

Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i.

Geodetická observatoř Pecný

**Metodika analytických postupů kombinace dat z absolutních a
supravodivých gravimetrů**

TECHNICKÁ ZPRÁVA č. 1225/2014

**Vypracoval: Ing. Vojtech Pálinkáš, Ph.D.
Ing. Miloš Vaňko, Ph.D.**

Datum: 26. 11. 2014

Tato metodika byla vytvořena s finanční podporou
TA ČR v rámci projektu Beta TB01CUZ006.



Technologická agentura
České republiky



Beta



1. ÚVOD

Moderní absolutní gravimetry (AG) dosahují v současnosti standardní nejistoty (vnější přesnost měření na hladině významnosti 68%) okolo $2.5 \mu\text{Gal}^1$, viz [1, 2]. Velkou měrou se na této nejistotě podílejí systematické chyby gravimetrů, jejichž stanovení je jedním z hlavních úkolů mezinárodních porovnávacích měření, která jsou pravidelně opakována již od roku 1981 [1]. Variace systematických chyb je možné určovat z opakovaných absolutních měření na referenčních stanicích [2, 3] opatřených relativním supravodivým gravimetrem (SG) [4], který měří změny zrychlení s přesností lepší než $0,1 \mu\text{Gal}$. V ideálním případě, by tedy porovnání AG a SG na referenční stanici mělo být dostatečné ke stanovení variací systematických chyb konkrétního AG. SG je ovšem zatížen tzv. chodem neboli pozvolnou změnou měřené hodnoty instrumentálního původu. Chod SG lze sice v řádu několika let považovat za lineární [2,4], ale tato skutečnost je dostatečná k tomu aby byl SG zpětně závislý na opakovaných měřeních absolutních gravimetrů na stanici. Tato závislost je dále umocněna potřebou kalibrace (stanovení měřítka) záznamu SG, jelikož měřené hodnoty SG nejsou v jednotkách zrychlení, ale napětí v obvodech zpětnovazební cívky [4]. Měřítka záznamu lze v současné době nejpřesněji stanovit ze simultánních absolutních měření [5]. Obecně řečeno, pouze kombinace 1) výsledků porovnávacích měření absolutních gravimetrů, 2) opakovaných absolutních měření na referenčních stanicích a 3) kontinuálního záznamu SG na referenční stanici, může poskytnout komplexní informaci o průběhu systematické chyby absolutního gravimetru a zároveň stanovit neznámé parametry SG (chod a měřítka). Časové řady změn tíhového zrychlení, získané na základě takto zpracované kombinace mohou splnit i přísná kritéria (relativní přesnost $1\text{E-}9$) pozemní části Global Geodetic Observing System (GGOS) [6].

Smyslem této práce je vypracování postupů pro kombinaci dat AG a SG za účelem stanovení potřebných instrumentálních parametrů. Uvedeny budou postupy pro dvě metody: 1) kombinace po částech, 2) komplexní kombinace. Praktická aplikace metod bude uvedena pro referenční stanici Pecný na kombinaci dat absolutního gravimetru FG5#215 [7] a supravodivého gravimetru OSG-050.

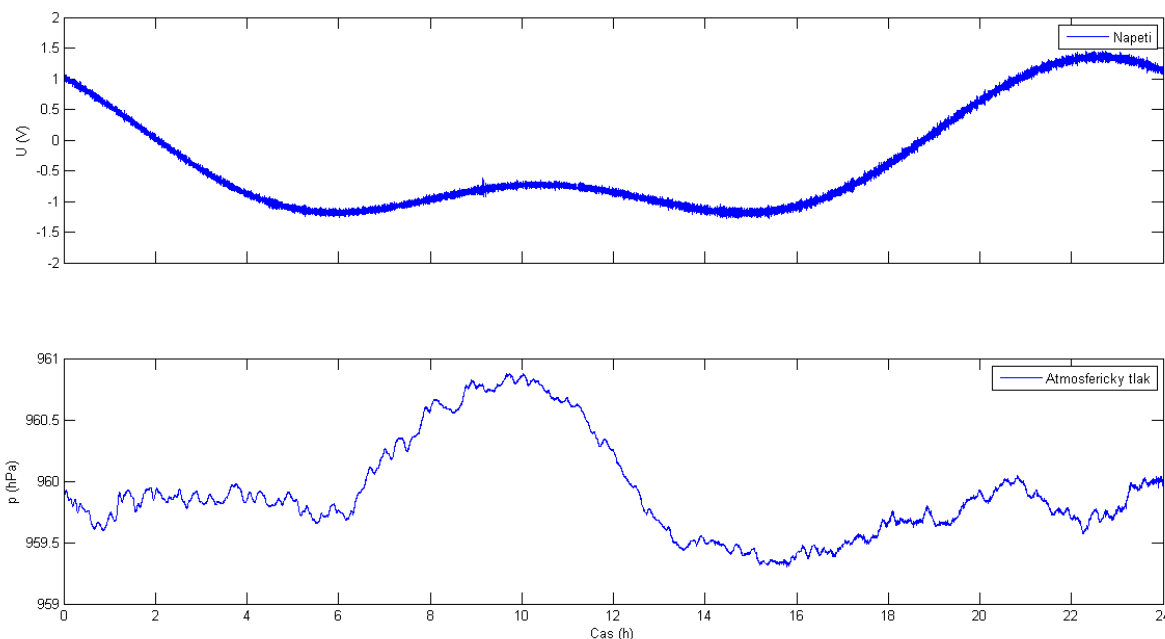
2. KOMBINACE PO ČÁSTECH

Tento postup kombinace je nejčastěji používanou metodou na referenčních stanicích. Fakticky je založen na skutečnosti, že u absolutních měření je výrazný rozdíl mezi vnitřní přesností měření (v rámci jedné měřické kampaně) a vnější přesností měření. Podle [2] lze opakovatelnost (vnitřní přesnost měření) absolutního gravimetru FG5#215 vyjádřit Allanovou standardní odchylkou s výraznou dominancí bílého gaussovského šumu (normální rozdělení chyb pro všechny frekvence). Vnitřní přesnost měřické kampaně sestávající z 2000 volných pádů lze na klidné stanici jakou je Pecný charakterizovat hodnotou $0.2 \mu\text{Gal}$. V důsledku chyb postavení gravimetru, justáží a nastavení přístroje je ale dlouhodobá instrumentální reprodukovatelnost gravimetru (shoda výsledků konkrétního gravimetru při různých podmínkách okolního prostředí a s různým nastavením gravimetru zahrnující i změny systematických chyb po údržbě, opravě či justáži gravimetru) asi $0.8 \mu\text{Gal}$. Čtyřnásobný rozdíl mezi opakovatelností a reprodukovatelností tak smysluplně rozděluje určování parametrů SG (měřítka a chodu) do dvou kroků s uvážením dvou nezávislých náhodných rozdělení chyb. Jednotlivé měřické kampaně jsou v prvním kroku při určení měřítka SG zpracovávány separátně. Ve druhém kroku jsou analyzovány rozdíly mezi AG a SG a určen chod SG.

¹ $1 \mu\text{Gal} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

2.1 Určení měřítka záznamu supravodivého gravimetru

Výstupním signálem supravodivých gravimetrů je napětí (ve Voltech) ze zpětnovazebního obvodu [4]. U gravimetru OSG-050 tento analogový signál prochází anti-aliasingovým filtrem s hraniční periodou 16 s a je následně vzorkován s periodou 1 s. Tento digitální záznam z gravimetru je doplněn o záznam tlaku vzduchu v místě měření. Data jsou organizována do souborů po jednotlivých kalendářních dnech, viz obr. 1.



Obr. 1. Měřené denní hodnoty zpětnovazebního signálu a atmosférického tlaku

Vteřinová data jsou převzorkována na minutová data pomocí digitálního FIR filtru s dolní propustí a délkou 1009 sekund. Přesnost minutových SG dat je asi $0.05 \mu\text{Gal}$, kterou lze vzhledem k přesnosti jednoho pádu absolutního gravimetru ($5 \mu\text{Gal}$) považovat za bezchybnou. Minutová data se použijí k interpolaci signálu SG $U_{SG} [\text{V}]$ v čase jednotlivých volných pádů. Je ovšem důležité uvážit i časové zpoždění v záznamu SG, které je zejména v důsledku používaného anti-aliasing filtru asi $\tau = 8.6 \text{ s}$. Poznamenejme také, že samotná lineární interpolace mezi minutovými daty způsobí chybu menší než $0.001 \mu\text{Gal}$ v důsledku aproximace slapového signálu (během minuty) lineární funkcí.

Zpětnovazební signál je přímo úměrný změně zrychlení, což je dáno konstrukcí zpětnovazebního systému SG. Lineární vztah mezi signálem AG a SG vede k rovnici oprav

$$g_{AG}^F(t) + v = g_0 + S U_{SG}^{d,\Delta}(t + \tau), \quad (1)$$

kde

$g_0 [\mu\text{Gal}]$... je konstantní člen vyjadřující vzájemný posun obou signálů,

$S [\mu\text{Gal/V}]$... je měřítko (kalibrační faktor) záznamu supravodivého gravimetru,

$g_{AG}^F(t) [\mu\text{Gal}]$... je absolutní hodnota zrychlení volného pádu pro jednotlivé pády absolutního gravimetru v čase t . Jedná se tedy o hodnoty bez zavedení korekcí z variace tíhového pole (slapy, pohyb pólu, atmosféra),

$U_{SG}^{d,\Delta}(t+\tau)$ [V] ... je signál SG (interpolovaný z minutových dat) odpovídající volnému pádu AG v čase t , tj. s uvažováním časového zpoždění τ signálu SG.

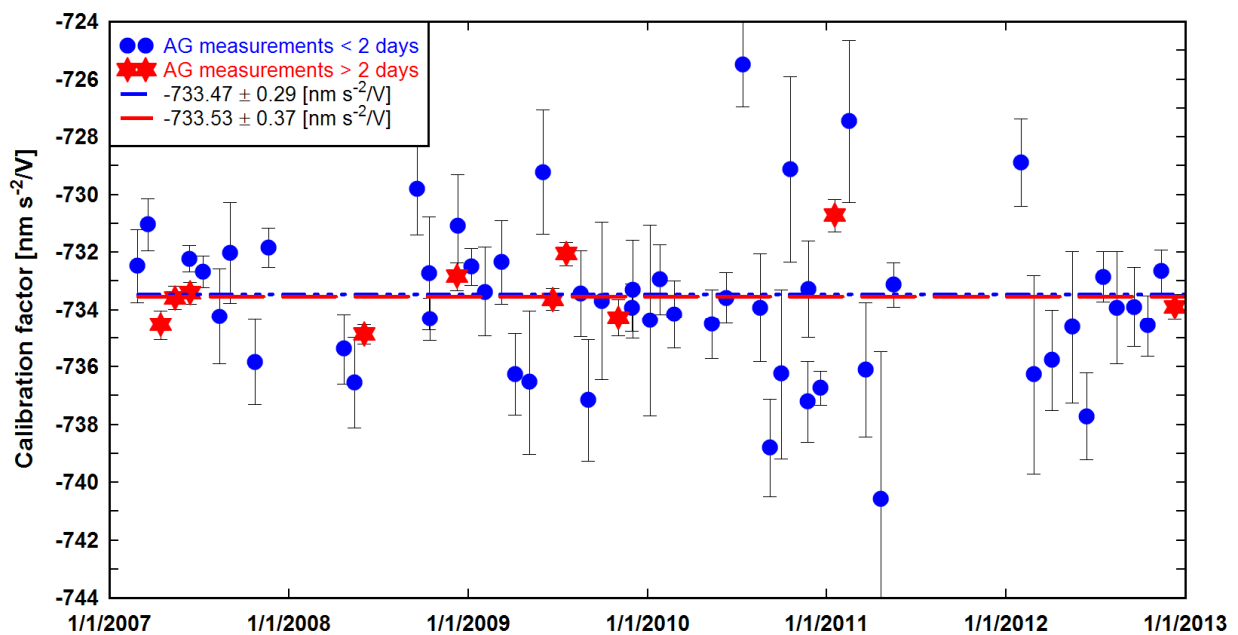
Horní index „ d “ u proměnné $U_{SG}^{d,\Delta}(t+\tau)$ znamená, že signál SG by měl být zbaven instrumentálního chodu (driftu). Nicméně, při této metodě (kombinace po částech) určení měřítka jsou porovnávány časové intervaly AG a SG o maximální délce 7 dní. Při hodnotě chodu SG do 5 $\mu\text{Gal}/\text{rok}$, tak bude záznam SG zatížen chybou z chodu do 0.1 μGal . Odpovídající chyba v určení měřítka záznamu (při slapových variacích 200 μGal) bude menší než 0.01%, kterou lze považovat za zanedbatelnou. Zavedení korekce z chodu do záznamu je ovšem triviální záležitostí, která zajistí, že se není potřeba s uvedenou chybou (má systematický charakter) dále zabývat.

Horní index „ Δ “ u proměnné $U_{SG}^{d,\Delta}(t+\tau)$ označuje, že signál SG musí být zbaven případných skoků v záznamu.

Určení záznamu SG podle vztahu (1) pomocí metody nejmenších čtverců je nejčastěji používanou metodou [2,5,8,9]. Hodnoty měřítka záznamu OSG-050 byly vypočteny ze vztahu (1) samostatně pro 63 měřických kampaní (celkem 78 dní simultánního měření) s absolutním gravimetrem FG5#215. Je potřebné vzít do úvahy, že jednotlivé volné pády v rámci absolutní kampaně nemají stejnou přesnost (např. kvůli zemětřesení v konkrétním časovém intervalu) a tudíž je potřebné pečlivě zvolit příslušné váhy při řešení rovnice (1). Běžná měřická kampaň má délku alespoň 12 hodin, během které jsou jednotlivé volné pády uspořádány do tzv. setů. Například měření o délce 24 hodin může být rozděleno na 24 setů, přičemž se v každém setu provede 100 volných pádů. Základní statistika dat se provádí v rámci jednotlivých setů, ke kterým se přiřadí standardní odchylka pádu v daném setu. Právě tyto hodnoty jsou vhodné pro určení vah jednotlivých pádů (v rámci konkrétního setu jsou váhy identické) při vyrovnání metodou nejmenších čtverců. Na obr. 2 jsou znázorněny a v tabulce 1 uvedeny příslušné hodnoty měřítka záznamu včetně středních chyb. Soubor dat byl rozdělen podle délky měřické kampaně (< 2 dny a > 2 dny). Obě skupiny poukazují na velmi konzistentní výsledky kalibrací s překvapivě významným podílem běžných krátkodobých kampaní, které nebyly přímo plánovány v době maximálních slapových variací. Tento výsledek jednoznačně potvrzuje, že není důvod k zanedbávání výsledků krátkodobých kampaní, jak je běžně činěno. Naopak, jediný nesoulad, který lze vyzorovat z obr. 2 je vztažen k delším kalibracím, kdy dochází k výraznému nadhodnocení střední chyby v určení měřítka. V těchto kampaních bylo měřeno 150 pádů za hodinu, místo běžných 100 pádů, a vzhledem ke klidné stanici jakou je Pecný (střední chyba pádu asi 5 μGal), velký počet měření nebyl efektivní, protože sloužil pouze ke zvýšení formální přesnosti měření, ale nikoliv ke zvýšení vnější přesnosti. Finální měřítka záznamu ($-733.49 \pm 0.23 \text{ nm s}^{-2}/\text{V}$) bylo vypočteno váženým průměrem výsledků z Tab. 1.

Tab.1. Výsledky určení měřítka OSG-050 ze simultánních měření s FG5#215. Výsledky jsou rozděleny podle délky simultánního měření

	Počet kampaní	Celkem dnů	Průměrná slapová variace [μGal]	Celkem pádů	Měřítka [$\text{nm s}^{-2}/\text{V}$]
AG < 2 dny	53	54	170	148445	-733.47 ± 0.29
AG > 2 dny	10	24	240	81412	-733.53 ± 0.37



Obr. 2. Výsledky měřítka OSG-050 ze simultánních měření s FG5#215

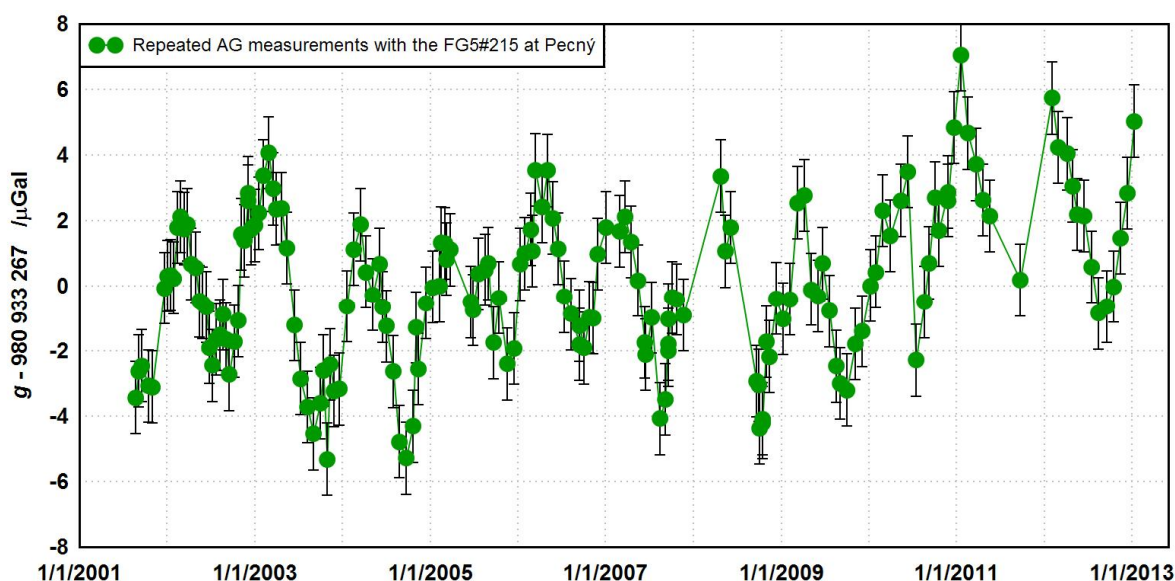
Jak bylo uvedeno výše, rovnice (1) je nejčastěji používána k určení měřítka SG. Nicméně, v [8] je tato rovnice rozšířena o člen vyjadřující rozdíl mezi lineárním instrumentálním chodem absolutního a supravodivého gravimetru d_{AG} :

$$g_{AG}^F(t) + v = g_0 + S U_{SG}^{d,\Delta}(t + \tau) + d_{AG} t. \quad (2)$$

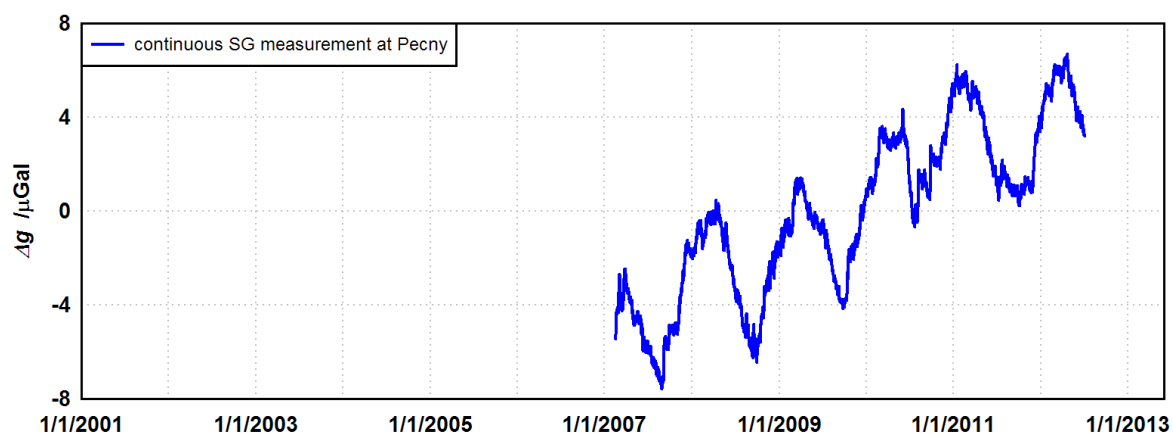
Vzhledem k tomu, že určování chodu SG je z krátké časové řady irelevantní, tak parametr chodu má vlastně vystihnout chod AG. Tato skutečnost je ovšem neslučitelná se samotnou podstatou AG. Poznamenejme, že z výsledků setů při měření absolutní hodnoty tíhového zrychlení, mohou být sice patrné např. trendy ve výsledcích. Ty ovšem nutně nesouvisí s „chodem“ instrumentální povahy, ale nejčastěji poukazují na problematiku nepřesného určení atmosférické korekce pouze na základě měřeného tlaku vzduchu v místě měření [10]. V takovém případě je ale charakter změny tíhového zrychlení environmentálního původu a stejná změna bude patrná i ze záznamu SG. Úprava rovnice (1) na (2) je tedy neopodstatněná. Častým původem případného „chodu“ v absolutním měření může ovšem být i např. nedostatečná kontrola a následná oprava vertikality laserového svazku. V tomto případě by dodatečný člen v rovnici (2) měl své oprávnění, ale aplikovat takovýto přístup a-priori je z hlediska absolutní gravimetrie nesprávný. Nedostatečné podchycení změn vertikality, případně jiného parametru měření poukazuje na chybné měření a obsluhu AG a jako takovou ji pak není správné automaticky zahrnovat do observační rovnice. Použijeme-li při vyrovnání rovnici (2) místo (1), tak statisticky významná hodnota "chodu" d_{AG} na větším souboru dat může poukazovat na problém s absolutním měřením. Z tohoto důvodu byly výsledky kalibrací na stanici Pecný zpracovány i podle rovnice (2). Hodnota $d_{AG} = (0.35 \pm 0.70) \text{ nm s}^{-2}/\text{den}$ se ukázala být statisticky blízká očekávané nulové hodnotě a tím pádem nebyl významný ani rozdíl mezi průměrnými kalibračními koeficienty podle (1) a (2), $(-733.49 \pm 0.23) \text{ nm s}^{-2}/V$ vs. $(-733.42 \pm 0.21) \text{ nm s}^{-2}/V$.

2.2 Analýza rozdílů AG a SG

Pravidelná absolutní tíhová měření na GO Pecný s gravimetrem FG5#215 probíhají od roku 2001, viz obr. 3. Od roku 2007 je změna tíhového zrychlení zároveň sledována pomocí supravodivého gravimetru OSG-050, viz obr. 4. Exaktní porovnání obou časových sérií by mělo být provedeno na bázi jednotlivých volných pádů a bez zavedení korekcí ze slapů, pohybu pólu a atmosféry [2,7,10]. Nicméně tento přístup bude řešen až v kapitole 3. Nejběžnějším a nejjednodušším přístupem je porovnání „korigovaných“ hodnot zrychlení (tíhového zrychlení) na bázi finálních výsledků (průměrů z několika tisíců pádů) jednotlivých absolutních kampaní. V tomto případě je ovšem potřebné zajistit, aby korekce obou časových sérií (AG a SG) byly identické. Tuto skutečnost je důležité ověřit zejména u slapové korekce, která může být odlišná při použití různých software.



Obr. 3. Hodnoty tíhového zrychlení z opakovaných měření s FG5#215 na GO Pecný.



Obr. 4. Časová série změn tíhového zrychlení ze supravodivého gravimetru (bez odstranění chodu gravimetru) na GO Pecný.

Další otázkou je výpočet zrychlení SG v čase vztaženého k výsledku AG. Absolutní měření je dáno pouze konečným výsledkem konkrétní měřické kampaně o délce alespoň 12-24 hodin. Nabízí se tedy řešení, že se hodnota SG vypočte jako průměr korigovaného signálu během trvání absolutní kampaně. Jednodušším a dostatečně přesným řešením je ale i filtrace signálu SG použitím digitálního filtru s konečnou impulzní odezvou a dolní propustí s hraniční periodou 12-24 hodin. Průměrným časům absolutního měření se pak jednoduše přiřadí filtrovaný signál SG.

Rozdíly mezi signály z AG a SG jsou předmětem výpočtu chodu SG a analýzy přesnosti AG. Korekce chodu SG (d_I) je vypočtena z rozdílů výsledků obou technik pomocí regresního polynomu (nejčastěji přímky).

$$g_{AG}(t) - g_{SG}(t + \tau) + v = d_0 + d_1 t \quad (3)$$

Směrodatná odchylka z vyrovnání fakticky vyjadřuje přesnost absolutních měření, protože přesnost SG je o řád vyšší a záznam SG lze tudíž považovat za bezchybný. Zdůrazněme, že záznam SG musí být zbaven veškerých případných skoků v datech. U absolutního gravimetru lze po významných zásazích do gravimetru (změna elektroniky, výměna testovacího objektu atd.) předpokládat změnu systematické chyby. V takovýchto případech je potřebné rovnici (3) rozšířit

$$g_{AG}(t) - g_{SG}(t + \tau) + v = d_0 + d_1 t + O(t), \quad (4)$$

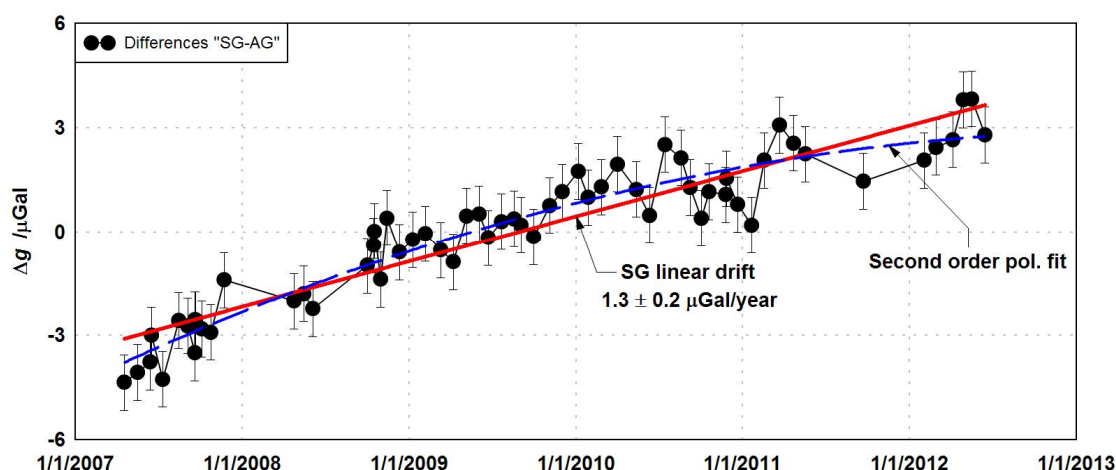
kde

$O(t)$ [μGal] ... vyjadřuje funkci změn offsetu absolutního gravimetru v čase. Obecnou funkci změny offsetu AG pak zapsat

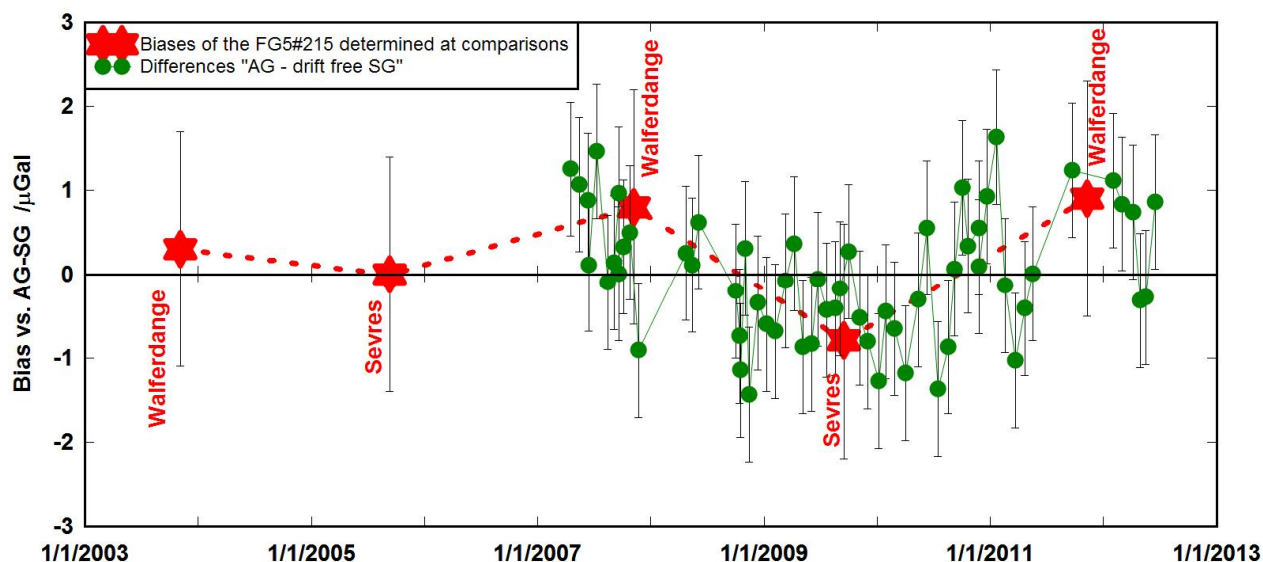
$$O(t) = \begin{cases} O_j & \Leftrightarrow t \in [t_j, t_{j+1}] \\ 0 & \end{cases} \quad (5)$$

neboli definujeme intervaly $[t_j, t_{j+1}]$ kdy lze očekávat změnu offsetu absolutního gravimetru.

Na obr. 5 jsou znázorněny rozdíly SG a AG včetně vyjádření chodu SG polynomem prvního a druhého stupně. Poznamenejme, že chod SG je kladný (z rozdílů SG-AG) a korekce chodu z rovnice (4) tedy záporná. Pro odhad chodu metodou nejmenších čtverců byla použita rovnice (3), jelikož z rozdílů SG-AG a také výsledků porovnávacích měření (viz obr. 6) nebyla zaznamenána změna offsetu gravimetru.



Obr. 5. Chod OSG-050 vypočtený z rozdílů mezi OSG-050 a FG5#215



Obr. 6. Opravy z vyrovnání (zelené body) ze vztahu (4) představují rozdíly mezi měřením absolutního gravimetru FG5#215 a supravodivého gravimetru OSG-050 (včetně korekce chodu) na stanici Pecný. Červenými symboly jsou uvedeny výsledky systematických chyb absolutního gravimetru FG5#215 zjištěné na porovnávacích měřeních absolutních gravimetrů.

3. KOMPLEXNÍ KOMBINACE

Komplexní kombinace dat supravodivého a absolutního gravimetru, kdy jsou porovnávány signály z obou přístrojů pouze na bázi jednotlivých volných pádů absolutního gravimetru, nejlépe vystihuje samotnou observaci a je prakticky prosta zjednodušení, která sebou přináší metoda po částech. Na druhou stranu se tato metoda může jevit jako těžkopádná zejména z dlouhodobého pohledu, kdy je potřebné vždy zpracovávat všechna měření najednou. To samozřejmě není problematické při současné počítačové technice, ale vyžaduje to smysluplnou organizaci dat a jednoduché rozšíření souboru dat. Tato metoda kombinace byla publikována v [11]. Vztah mezi měřeními lze obecně vyjádřit

$$g_{AG}^F(t) = g_0 + S(t) \left[U_{SG}^A(t + \tau) + d(t) \right] + O(t), \quad (6)$$

kde

$g_{AG}^F(t)$ [μGal] ... je absolutní hodnota zrychlení volného pádu pro jednotlivé pády absolutního gravimetru v čase t . Jedná se tedy o hodnoty bez zavedení korekcí z variace tíhového pole (slapy, pohyb pólu, atmosféra),

g_0 [μGal] ... je konstantní člen vyjadřující vzájemný posun obou signálů,

$S(t)$ [μGal/V] ... je měřítko (kalibrační faktor) záznamu supravodivého gravimetru vyjádřeného jako funkce času,

$U_{SG}^A(t + \tau)$ [V] ... je signál SG (interpolovaný z minutových dat) odpovídající volného pádu AG v čase t , tj. s uvažováním časového zpoždění τ signálu SG. Horní index „A“ značí, že signál SG musí být zbaven případných skoků v záznamu.

$d(t)$ [V] ... je chod SG vyjádřený jako funkce času.

$O(t)$ [μGal] ... vyjadřuje funkci změn offsetu absolutního gravimetru v čase.

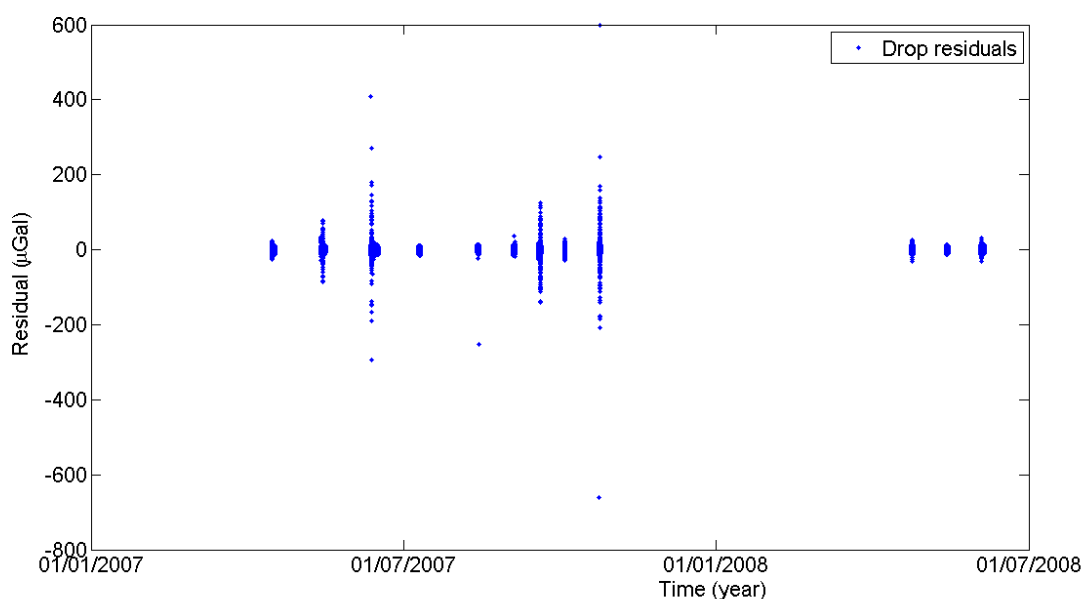
Obecné funkce měřítka záznamu $S(t)$ a chodu gravimetru $d(t)$ je možné jednoduše vyjádřit polynomy nízkého stupně. V případě měřítka záznamu nebyla u žádného SG zaznamenána změna měřítka a tudíž je dostatečné jeho vyjádření polynomem nultého stupně, neboli konstantou S . Chod SG je nejčastěji vyjádřen polynomem prvního stupně, ale u dlouhodobých observací se lze setkat s potřebou vyjádření polynomem druhého stupně. V tomto textu vyjádříme chod resp. korekci chodu polynomem prvního stupně $d(t) = d_0 + d_1 t$. Funkce offsetu je vyjádřena stejně jako v kapitole 2.2

Observační rovnice pro i -tý volný pád absolutního gravimetru v čase t_i je

$$g_{AG}^F(t_i) + v_i = g_0 + S U_{SG}^\Delta(t_i + \tau) + S d_1 t_i + O_j \quad (7)$$

Dostáváme tak soustavu lineárních rovnic, která bude řešena vyrovnaním pomocí metody nejmenších čtverců. Observace SG považujeme za bezchybné a opravy se vztahují pouze k absolutním měřením. Jednotlivé volné pády ale nemají stejnou přesnost a stejným způsobem jak bylo popsáno v kapitole 2.1 použijeme k přiřazení vah hodnot standardních odchylek pádů v rámci jednotlivých setů. Uvedený postup kombinace vede pro data z roku 2007 a 2008 k následujícím výsledkům:

- měřítka SG, $S = -73.332 \pm 0.021 \mu\text{Gal/V}$,
- korekce chodu SG, $d_1 = -0.721 \pm 0.055 \mu\text{Gal/rok}$,
- příslušné opravy jsou pak na obr. 7.



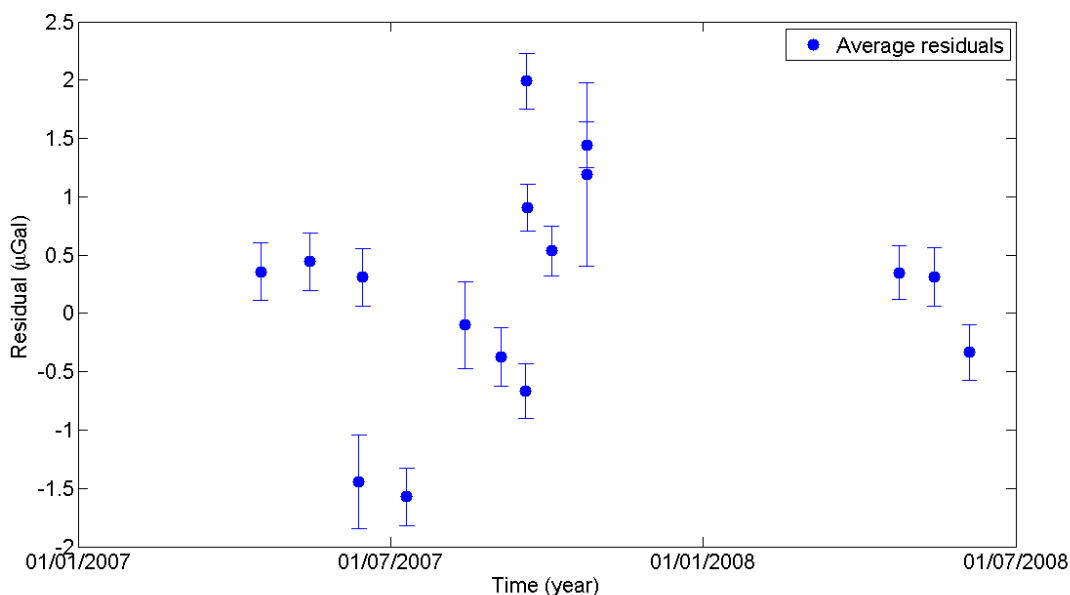
Obr. 7. Hodnoty oprav pro jednotlivé pády při použití komplexní kombinace podle vztahu (7).

4. POROVNÁNÍ METOD KOMBINACE

Pro porovnání obou metod kombinace byl zpracován metodou kombinace po částech stejný soubor dat, který byl použit u komplexní kombinace. Výsledky jsou následující:

- měřítko SG, $S = -73.381 \pm 0.029 \mu\text{Gal/V}$,
- korekce chodu SG, $d_I = -1.951 \pm 0.433 \mu\text{Gal/rok}$.

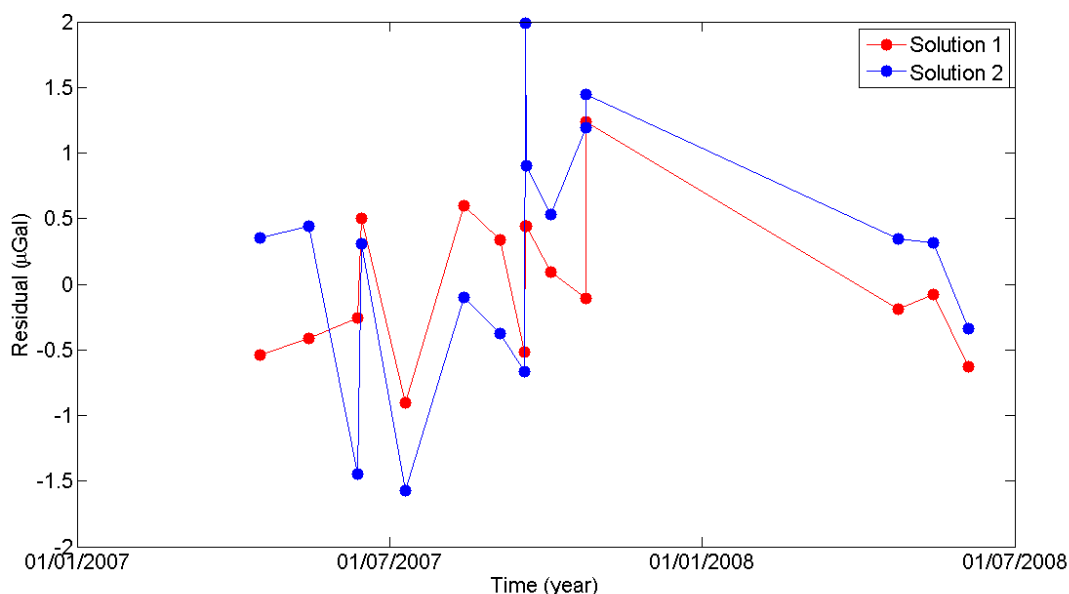
U výsledků měřítka SG byla dosažena shoda na hladině významnosti 5%. U chodu gravimetru je významný rozdíl i na hladině významnosti 0.1%. Evidentní je výrazné podhodnocení střední chyby chodu u komplexní kombinace, která je daná skutečností, že je zpracováváno velké množství pádů a dochází k formálnímu zvýšení přesnosti v určení chodu. Tento efekt je patrný i z obr. 8, kde jsou znázorněny průměrné opravy z obr. 7 v rámci jednotlivých kampaní. U celé řady měření je patrné podhodnocení přesnosti průměrných oprav, neboli samotné přesnosti absolutní kampaně.



Obr. 8. Průměrné hodnoty oprav v rámci jednotlivých kampaní z obr. 7. Chybové úsečky vyjadřují pouze formální přesnost průměru a nelze je použít k charakterizaci přesnosti absolutního měření.

Porovnáme-li opravy z obr. 8 s výsledky kombinace po částech (viz obr. 9), dospějeme k rozdílu překračující u některých kampaní $1 \mu\text{Gal}$. Je zcela zjevné, že z kombinace po částech je čtverec těchto oprav výrazně nižší. Je to přirozené, jelikož u kombinace po částech bylo absolutní měření v druhém kroku (pro určení chodu) charakterizováno právě jednou hodnotou a nikoliv souborem jednotlivých pádů. Tím se ale dostáváme k zásadnímu problému komplexní kombinace nastíněné již v kapitole 2 a tím je rozdíl mezi vnitřní a vnější přesností absolutního měření. U komplexní kombinace jsou opravy přirozeně vztaženy k jednotlivým volným pádům, které jsou uvažovány jako nezávislé. Skutečnost je ovšem odlišná. Volné pády jsou v rámci měřické kampaně vlastně korelovány. Uvážíme-li střední chybu jednoho pádu $5 \mu\text{Gal}$, pak při uvážení pouze náhodných chyb bude mít průměr v rámci kampaně přesnost asi $0.10 \mu\text{Gal}$. Reálná přístrojová přesnost výsledků jednotlivých kampaní je ale okolo $0.8 \mu\text{Gal}$ [2], jak je ostatně vidět i z obr. 6, 9. Zjednodušeně řečeno, náhodné rozdělení chyb kampaní od kampaně s rozdělením přibližně $N(0, 0.7)$ působí jako systematická chyba v

rámci konkrétní kampaně, která má náhodné rozdělení chyb např. $N(0, 5)$. Tato skutečnost ovšem musí být náležitě zohledněna a to uvážením odpovídajících korelací v matici vah při vyrovnání metodou nejmenších čtverců. Diagonální matice vah pro (7) tuto korelaci samozřejmě nereflektuje a práce s plnou maticí vah při počtu volných pádů několik set tisíc naráží na výpočetní potíže. Korelaci mezi měřeními by z praktického hlediska nebylo potřebné uvažovat pouze v případě, pokud by všechny pády měly stejnou váhu a zároveň každá kampaň obsahovala stejný počet pádů. Pro reálný soubor dat je ovšem zřejmé, že při použití komplexní kombinace bez korelát budou mít na určení chodu větší váhu ta absolutní měření, která obsahují velký počet volných pádů.



Obr. 9. Porovnání průměrných oprav pro jednotlivé kampaně absolutních měření z obou řešení (červeně – řešení po částech, modře – komplexní kombinace).

5. ZÁVĚR

Tato metodika obsahuje dva postupy pro kombinaci dat z absolutního a supravodivého gravimetru: 1) kombinaci po částech a 2) komplexní kombinaci. Cílem této metodiky bylo porovnat oba používané přístupy k určení měřítka a chodu supravodivého gravimetru a stanovit vhodnou metodiku kombinace. Byla prokázána nevhodnost použití komplexní kombinace. Důvodem je skutečnost, že pro hledané parametry je v soubor dat z absolutního gravimetru potřebné uvažovat s více náhodnými rozděleními (vzhledem k různé vnitřní a vnější přesnosti měření) a to je v rozporu s použitím metody nejmenších čtverců (bez uvážení korelací) k odhadu hledaných parametrů. Kombinace výsledků absolutního a supravodivého gravimetru musí být založena na kombinaci po částech. Pro odstranění největší nevýhody kombinace po částech (separátní zavádění korekcí do absolutních a supravodivých dat) je vhodné zajistit výpočet korekcí jednotlivých pádů na základě dat supravodivých gravimetrů s předem stanoveným měřítkem.

LITERATURA

- [1] Jiang Z, Pálinskáš V, et al. The 8th International Comparison of Absolute Gravimeters 2009: the first Key Comparison (CCM.G-K1) in the field of absolute gravimetry, *Metrologia*, 49, 2012, 666-684.
- [2] Pálinskáš V, Kostelecký J.(ml.), Vaľko M. Charakteristiky přesnosti absolutního gravimetru FG5 č. 215. *Geodetický a kartografický obzor*, ročník 58/100, 2012, číslo 5, 97-102.
- [3] Van Camp M. Uncertainty of absolute gravity measurements. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, 2005, B05406.
- [4] Goodkind, JM. The superconducting gravimeter. *Review of Scientific Instruments*, 1999, Vol. 70, 4131–4152.
- [5] Francis O., Niebauer T., Sasagawa G., Klopping F. and Gschwind J. Calibration of a superconducting gravimeter by comparison with an absolute gravimeter FG5 in Boulder. *Geophysical Research Letters*, 25(7), 1075-1078, 1998.
- [6] Plag HP, Rothacher M, Pearlman M. The Global Geodetic Observing System. *Geomatics World*, Mar/Apr. 2009, 22-25.
- [7] Kostelecký J (ml.), Pálinskáš V., Šimon Z. Měření tíhového zrychlení a absolutní gravimetr FG5 č. 215 na Geodetické observatoři Pecný. *Geodetický a kartografický obzor*, 48 (90), 2002, č. 11, s. 205-214.
- [8] Meurers B. Superconducting Gravimeter Calibration by Colocated Gravity Observations: Results from GWR C025. *International Journal of Geophysics*, Volume 2012, Article ID954271, doi:10.1155/2012/954271
- [9] Imanishi Y, Higashi T, Fukuda Y. Calibration of the superconducting gravimeter T011 by parallel observation with the absolute gravimeter FG5#210 - a Bayesian approach. *Geophys. J. Int.* (2002) 151, 867–878.
- [10] Vaľko M, Pálinskáš V, Kostelecký J (ml.). Korekce absolutních tíhových měření z atmosférických vlivů. *Geodetický a kartografický obzor* 04/2013.
- [11] Wziontek H, Falk R, Wolf P. Precise Gravity Time Series and Instrumental Properties from Combination of Superconducting and Absolute Gravity Measurements. *International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 133, 2009.