance vyhledávaným jevem, jindy naopak nechtěným, záleží na aplikaci.

Studiem dráhových rezonancí s cílem určení či kontroly vybraných parametrů gravitačního pole jsme se zabývali v letech 1975-1990 (např. [1] a [2]) a poté ještě v krátkém comebacku tohoto tématu (díky velmi přesným drahám družic CHAMP (vyslov [čemp], *CHAllenging Minisatellite Payload for geophysical research and application*)) či GRACE (vyslov [grejs], *Gravity Recovery And Climate Experiment*) kolem r. 2005 [3]. Vzorem nám byly americké práce z GSFC NASA (Goddardovo středisko kosmických letů) [4] a anglické z RAE Farnborough Hants (pův. Royal Aircraft Establishment, skupina Dr. D.G. King-Heleho), např. [5], [6]. Jinak postupovali v tehdejší NSR a Francii (např. [7], [8]).

Chod sklonu dráhy v čase před, v blízkosti, přímo v exaktní rezonanci a po ní ukazují obr. 1 a 2, první z klasické práce Goodinovy [9] o rozboru dráhy družice Ariel 3, druhý z české práce o družici Interkosmos 11 [1]. Dráhy postupně kontrahují díky odporu atmosféry, postupně se přibližují té výšce letu, která odpovídá dané rezonanci, zde 15/1 (ve výšce asi 500 km, záleží na sklonu), poruchy ve sklonu se zvětšují a jejich periody prodlužují až v těsném okolí (několika týdnů) exaktní rezonance mají pesudosekulární charakter (jednosměrný nárůst nebo pokles). Pak po exaktní rezonanci se situace "zrcadlově" opakuje. Z velkým poruch bylo možné i při tehdy nepřesně určených drahách UDZ dobře určit jisté lineární kombinace harmonických koeficientů (Stokesových parametrů) odpovídajících dotyčné rezonanci (zde především 15. popř. 30. řádu). V tom byl zásadní "trik" metody rezonancí využívaný v určovaní nebo pro kontrolu parametrů gravitačního pole (modelů gravitačního pole Země, EM). Sklon se využíval nejvíc, protože je "méně" rušen ostatními vlivy než ostatní dráhové elementy. Největší boom metoda zaznamenala díky pracem z Farnborough v období kolem 1975 – 1990. Zúčastnili se i Češi, např. již zmíněná práce [1] nebo [2], více viz v kap. 2.1.

Z pohybových rovnic nahlédneme, že klasickým rozborem poruch dráhy jedné družice nelze určit přímo Stokesovy parametry charakterizující globální pole, ale jen jisté linearní kombinace těchto veličin, jakési sumy přes stupně pro dané rezonanční řády, pro které se vžil pojem *"lumped koeficienty*" (lumped coefficients, souhrnné, vázané koeficienty). Lineární kombinace jsou "provázány" a "ováhovány" směrem k jednotlivým harmonickým koeficientům pomocí funkcí sklonu dráhy, takže závisejí především na něm a podružně na hlavní poloose dráhy a excentricitě (více k teorii např. v [5], [10], [11]). Teprve kombinací lumped koeficientů z drah družic v téže rezonanci β/α , ale majících co nejrozmanitější sklony drah, lze určit jednotlivé Stokesovy parametry patřičného řádu (řádů), např. [2], [6], aj. Také lze lumped koeficienty použít přímo v EM jakoby šlo o specifická "pozorování". Více v kap. 2.1.

V r. 1988 se uchazeč účastnil v rámci pobytu v DGFI Mnichov příprav k výběru dráhy první evropské altimetrické družice ERS 1 (European Remote Sensing satellite) a později se (2004) k tématu ze zcela nečekaných důvodů vrátil (případ GRACE a GOCE (vyslovuje se [gous] i [goče], *Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*, ESA)). Cílem práce německo-francouzského kolektivu kolem r. 1988 bylo vybrat pro ERS 1 takovou dráhu (čili sklon a hlavní polosu), aby m.j. po potřebnou dobu mohla být "držena" ve zvolených ERM (a to 43/3 a 502/35) a poté v GM. Tehdy jsme vyvinuli postup demonstrovaný grafy jako je ten na obr. 3 (ten je z práce [12] pro ERS 1). Tento typ záznamu "rezonanční historie" k výběru dráhy se ujal. Později jsme jej mnohokrát použili pro další družice a dnes se používá běžně (např. [13]).



Obr. 1 a 2. Chod sklonu roviny dráhy družice Ariel 3 (nahoře) a Interkosmos 11 v blízkosti rezonance 15/1. Střední dráhové elementy byly použity k výpočtu lumped koeficientů 15tého řádu.



Obr. 3. Rezonanční graf pro družici ERS 1 na retrográdní heliosynchronní dráze [12]. Konečný výběr dráhy pro ERS 1 byl: ERM 43/3, poté 502/35 a nakonec GM.

Zatímco určité rezonance jsou pro dráhy některých, například altimetrických družic (alespoň někdy) vyhledávány, pro CHAMP, GRACE a GOCE nejsou vítány a mohou být vážným problémem. U těchto družic bychom jejich výskytu nejraději zabránili. Více o tom v kap. 3.2 - 3.4.

S vypuštěním družic CHAMP a GRACE A/B se ukázala možnost zopakovat si určení lumped koeficientů, jako neplánovaný by-produkt těchto experimentů, k tomu ovšem na úplně nové, mnohem vyšší úrovni přesnosti než v minulosti, což přirozeně vyvolává nutnost přesnějšího modelování nerezonančních poruch dráhy ([3] či [14]). Více o tom v kap. 2.2.

Návrat k tématice dráhových rezonancí měl jeden nečekaný moment. Byl motivován ze zahraničí. Dr. S.Bettadpur (CSR Univ. Texas at Austin a NASA JPL, USA) potřeboval vysvětlit (podzim 2004), proč se přesnost jejich řešení pro variace gravitačního pole [15], [16] výrazně (o řád), ale jen dočasně (posléze se ukázalo, že asi jen na čtvrt roku) zhoršila, aniž by se něco změnilo na kvalitě a počtu dat a způsobu jejich zpracování. Na obr. 4 ukazujeme situaci ex post (Bettadpur, soukr. sdělení, 2004-2006) pro jednoměsíční řešení variací gravitačního pole. Je vynesena přesnost řešení v logaritmické stupnici v závisloti na stupni řešení a čase. Nejhorší situace nastala v září r. 2004.

Vysvětlení se našlo rychle [17]. GRACE v září 2004 prošel rezonancí $\beta/\alpha = 61/4$. Obr. 5a a 5b ukazují a umožňují přímo porovnat hustotu průmětů dráhy GRACE A na zemský povrch (ground tracks) "dostatečně daleko" před touto rezonancí a v ní. Rozdíl je dramatický. Jak se GRACE A/B blížily (společně na stejné dráze, jen s 200 km posunem podél dráhy) k exaktní rezonanci 61/4, začla se hustota jejich ground tracks snižovat, až v této rezonanci dosáhla minima. Vzdálenost průmětů dráhy na rovníku v této situaci byla $D = o/\beta$, kde *o* je obvod rovníku Země. Pro $\beta/\alpha = 61/4$ máme D = 650 km, zatímco půl roku před tím nebo poté bylo *D* jen desítky kilometrů. Kolem rezonance sice máme



Obr. 4. Kolísání přesnosti jednoměsíčních řešení pro variace parametrů gravitačního pole Země, jak byla odvozena z rozboru drah družic GRACE A a B (S. Bettadpur, soukr. sděl. 2004-2006). Datum 200405 čtěte jako "květen 2004", atd. Na ose x jsou stupně rozvoje řešení a na y-ové ose logaritmická stupnice pro střední kvadratickou chybu řešení. Enormní hodnoty chyby bylo dosaženo v září r. 2004. Porovnejte tento obrázek s hustotami průmětů dráhy GRACE na zemský povrch na obr. 5 a,b.



Obr. 5 a, b. Průměty dráhy družice GRACE A na zemský povrch v exaktní rezonanci 61/4 (dole) a daleko před ní, v lednu 2004. K výkladu vztahu přesnosti řešení variací geopotenciálu k hustotám ground tracks a dráhovým rezonancím. Ještě markantnější příklad rozdílu hustoty ground track způsobený blízkostí k rezonanci nízkého řádu je k disposici pro GOCE na obr. 14 a,b.

stejný počet stejně kvalitních měření stejným způsobem zpracovávaných, ale jejich geografické rozložení (v zeměpisné šířce a hlavně v délce), názorně vylíčené obr. 5 a,b, je jiné, mnohem méně "kvalitní", s velkými "děrami" (o velikosti *D* na rovníku) v pokrytí Země. Následně je také podstatně nižší přesnost gravitačních paramterů měsíčních řešení z takových dat odvozených. Rezonance a hustota ground tracks jsou vzájemně svázány a vysvětlují časový průběh přesnosti řešení na obr. 4. Úspěch práce [17] nás motivoval k dalšímu výzkumu, jaké další rezonance s nízkým β a kdy se pro GRACE vyskytnou [18] a jaké poučení z GRACE si máme vzít pro GOCE, kde je situace úplně jiná, kde bude volena dráha se "stabilní" výškou letu během měřických kampaní gradientometru. (Této gradientometrické družici se věnujeme s obzvláštní péčí a připravujeme se na zpracování jejích gradientometrických měření, kap. 4). Nakonec jsme se pustili do aplikací vztahu hustot ground tracks a rezonancí k přesnosti gravitačních parametrů i mimo Zemi, pro družice Měsíce a vybraných planet [19]. Více informací v kap. 3.4.

2. Dráhové rezonance umělých družic Země

2.1. Klasické práce

Definici "dráhové rezonance UDZ" a pojem "lumped koeficient" jsme uvedli v kap. 1 a nyní je využije v přehledu klasických prací o rezonancích. Úplně první rozbor tehdy nečekaných poruch dráhy a chování družice ve dráze ovlivněné průchodem dráhovou rezonancí provedl Gooding [9] a teoreticky rozebral Allan [5], oba z RAE Farnborough, UK.

Následoval úplný "vodopád" podobných prací s cílem zkombinovat lumped koeficienty na Stokesovy parametry příslušných rezonančních řádů, hlavně 15., 14. a 30. Jde o klasickou MNČ (např. [6], [20] nebo o aplikaci kolokací [2]. Tehdy (~1970-1980) byly modely gravitačního pole (jako americké SAO SE 3 či GEM 1-10 nebo německo-francouzské GRIM 1-3) dosti nedokonalé jak co do přesnosti tak i rozlišení (maximalní stupeň a řád typicky 20 až 36, vyšší rozlišení později s příspěvkem terestrických tíhových anomálií, např. EGM 96 [21] do stupně a řádu 360), takže rezonance mohly globální EM vhodně doplňovat: kalibrovat a vylepšovat.

U nás jsme analyzovaly dráhové elementy (hlavně sklon roviny dráhy družice) družic série Interkosmos, např. Interkosmos 11 [1] a také holandské ANS 1 [22]. Povzbuzením pro naši práci bylo setkaní s Dr. D.G. King-Helem a Dr. D.M.C Walkerovou z RAE na konferenci v Lagonissi (1977), kde King-Hele přiznal, že Interkosmos 11 a jeho rezonanci 15/1 zapomněli analyzovat a tak naše práce [1] měla světovou prioritu. Později se nám takový úspěch podařilo zopakovat u souhrnného řešení s kolokacemi pro harmonické geopotenciáoní koeficienty 30. řádu [2] a pak už nikdy. Významné pro mě bylo setkání s významým teoretikem dráhové dynamiky Dr. R.H. Goodingem v r. 1980 v Praze a s Prof. (tehdy Doz.) Ch. Reigberem z DGFI Mnichov (1978) v Maďarsku, který mě k sobě do Bavorska pozval. Trvalo "pouhých" 10 let, než jsem povolení k cestě dostal. Práce v DGFI pak můj odborný vývoj akcelerovaly a nasměrovaly na družicovou altimetrii (což není téma této práce).

Podívejme se do "kuchyně" dráhových analytiků, jak tehdy probíral rozbor vytipované družicové dráhy, která byla nebo měla být postižena nějakou rezonancí. Především se pracovalo s vědomím, že dráhové elementy jsou velmi nepřesné, jak sovětská data Astrosovětu, tak americké NASA Two Line Elements. Proto bylo třeba vyhledat dráhu ovlivněnou rezonancí nízkého řadu (často 15/1) a to podstatným způsobem. Například u Interkosmu 11 [1] byla přesnost dráhy na úrovni stovek metrů napříč dráhy a ±1 km podél dráhy a vliv rezonance 15/1 na sklon na úrovni 10 km. Pak byl sklon "očištěn" o "nerezonanční" poruchy, t.j. hlavně od sekulárního vlivu rotace atmosféry a periodických vlivů gravitačního pole Země a lunisolárních poruch. Poté následovalo vyrovnaní MNČ zkombinované s numerickou integrací, která pracovala bez problémů i v exaktní rezonanci. Neznámými parametry byly lumped koeficienty 15. a 30. řádu [1]. Výsledky pak byly porovnávány s existujícími modely gravitačního pole tak, že s jejich harmonickými geopotenciálními koeficienty potřebného/potřebných řádu/řádů byly pro příslusné dráhové elementy, zde pro družici Interkosmos 11, spočteny lumped koefiicienty. Tak se postupovalo pro různé družice až se jich nakumulovalo alespoň deset pro určení jednotlivých Stokesových parametrů dotyčného rezonančního řádu/řádů, ([2], [6], [20] aj). Za zmínku také stojí, že naše lumped koeficienty byly použity jako malý datový subset při tvorbě modelu GRIM 3 [23].

2.2. Výsledky s družicemi CHAMP a GRACE

Kolem r. 2005 se již zdálo být pozdě zahajovat nové rezonanční analýzy, neboť modely gravitačího pole Země mezitím (hlavně díky altimetrii a družicím jako je CHAMP a GRACE) doznaly řádových zlepšení v přesnosti a rozlišení (např. EGM 96 [21] nebo GRIM 5 ještě bez dat z družice CHAMP [24], např. EIGEN 2, již s nimi [25]). Submetrová přesnost drah družic CHAMP i GRACE slibovala velmi přesné výsledky, o několik řádů přesnější než v "klasickém období" rezonančních analýz. Navíc, v případě družice CHAMP, byla dráha opakovanými dráhovými manévry zvýšena s cílem prodloužit její životnost. Díky tomu ale prošla opakovaně týmiž rezonancemi (obr. 6), což v přírodě není možné. Díky těmto úpravám dráhy bylo možné jednu a tutéž rezonanci analyzovat opakovaně. Historii průběhu sklonu se záznamy o exaktních rezonancích a zvýšeních polosy dráhové elipsy vidíme na obr. 6.

Dráhy CHAMP a GRACE jsou známy v každém okamžiku s prostorovou chybou několik centimetrů. Typická přesnost drah nejstarších altimetrických družic byla půl metru v radiálním směru (dnes jsou to jednotlivé centimetry) a typická družice analyzovaná skupinou ve Farnborough měla dráhu určenou z radarových a optických pozorování na úrovni desítek metrů podél dráhy. V případě tehdejších NASA Two Line Elementů (TLE) nebo sovětských dat z Astrosovětu v Moskvě to bylo ještě horší.



Obr. 6. Historie změn sklonu dráhy družice CHAMP od jejího vypuštění a navedení na dráhu v létě r. 2000 až do konce r. 2007. Díky dvěma dráhovým manévrům (zvýšení dráhy pokaždé asi o 20 km) se nejen prodloužila životnost družice ve dráze, ale podařilo se i to, že prošla opakovaně touž rezonancí, konkrétně 31/2, později díky dalšímu manévru prošla dvakrát rezonancí 47/3. To umožnilo užitečnou kontrolu výpočtu lumped koeficientů.

Zvýšená přesnost dráhových elementů CHAMP a GRACE vyvolala potřebu důkladněji vypočíst (s cílem následně eliminovat) všechny nerezonančních poruchy dráhy. Největší problém dělaly lunisolární poruchy – software od spoluautorů analýz původně z RAE nebo GSFC NASA nedal úplně totéž. Také tvorba středních elementů ze state vektorů či elementů oskulačních obou družic znamenala komplikaci. Nakonec byl problém vyřešen [3] a byly určeny lumped koeficienty 46. 31. a 47. řádu rozborem sklonu družice CHAMP [14] a 61. řádu z GRACE. ([3], [14]). Přesné elementy a jejich dlouhé

(několikaroční) série umožnily získat výsledky konkurující soudobým modelům gravitačního pole Země [26] a kalibrující (pro dotyčně řády) modely Země připravené před využitím dat z misí CHAMP a GRACE [21], [24]. Některé výsledky a porovnání s modely gravitačního pole tehdy existujícími ukazují Tab. 1 a 2. Na obr. 7a je teoretický chod sklonu družice GRACE A v období kolem rezonance 61/4, obr. 7b a c pak ukazuje skutečný střední sklon sloužící k naší analýze. Nicméně role dráhových rezonancí k určování a kontrolování parametrů gravitačního pole již končí, neboť jsou k disposici přesnější a univerzálnější postupy, jako byla a je družicová altimetrie a bude družicová gradientometrie.

Tabulka 1. Lumped koeficienty, v jednotkáchn 10^{-9} , ze sklonu I z průchodu družice CHAMP
rezonancí 31/2 (výška letu = 393 km, I = 87.26°, excentricita dráhy e ~ 0.0025)
sd znamená standard deviation = střední kvadr. chvbu.

C(31,0) sd	S(31,0) sd C(62,0) sd	S(62,0) sd C(93,0) sd	S(93,0) sd zdroj
-16.70 0.14	-9.19 0.15 3.02 0.03	0.68 0.03 -4.62 0.83	2.79 0.75 resonance
-16.72 0.01	-9.21 0.01 3.17 0.01	0.67 0.01 -4.14 0.27 (Eigen-Grace02S)	1.96 0.27 jen GRACE
-16.67 0.41	-9.20 0.41 3.24 0.31	0.68 0.31 -6.30 2.62 (Eigen-3p)	2.33 2.62 jen CHAMP
-17.14 0.76	-8.61 0.76 3.41 0.55 (~30 geodetický	1.28 0.55 -5.15 0.81 ch družic, plus tíhová da	3.01 0.81 EGM 96 ta, 1975-1995)
-16.40 1.49	-7.28 1.50 4.53 1.08 (~30 geodetický	1.30 1.08 -4.50 1.22 ch družic, plus tíhová da	2.16 1.22 GRIM 5C1 ta, 1975-1999)

Tabulka 2. Lumped koeficienty, v jednotkáchn 10^{-9} , ze sklonu I z průchodu družic GRACE (A&B) rezonancí 61/4, 2003-5 (střední výška = 475 km, I = 89.02°, $e \sim 0.0025$).

C(61,0)	sd	S(61,0)	sd	zdroj
-2.96	0.24	-1.76	0.57	resonance
-2.36	0.01	-1.73	0.01	Eigen-Grace02S
-2.59	0.54	-1.89	0.54	Eigen-3p
-7.83	0.75	-3.03	0.75	EGM 96
-6.66	1.46	-1.64	1.46	GRIM 5C1



Obr. 7a. Teoretický průběh sklonu dráhy GRACE A/B v rezonanci 61/4, jak byl numericky integrován s NASA TLE a modelem Eigen-Grace02s [26] . Školní ukázka rezonančního jevu ve dráze UDZ, podobně jako na obr. 1 a 2.



Obr. 7 b,c. Variace sklonu kolem rezonance 61/4 pro družice GRACE (A & B), opravené o lunisolární poruchy. Horní obrázek pro 616 epoch TLE (každý den v půlnoci) objektu GRACE A, spodní pro 620 epoch pro GRACE B. Převzato ze [3].

3. Aplikace rezonancí při studiu přesnosti určení parametrů gravitačního pole planety z družicových dat

3.1. Nástup družicové gradientometrie

Výpočet parametrů gravitační pole z nehomogenních dat (různé typy měření s různou přesností a časoprostorovým pokrytem a rozlišením) je dosti obtížnou záležitostí [21]. Gradientometrická data představují druhé derivace poruchového potenciálu a tím naznačují "nejpřímější" dosud možný postup určení parametrů gravitačního pole. Navíc jsou velmi citlivá k malým lokálním a regionálním anomáliím v zemském gravitačním poli. Podobná měření lze provádět i na zemském povrchu, ale jen ve velmi omezeném rozsahu a s malou přesností (pozemské gradientometry se díky rušivému vlivu okolí moc neosvědčily).

Návrhů na gradientometrické družice bylo více [27], ale teprve mise GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) ESA, připravovaná posledních asi deset roků, vypuštěná na jaře 2009, slibuje skutečná data s bezprecedentní přesností (3 mE), téměř globálním pokrytem (skoro polární dráha) a jemným prostorovým rozlišením (měření každou vteřinu). Více např. na GOCE User Toolbox (GUT) <u>http://earth.esa.int/gut/</u> nebo webových stránkách ESA <u>www.esa.int/SPECIALS/GOCE</u> nebo Sünkel H (ed) 2002: From Eötvös to mGal+, Final Report, ESA/ESTEC Contract #14287/00/NL/DC, <u>www.esa.int/workshops/goce06, a j.</u>

Jak známo, mikroakcelerometr měří veličiny, z nichž lze vypočíst zrychlení v příslušném směru. Představme si dvojici nespojených mikroakcelerometrů ve vzájemné konstantní vzdálenosti na oběžné dráze kolem Země. Na mikroakcelerometry působí různě velká gravitační zrychlení, zatímco zrychlení negravitačního původu jsou prakticky stejně velká. Odečteme rozdíly zrychlení mezi oběma akcelerometry a dostaneme druhé derivace gravitačního potenciálu ve směru spojnice obou akcelerometrů. Připomeňme, že gradienty zrychlení se udávají v jednotkách [E] Eőtvős či EU [Eőtvős Unit]. Platí, že 1 E = 10^{-9} s⁻²; 1 E je změna odpovídající 1 mGal/10 km.

Druhé derivace gravitačního potenciálu tvoří tenzor s devíti složkami, nazývaný Marussiho tenzor. Matice se složkami tenzoru je symetrická díky konzervativnímu charakteru gravitačního pole a součet členů na hlavní diagonále (stopa matice) je rovna nule, neboť ve vnějším prostoru gravitační potenciál splňuje Laplaceovu rovnici. Z toho plyne, že musíme v každém okamžiku měřit právě pět nezávislých (nikoli nutně všech devět) složek tohoto tenzoru, aby měření v daném okamžiku a místě bylo kompletní. K tomu zjevně nestačí jedna dvojice mikroakcelerometrů. Ideální je tzv. kanonický gradientometr s třemi páry mikroakcelerometrů poskytujícími nadbytečná měření (pro určení systematických přístrojových chyb a orientace gradientometru v prostoru). Takový je na palubě GOCE.

Družice GOCE tvarem připomíná doutník o délce 5 metrů a průměru 1 m a nemá žádné pohyblivé díly (obr. 8 a,b). Její hmotnost je 1050 kg (a bude mírně klesat vyčerpáváním paliva pro dráhové korekce a manévry).

Gradientometr se nachází v těžišti družice GOCE. Uspořádání družice, jejích hlavních přístrojů a samotný gradientometr dokumentuje obr. 9. Soupis měřených zrychlení sestavou mikroakcelerometrů je na obr. 10. Rotační prvky jsou určeny z kamer sledujících hvězdy. Tíhové gradienty, tj. složky Marussiho tenzoru se pak z těchto veličin vypočtou. Pro názornost jsou jednotlivé složky určovaného tenzoru seřazeny do trojúhelníkové matice s diagonálou tvořenou složkami V_{xx} , V_{yy} a V_{zz} .



Obr. 8 a,b. Družice GOCE, strana přivrácená ke Slunci (vlevo nahoře). Sluneční panely, anténa GPS pro určení dráhy GOCE, korekční motorky a koutové laserové odrážeče (retroreflektory) pro případné sledování družice pozemskými laserovými dálkoměry (příspěvek k přesnému určení dráhy GOCE).

Strana odvrácená od Slunce (vpravo). *Teplotní izolace, radiátor gradientometru a kamery sledující hvězdy pro určení prostorové orientace družice.*

ESA vybrala počáteční výšku letu kruhové dráhy kolem 275 km, která se poté nechala volně kontrahovat působením odporu atmosféry na výšku vybranou pro měřické fáze mise (MP1 a MP2), kdy budou prováděna gradientometrická měření. V pauze mezi MP1 a MP2 má být družice v době zatmění Slunce Zemí přesunuta na hybernační (odpočinkovou) dráhu.



Obr. 9. Pohled do útrob družice GOCE s gradientometrem v jejím těžišti a vybavením pro kalibraci gradientometru, přijímači GPS, hvězdnými kamerami, avionikou, tanky s palivem a dalším (z materiálů ESA).

Aplikace měření GOCE zahrnují zpřesnění parametrů gravitačního pole globálně i lokálně, oceánologii, klimatologii a skvělým způsobem doplňují výsledky z družicové altimetrie a předchozích dvou misí CHAMP a GRACE. Průběh globálního geoidu má být z těchto družicových dat samotných odvozen s přesností na ± 2 cm s rozlišením 20-50 km. Je přirozené, že pro různé další geovědní aplikace budou opět kombinována družicová a pozemní tíhová data, která v té době budou dostupná.



Obr. 10. Filtrované gradienty spočtené z měření mikroakcelerometrů a hvězdných kamer uspořádané geometricky do podoby Marussiho tenzoru se složkami V_{xx}, V_{yy} a V_{zz} na hlavní diagonále.

3.2. Přesnost určení variací parametrů gravitačního pole z GRACE

Vedle řešení pro statický gravitační potenciál, založený na co největším množství co nejdelších datových sérií družicových pozorování a na terestrických tíhových anomálích je snaha odhalit variace gravitačního pole, změny s časem, ať už je jejich příčina jakákoliv. Data z družic GRACE A a B jsou k tomu velmi vhodná a tak byla získána řada řešení reprezentujících gravitační potenciál v epochách po jednom měsíci [16] nebo deseti dnech [28].

Jak již víme z kap. 1 a obr. 4, přesnost těchto řešení kolísala, aniž by k tomu byl zjevný důvod (stále táž kvalita a množství dat a tentýž postup jejich zpracování). Posléze bylo odhaleno, že přesnost se snížila dočasně, nejvíce na podzim r. 2004. Vysvětlení se našlo rychle, viz [17] a podrobnější rozbor s predikcí do budoucnosti následoval v [18]. Na vině dočasného dramatického poklesu přesnosti byla dráhová rezonance 61/4, která zavinila dočasné snížení hustoty průmětů drah GRACE na zemský povrch a tím i horší pokryt daty pro určení variací geopotenciálu.

Na obr. 11 vidíme, jaké další hluboké rezonance družice GRACE při svém průletu atmosférou nevyhnutelně potká (46/3, 77/5, možná i 31/2, pokud tou dobou budou družice ještě aktivní). Tím se také znovu dočasně sníží, možná více než o řád, přesnost určovaných parametrů charakterizujících variace gravitačního pole. V práci [18] jsme odhadli, kdy k tomu dojde, avšak díky nečekaně pomalému nástupu nového slunečního cyklu se intervaly prodlouží a k rezonancím dojde později (nižší sluneční aktivita znamená menší hustotu atmosféry a tím pomalejší pokles dráhy). Výpočty průběžně updatujeme (Bezděk, 2009, soukr. sděl.).



Obr. 11. Historie dráhových rezonancí v atmosféře "volně padajících" družic GRACE A a B. Na x-ové ose je hodnota α, na y-ové výška letu, v poli obrázku hodnoty β (vizte definici dráhové rezonance UDZ na str. 7 v kap. 1).

Obr. 12 ukazuje dlouhodobý vývoj změn hustoty ground tracks družice GRACE A od vypuštění do konce r. 2008 na základě skutečných dráhových elementů. Zde vyniká záporná role rezonance 61/4 a navíc, oproti grafu na obr. 11, zde vidíme závislost hustoty na zeměpisné šířce, která odvisí od sklonu dráhy.

S existencí rezonancí je nutno se smířit a při zpracování dat s nimi počítat anebo provést dráhový manévr tak, aby k určité rezonanci vůbec nedošlo anebo volit dráhu s určitou konstantní, raketovými motorky udržovanou výškou letu (případ měřických fází letu družice GOCE) dostatečně daleko (měřeno ve výšce letu, asi jeden kilometr) od význačných rezonancí (jako je 16/1 pro dráhu GOCE, viz další kap.).



Obr. 12. Vývoj změn hustoty ground tracks (zde vyjádřené formou vzdálenosti mezi sousedními průměty dráhy družice na zemský povrch) družice GRACE A od vypuštění do konce r. 2008.

3.3. Poučení z GRACE pro GOCE a ovlivnění výběru dráhy GOCE

Poučení je prosté: vyhnout se při výběru dráhy pro měřické fáze letu GOCE blízkosti nějaké rezonance nízkého řádu, aby se neopakoval problém jako pro GRACE v r. 2004 (obr. 4 a 5). V případě GOCE jde především o 16/1, obr. 13. Porovnání hustot ground tracks v této rezonanci a v 977/61 (na nejbližší "větvi" rezonancí pod exaktní rezonancí 16/1) ukazují obr. 14 a,b. Ztráta přesnosti výsledků z GOCE díky nízké hustotě v 16/1 by byla velmi značná a úplně zbytečná. ESA původně uvažovala o dráze o několik kilometrů vyšší než připadá na 16/1, ale díky zpožděnému nástupu nového slunečního cyklu a skvělým výsledům při

oživování GOCE ve dráze v první fázi letu (jaro 2009) vybrala pro první měřickou dráhu dráhu v rezonanci 979/61 ($h = 254.90\pm0.05$ km) t.j. "daleko" pod výškou odpovídající rezonanci 16/1.

Podrobnější studium výběru dráhy GOCE spolu s odborníky ESA ukázalo řadu zajímavých, dříve netušených vlastností různých rezonančních drah. K jejich odhalení a následnému využití ovšem nestačí analytická teroie 1. řádu (která je použita např. pro vykreslení obr. 5, 11, 12 nebo 13), ale je nutné mít skutečné dráhové elementy GOCE a numericky je integrovat s uvážením všech potřebných poruch. Výsledky jsme shrnuli v práci [29] a v několika navazujících referátech. Zde je jen stručně komentujeme.



Na obr. 13 je ukázáno, jaké dráhové rezonance by družice GOCE potkala v případě "volného pádu" v atmosféře (bez korekce pomocí motorků družice) z výšky cca 290 km. Nejdůležitější je vyhnout se výšce letu kolem 268 km, kdy by nastala rezonance 16/1. Pak by se totiž hustota ground tracks dramaticky snížila – porovnejte hustotu na obr. 14 b "dostatečně daleko" od rezonance 16/1 s hustotou přímo pro exaktní rezonanci 16/1, obr 14 a. Měli bychom sice stejný počet stejně kvalitních měření gradientometru, ale jejich geografické rozložení (hlavně v zeměpisné délce) by bylo problematické.

Výběr dráhy na "rezonanční větvi" nejblíže rezonanci 16/1 znamená, že např. pro dráhu 977/61 nebudou žádné subcykly, kdežto třeba pro dráhu z další větve pod 16/1, 978/61, je jeden subcyklus (s peridou kolem 30 dnů, viz obr. 13) pro dráhu 979/61 dva subcykly. Ukazuje se, že "namotávání" sítě subsatelitních bodů bude v uvedených případech vzájemně dosti odlišné (viz obr. 15 a,b). V prvním uvedeném případě se bude hustá síť subsatelitních

bodů namotávat 61 den, v druhém a třetím řidší síť za zhruba 30 resp 20 dnů a přes ní se pak bude překládat síť z bodů za posledních 30 resp 40 dnů 61-denního cyklu. Podrobnější rozbor také ukazuje, že hustota ground tracks je pro různé dráhy různá i co do pravidelnosti – stačí přejít z dráhy 979/61 o 200 metrů výše na dráhu v rezonanci 995/62 a nepravidelně hustá síť se změní na pravidelnou. Podrobnější rozbor se vymylá rámci tohoto sdělení a je obsahem technické zprávy pro ESA, kterou ovlivňujeme jemné dolaďování dráhy GOCE.



GOCE 16/1 16 days. a (Brower) = 6646.248 km

Obr. 14 a,b.. Průměty dráhy družice GOCE na zemský povrch v exaktní rezonanci 16/1 (nahoře) a ,,dostatečně daleko" od ní, asi 4.5 km pod ní měřeno ve výšce letu, konkrétně v rezonanci 977/61.

3.4. Aplikace pro družice Marsu. Měsíce, Merkuru a Venuše.

Problém snížené přesnosti by mohl vadit i v případě určování parametrů gravitačního pole Měsíce a planet, ikdyž zde bylo použito výrazně méně družic, v případě Merkuru zatím jen průlety kolem planety (fly-by), takže přesnost našich znalostí o jejich gravitačním poli je horší než u Země. To je vyjádřeno i podstatně nižším maximálním stupněm L rozvoje gravitačního potenciálu v řadu kulových funkcí u těchto těles. Pro rámcové porovnání, maximální stupeň byl u Země donedávna L=360, nyní je 2190 (EGM 08 [30], [31]), pro Venuši je 180 [32], pro Měsíc a pro Mars kolem 90 [33], [34]. Problém byl prozkoumán, vyřešen a výsledky jsou shrnuty v [19].

Nejprve musíme v SW, který počítá rezonanční grafy (jako jsou na obr. 3, 5, 11 nebo 13) vyměnit základní dynamické parametry Země za parametry příslušných těles. Jedná se o součin univerzální gravitační konstanty a hmotnosti tělesa GM [km³s⁻²], pólové zploštění J_2 ,

hlavní polosu nejvhodnějšího rotačního elipsoidu *R* a rychlost rotace tělesa kolem své osy. Námi použité hodnoty shrnuje tabulka 3. Odpovídají mezinárodnímu standardu podle Seidlemanna et al [35].



Obr. 15 a,b. Porovnání "namotávání" sítě subsatelitních bodů či průmětů dráhy družice na zemský povrch (ground tracks) v případě dvou rezonancí vysokého řádu, které se liší jen svou pozicí na "rezonančních větvích" v grafu na obr. 13, jedna má subcykly, druhá je nemá (příklad vlevo). Podrobnosti v [18].

Tabulka 3. Základní dynamické parametry Země, Měsíce a některých planet potřebné pro výpočty "rezonančních grafů". S_rate [rev/day] znamená rotační rychlost planety v otočkách za den trvající 24 hodin. Poznamenejme, že Venuše rotuje retrográdně, takže hodnota rychlosti její rotace má záporné znaménko.

<i></i>		J ₂ [10°]	л [КШ]	
Země	398600.44	1082.627	6378.137	1.00274
Měsíc	4902.80	203.428	1738.140	0.03660
Merkur	22032.24	60	2439.700	0.01705
Venuše	324858.36	5.97	6051.800	-0.00411
Mars	42828.37	1959.23	3396.190	0.97470



Obr. 16 a,b. Graf rezonancí orbiterů Marsu v rozpětí výšek letu 50 až 400 km. Je třeba se vyhnout m.j. rezonanci 13/1, která by svou nízkou hustotou ground tracks (viz obr. 17 a,b) degradovala přesnost parametrů gravitačního pole Marsu určovaných z mise při takto nevhodně vybrané dráze. Oba poslední orbitery MGS i Odyssey byly dostatečně daleko rezonance 13/1 (létaly výše).

Nejprve uvádíme výsledky pro Mars, kde je situace podobná Zemi. Obr. 16a ukazuje přehled rezonancí ve výškách vhodných pro orbitery mapující Mars a jeho gravitační pole. Měli bychom volit dráhu mimo rezonance 13/1, 25/2 či 27/2 (obr. 16b). Zde je L> β , jako u

Země. Orbitery MGS (Mars Global Surveyor) i Odyssey, jejichž výsledky studia gravitačního pole Marsu jsou dnes nejaktuálnější [34], byly od nich dostatečně daleko. Obr. 17 a, b ukazují situaci pro Mars analogickou té, co známe u Země - výrazný pokles hustoty ground tracks například u 13/1, což je nežádoucí z hlediska určování parametrů gravitačního pole Marsu. Je snadné se volbě takové dráze vyhnout, zvolit počáteční dráhu orbiteru pod dotyčnou rezonancí. Brždění v atmosféře Marsu je miniaturní v porovnání se Zemí.



Obr. 17 a,b. Hustota ground tracks Marsovských orbiterů hypoteticky umístěných do rezonancí 13/1 (špatný příklad) a 188/15 (dobrý příklad).

Pro všechna pomalu rotující tělesa z tabulky 3 nacházíme velmi vysoká β pro rozumné výšky orbiterů, takže všude zatím platí L< β , jinými slovy, zde problém degradace přesnosti gravitačních řešení v důsledku snížené hustoty ground tracks zatím nehrozí. Uvádíme grafické výstupy výsledků jen pro Venuši a Měsíc, obr. 18 a 19.



Obr. 18 a,b. Graf rezonancí orbiterů Venuše.



Obr. 19 a,b. Graf rezonancí orbiterů Měsíce.

4. Projekt PECS C 98056

V rámci grantu PECS (tedy grantu pro vědce ze států přizvaných ke spolupráci s ESA ještě před přistoupením ČR k ESA v r. 2008), rešíme čtveřici projektů týkajících se družicové mise ESA GOCE). První se týká *výběru dráhy* a byl inspirován pracemi na projektu GRACE (kap. 3.2 a 3.3) a díky spolupráci s managerem projektu GOCE Runem Floberghagenem (ESA ESRIN, Frascati, I) zaznamenal rychlý pokrok a vyústil ve společnou publikaci [29]. Ostatní tři témata prošla procedurou schválení organizací ESA v rámci jejího AO GOCE z r. 2006-7. První se jmenuje "Using GOCE data for estimation of a height transformation surface over the territory of Central Europe" (GOCE AO Proposal č. 4271) a vede jej prof. P. Novák. Druhý má název "GOCE gravity field modeling with full var/covariance information", č. 4256 a odpovídá za něj Dr. Ch. Gruber a třetí pod názvem "Crater Chicxulub as seen by GOCE gradiometer data and possible discoveries of further hidden impacts on the Earth", č. 4235 se věnuje možnostem využití tíhových dat k hledání skrytých impaktních objektů pod povrchem Země a zodpovídá za něj doc. J. Klokočník.

Náš projekt se jmenuje "GOCE – specific tasks on fine gravity field structure of the Earth", jeho PI je Jaroslav Klokočník (ASÚ AV ČR Ondřejov) a členové (řazeno abecedně) Aleš Bezděk (ASÚ AV ČR Ondřejov), Christián Gruber (do léta r. 2008 ASÚ AV ČR Ondřejov, nyní GFZ Oberpfaffenhofen, Bavorsko), Jan Kostelecký (FsV ČVUT Praha a VÚGTK Zdiby), Pavel Novák (Západočeská Univ. Plzeň), Ivan Pešek (FsV ČVUT Praha), Josef Sebera (ASÚ AV ČR Ondřejov) a Jan Vondrák (ASÚ AV ČR Praha).

Výběr dráhy pro družici GOCE. Jde o zcela zásadní věc. Věnovali jsme mu kap.3.3. Naše výsledky [29] ovlivňují konečný výběr hlavní polosy dráhy družic GOCE tak aby se v měřickcýh fázích, kdy bude aktivní gradientometr, nedostala do rezonance nízkého řádu a aby splňovala další podmínky na rovnoměrné pokrytí Země gradientometrickými měřeními.

První okruh odsouhlasený v rámci AO ESA v r. 2006 se věnuje návrhu efektivních výpočetních postupů odvození parametrů gravitačního pole Země, jenž jsou pro tuto misi zcela klíčové. Nízká letová hladina družice totiž umožní snímat signál gravitačního pole nejen s velkou přesností, ale také s vysokým prostorovým rozlišením (vzhledem k ostatním družicovým misím), což vede k obrovskému počtu neznámých (např. 62 tis. pro rozlišení 250 sférického harmonického rozvoje) při mnohonásobně většímu počtu pozorování. Pro představu, družice GOCE bude poskytovat minimálně 5 nezávislých měřených veličin (druhých derivací tíhového potenciálu) v kroku jedné vteřiny po dobu několika měsíců, přičemž každému měření v podstatě přísluší jedna rovnice v uvažovaném linearizovaném modelu. V této oblasti byl vyvinut nový efektivní postup pro harmonickou analýzu signálu na kouli s enormním snížením nadbytečných operací.

Druhá část se věnuje *kombinaci družicových dat s nedružicovými* (terestrickými gravimetrickými měřeními). ESA předpokládá, že gradientometrická data mise GOCE budou použita pro odvození globálního gravitačního modelu přibližně do stupně a řádu 250. Z pohledu řešení čistě družicových modelů to sice bude značný pokrok (stávající čistě družicová data umožňují řešení do stupně a řádu ~90), ale z pohledu dostupných pozemních a leteckých tíhových dat je toto prostorové rozlišení nízké. Kombinace různorodých dat, která je velice citlivá z hlediska váhování dat různého typu a přesnosti, je proto jedinou možností, jak využít potenciál gradientometru na palubě GOCE pro praktické požadavky mnoha dalších navazujích oborů. V oborech jako je geofyzika, oceánografie, klimatologie a další je často právě znalost detailní struktury tíhového/gravitačního pole výchozím bodem pro studium dalších jevů na Zemi a v jejím okolí.

Třetí téma je o přesnosti a rozlišovací schopnosti měření GOCE ke studiu *detailnějších* struktur v gravitačním poli Země jako jsou impaktní krátery na Zemi. Krátery mohou zanechat "gravitační" stopu, kterou zobrazíme formou tíhových anomálií a druhých derivací poruchového potenciálu v radiálním směru za použití nejnovějšího modelu gravitačního pole Země EGM 08 (USA) s přesností na většině území v rámci několika miligalů (v tíhových anomáliích) a s rozlišením na zemském povrchu $9x9.\cos\varphi$ km (φ je zeměpisná šířka). Data z GOCE mohou přinést další zlepšení.

Obr. 21 a 22 ukazují příklady s tíhovými anomáliemi a druhými derivacemi v radiálním směru podle EGM 08 pro případ severního Yukatánu, kráter Chicxulub a sibiřského Popigae, původně sovětského gulagu, kde se těžily diamanty ve velkém (vznikly impaktem). Oba krátery jsou obří, průměr vnějšího kráteru Chicxulub se odkaduje na 170 až 300 km, průměr Popigaje na 100 km. Zobrazujeme však šiřší oblast, nejen známé impaktní krátery, potvrzené geology, neboť se domníváme, že v těsném sousedství impaktních kráterů známých jsou další, dosud oficielně neuznané, indikované právě gravitačním signálem, takže se jedná o dvojitý nebo násobný impakt. Podrobnosti jsou v [36] a [37].

5. Závěr a výhled od budoucnosti

Od dráhových rezonancí UDZ až po družicovou gradientometrii je dlouhá cesta. Během té cesty se obor dráhové dynamiky UDZ a určování parametrů gravitačního pole Země (a dalších těles) vyvinul neskutečným způsobem co se týče metod, přesnosti, rozlišovací schopnosti a interakce s dalšími specializacemi. Jasnozřivé vize našich předchůdců se naplnily: můžeme například nejen určovat parametry statického gravitačního pole Země, ale také sledovat jejich variace v čase. Dříve neproveditelné aplikace se stávají skutečností. Bylo skvělé u toho být, moci přispět a spoluvytvářet situaci pro další výzkum, kde bude podstatným zdrojem informací gradientometr na palubě evropské družice GOCE, nedávno úspěšně vypuštěné [38], [39]. V případě úspěchu nás tato data zaměstnají na několik let dopředu a mají potenciál ke zpřesnění našich znalostí o gravitačním poli Země. Za projektem CEDR a PECS C 98056 by měly následovat další, hlavně v rámci ESA. V naší specializaci máme v ESA dobré jméno a je na čem stavět.

6. Poděkování

Jsem hluboce zavázán a vděčen **Prof. Ing. J. Kosteleckému, DrSc** a Dr. Carlu A. Wagnerovi (NOAA Silver Spring, MD, USA) za dlouhodobou a velmi užitečnou spolupráci, jak doufám oboustranně prospěšnou, stejně tak jako řadě dalších kolegů a kolegyň, které jsem na své pouti dráhovou dynamikou UDZ a kosmickou geodézií během svého působení v Astronomickém ústavu i mimo něj, často v zahraničí, potkal. Grantovým agenturám, nejnověji PECS a organizaci ESA, děkuji za významnou podporu našeho výzkumu.







Obr. 21 a-e. Tíhové anomálie a druhé derivace poruchového potenciálu pro oblast impaktního kráteru Popigai: (a,b) terestrické tíhové anomálie Bouguerovy a fitrované (vše nad 50 km eliminováno), (c) vpravo nahoře, tíhové anomálie na volném vzduchu podle EGM 08 (mGal),
(d) vlevo dole druhé derivace v radiálním směru podle EGM 08 (mE), šipky lokalizují nové kandidáty na impaktní krátery "srovnané do řady" k původnímu impaktu (který je nejvíce na severozápad),
(e) vpravo dole, model kráteru pomocí hmotných elementů [39] dokazující, že daným tíhovým datům a geologickým informacem o velikosti, hloubce a hustotních kontrastech lze vyhovět násobným (zde dvojitým) kráterem.

7. Literatura

[1] Klokočník J. 1979 15th-order resonance of Intercosmos 11, *Bull. Astronom. Insts. Cs* 30, 214

[2] Kostelecký J., Klokočník J. 1983 Collocation and 30th-order resonant harmonics *Planet. Space Sci.* 31, 829

[3] Gooding R H, Wagner C A, Klokočník J, Kostelecký J, Gruber Ch, 2007 CHAMP and GRACE resonances, and the gravity field of the Earth, COSPAR Beijing 2006, Science Direct – *Adv. Space Res.*, doi: 10.1016/j.asr.2007.02.086.

[4] Wagner C.A. 1968 Discovery of new satellites in resonant orbits, *Rep. GSFC* X-643-68-173, Greenbelt, Md.

[5] Allan R R 1971 Resonant effect in inclination for close satellites, *Royal Aircraft Establ. Techn. Rep.* 71245, Farnborough, Hants; *Planet Space Sci* (1973) 21, 205 plus
1973, Change of inclination in passing through resonance v *Recent Advances in Dynamical Astronomy*, eds. B.D.Tapley and V.Szebehely; D. Reidel Publ. comp., Dordrecht-Holland, 333-348

[6] King-Hele DG, Walker, DMC, Gooding RH, 1975, Geopotential harmonics of order 15 and odd degree from analysis of resonant orbits, *Planet. Space Sci.*, 23, 1239

[7] Balmino G., Reigber Ch. 1974 13th-order harmonics in the geopotential from analysis of four resonant satellites, pres. 17th COSPAR, Sao Paulo, Brazil.

[8] Reigber Ch., Rummel R. 1978 12th-order harmonics from resonant perturbations of satellites using non-homogeneous weight functions, pres. symp *The Use of Artif. Satel. for Geodesy and Geodynamics,* Athens, May 29-June 3

[9] Gooding RH. 1971 Lumped fifteenth-order harmonics in the geopotential, *Nature Phys. Sci.* 231, 168

[10] Klokočník J. 1983 Orbital rates of Earth satellites at resonances to test the accuracy of Earth gravity field models, *Celest. Mech.* 30, 407

[11] Gooding RH, King-Hele DG, 1989, Explicit form of some functions arising in the analysis of resonant satellite orbits, *Proc. R. Soc. Lond.* A 422, 241

[12] Reigber Ch., Klokočník J., Li H., Flechtner F. 1988 Orbit Dossier, Contribution to ERS 1, *DGFI Rep.* for ERS-1, Munich.

[13] Capderou M. 2005 Orbits and missions, s CD-ROM. 2-287-21317-1. Berlin: Springer

[14] Gooding R.H., Wagner C.A., Klokočník J, Kostelecký J., Reigber Ch. 2004, CHAMP and resonances; In *Earth Observation with CHAMP, Results From Three Years in Orbit*: Eds;

Ch. Reigber, H. Luhr, P. Schwintzer and J. Wickert, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 101-107

[15] Tapley B., Bettadpur S., Watkins M., Reigber Ch. 2004 The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results, *Geophys Res. Letts.* 31, L09607; doi 10.1029/2004GL010020

[16] Bettadpur S., Poole S., Ries J. 2004 GRACE mission status and gravity field product improvement plans; paper G23-A01, pres. AGU Fall Meeting 2004, plus

Bettadpur S. 2006 Status of re-processed GRACE gravity field data products, pres. EGU Vienna, Geophys Res Abstracts 8: 01563

[17] Wagner C.A., McAdoo D.C., Klokočník J., Kostelecký J. 2005 Degradation of Grace Monthly Geopotentials in 2004 Explained, *EOS Trans. AGU* 86 (18), J. Assem. Suppl , Abstract G23B04 plus 2006 Degradation of geopotential recovery from short repeat-cycle orbits: application to GRACE monthly fields, *J. Geod.* 80, 94

[18] Klokočník J., Wagner C.A., Kostelecký J., Bezděk A., Novák P., McAdoo D. 2008 Variations in the accuracy of gravity recovery due to ground track variability: GRACE, CHAMP, and GOCE, *J. Geod.* 82, 917; doi: 10.1007/s00190-008-0222-0

[19] Klokočník J., Bezděk A, Kostelecký J., Sebera J. 2009 Fine orbit "tuning" of planetary orbiters for maximum gain in accuracy of gravity field information, under review in *J. Guidance, Control, and Dynamics*

[20] Harwood N.M., Swinerd G.G., King-Hele D.G. 1993 Evaluation of 14th-order harmonics in the geopotential from 18 resonant satellite orbits, *Proc. R. Soc. Lond.* A 442, 343.

[21] Lemoine F.J., Kenyon, S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Z.M., Williamson R.G., Pavlis E.C., Rapp R.H., Olson T.R. 1998 The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM 96, NASA/TP-1998-206861

[22] Wakker K.F., Klokočník J., Kostelecký J., Sehnal L. 1980 Analysis of inclination variations of the first Netherland's satellite, *Bull. Astronom. Insts. Cs* 32, 168 plus *Nabjud. ISZ* 20, 275

[23] Reigber Ch., Balmino G., Moynot B., Mueller H 1983 The GRIM 3 Earth gravity field model, *Manuscr. Geod.* 8, 93

[24] Gruber T., Bode A., Reigber Ch., Schwintzer P., Balmino G., Biancale R., Lemoine J.M. 2000 GRIM5-C1: Combination solution of the global gravity field to degree and order 120, *Geophys. Res. Letts.* 27, 4005

[25] Reigber Ch. Schwintzer P., Neumayer K. H., Barthelmes F., Koenig R, Foerste Ch., Balmino G., Biancale R, Lemoine J. M., Loyer S., Bruinsma S., Perosanz F., Fayard T. 2003 The CHAMP-only Earth Gravity Field Model EIGEN-2, *Adv. Space Res.* 31, 1883

[26] Reigber Ch, Schmidt R, Flechtner F, Koenig R, Meyer U, Neumayer K-H, Schwintzer P, Zhu S.Y., 2005 An Earth gravity field model complete to degree/order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE 02S, *J. Geodyn. 39*, 1; doi: 10.1016/j.jog.2004.07.001

[27] Wells, W.C. 1983 Spaceborne gravity gradiometers. *NASA Conference Publication 2305*, Proceedings of a workshop sponsored by the OSSA Geodynamics branch and held at NASA Goddard Space Flight Center, 1983, Greenbelt, Md.

[28] Lemoine J.M., Bruinsma S., Loyer S., Biancale R, Marty J.C., Perosanz F., Balmino G. 2007 Temporal gravity field models inferred from GRACE data, COSPAR Beijing 2006, Science Direct – *Adv. Space Res*, doi: 10.1016/j.asr.2007.03.062

[29] Bezděk A., Klokočník J., Kostelecký J., Floberghagen R., Gruber, Ch. 2009 Simulation of free fall and resonances int the forthcoming GOCE mission, *J. Geodynamics*, doi: 10.1016/j.jog.2009.01.007.

[30] Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K. 2008a An Earth Gravitational Model to degree 2160: EGM 2008. Pres. Session G3: "GRACE Science Applications", EGU General Assembly Vienna, Geophys. Res. Abstracts. 10, EGU2008-A-01891, 1607-7962/gra/EGU2008-A-01891.

[31] Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K. 2008b EGM2008: An overview of its development and evaluation. Pres. IAG Int. Symp. GGEO 2008, 23-27 June, Chania, Crete, Greece.

[32] Konopliv A. S., Banerdt W. B., Sjogren W. L. 1999 Venus gravity: 180 degree and order model", *Icarus* 139, 3

[33] Lemoine F. G., Smith D. E., Zuber M. T., Neumann G. A., Rowlands D. D. 1997 A 70th degree Lunar gravity model (GLGM-2) from Clementine and other tracking data, *J. Geophys. Res.* 102, E7, 16,339

[34] Lemoine, F. G., Smith D. E., Rowlands D. D., Zuber, M. T., Neumann G. A., Chinn D.
S. 2001 An improved solution of the gravity field of Mars (GMM-2B) from Mars Global
Surveyor, J. Geophys. Res., 106, 2001, E10, 23,359 plus Marty, J. C., Balmino G., Duron
J., Rosenblatt P., Le Maistre S., Rivoldini A., Dehant V., Van Hoolst T. 2009 Martian gravity
field model and its time variations from MGS and Odyssey data", *Planet. Space Sci.* 57, 350

[35] Seidelmann P. K., Archinal B. A., A'hearn M. F., Conrad A., Consolmagno G.,
Hestroffer D., Hilton J. L., Krasinsky G. A., Neumann G., Oberst J., Stooke P., Tedesco E.
F., Tholen D. J., Thomas P. C., Williams I. P. 2007 Report of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements 2006, *Cel. Mech. and Dynam. Astronomy* 98, 155

[36] Klokočník J., Kostelecký J., Gruber Ch., Novák P., Pešek I., Vondrák J., Gruber Ch., Bezděk A., Sebera J. 2008 GOCE – specific tasks on fine gravity field structure of the Earth. ESA, *Grant ESA/PECS C 98056*, Report on activity for ESA.

[37] Klokočník J., Kostelecký J., Novák P., Wagner C. A. 2009 Detection of Earth impact craters aided by a detailed global gravity field model EGM 08, under review.

[38] ESA: *GOCE L1B Products User Handbook.* ESA Report GOCVE-GSEG-EOPG-TN-06-0137, 2006a, GOCE PDGS Team.

[39] ESA: GOCE High Level Processing Facility, *GOCE Level 2 Data Handbook*. ESA Report GO-MA-HPF-GS-0110, 2006b, GOCE Gravity Consortium EGG-C.

Vědecký životopis

Doc. Ing. Jaroslav Klokočník, DrSc,

narozen 2. 8. 1948, Praha.

Vystudoval jsem SVVŠ (Střední Všeobecně Vzdělávací školu, tehdejší gymnásium), směr matematicko-fyzikální, maturoval jsem 6. 6. 1966. Poté jsem studoval geodézii na FsV ČVUT Praha, 1966-1971, specializaci od 4. ročníku a dipl. práce na katedře geodetické astronomie. Poté jsem krátce pracoval na Štefánikově hvězdárně na Petříně (kde jsem předtím dlouho působil jako astronom-amatér) a na podzim r. 1971 jsem se účastnil konkursu do Astrono-mického ústavu tehdejší ČSAV. Tam působím od 2. 2. 1972 dosud.

Výuka, vědecké a pedagogické tituly:

1972--1978 asistent, poté postgraduální student astronomie, Astronomický ústav ČSAV
1979 CSc ... kandidát věd v oboru astronomie, ČSAV
1980-- dosud vědecký pracovník ČSAV, nyní ASÚ AV ČR v.v.i.
1996 DrSc ... doktor věd v oboru astronomie, AV ČR
2000 habilitace na docenta ... docent geodézie a kartografie, FsV ČVUT Praha

Oblast výzkumu: dráhová dynamika umělých družic Země (*aplikovaná nebeská mechanika* v kombinaci s geodézii, geofyzikou a oceánografií), studium gravitačního pole Země (*rezonanční jevy v drahách umělých družic a určení parametrů gravitačního pole, družicová altimetrie a gradientometrie (CHAMP, GRACE, GOCE)); archaeoastronomie.*

1974—1990 a cca 2002-2007 studium rezonančních jevů v drahách umělých družic Země a odhady přesnosti harmonických geopotenciálních koeficientů globálních modelů gravitačního pole Země

1989--1991 výběr dráhy, radiální chyba dráhy pro altimetrickou družici ESA ERS 1 (pozvání pracovat v DGFI v Mnichově, tehdejší SRN), příspěvek k teorii radiálních chyb

1990--1994 navigace meteorologických družic (pozvání k práci v Max-Planck Inst. fuer Meteorology, Hamburg), náhrada původního amerického softwaru českým plnícím požadované úkoly meteorologů s přesností o řád větší než původně

1986--1992 spolupráce na mezinárodním projektu COGEOS (Campaign of Optical Observations of Geosynchronous Satellites)

1980--2005 statistické odhady přesnosti modelů tíhového pole Země pomocí nezávislých drah z diferenciální družicové altimetrie

1994 - vyučuje na KVG FsV ČVUT Praha specielní kapitoly kosmické geodézie

1992 - diferenciální družicová altimetrie pro geodézii a oceánografii

1997 - archaeoastronomie (Peru, Mesoamerika ... výpravy, polní měření a přednášky 1997, 2001, 2003, 2005)

2000 - Docent geodézie a kartografie FsV ČVUT Praha, pokračuje výuka na KVG

2000 - nová metoda testování kalibračního faktoru kovarianční matice globálních modelů tíhového pole Země pomocí dlouhodobých průměrů single satellite crossovers a latitude lumped coefficients (propracováno, instalováno a používáno v GFZ Potsdam, osmiměsíční pobyt tamtéž v r. 2000)

2006 - družicová gradientometrie, PECS/GOCE

Pobyty v zahraničí: opakovaně v Německu (1989, 1990, 1992, 1994, 1999, 2000, 2001, 2002), USA (1992, 1994, 1998, 2007) a Egyptě (1988, 1990, 1992, 1994, 1998, 2005) a řada dalších.

Ostatní: člen několika dočasných Specielních Studijních Skupin IAG/IUGG, člen org. COSPAR, IAU, AGU a EGU. *PI* několika grantů (většinou z GA AV ČR), nyní *PI* grantu v projektu PECS o družicové misi GOCE (ESA C 98056, 2007-2011). PI = Principal Investigator.

Souhrn publikačních aktivit:

Autor nebo spoluautor více než 133 vědeckých článků a referátů, které mají nejméně 155 citací v pracích zahraničních autorů (citace domácích autorů nedokumentujeme). Spoluautor čtyř skript (1988, 1990, 1994, 2008).