

Metodika postupu jednotného zpracování absolutních měření tíhového zrychlení

Konečný uživatel výsledků: **Český úřad zeměměřický a katastrální**
Pod sídlištěm 1800/9, 182 11 Praha 8 Kobylisy

Název projektu: Zvýšení přesnosti a spolehlivosti určení tíhového zrychlení na absolutních tíhových bodech v ČR

Číslo projektu: TITSCUZZK704

Řešitel projektu: Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i., Ústecká 98, 250 66 Zdice

Doba řešení: 1. 1. 2019 – 30. 11. 2021

Důvěrnost a dostupnost: veřejně přístupný

Informace o autorském týmu:

Ing. Vojtech Pálinkáš, Ph.D.

Ing. Miloš Val'ko, Ph.D.

**Další informace o projektu:**

Cílem projektu je vytvoření metodiky pro určení vertikálních gradientů tíhového zrychlení (zejm. za účelem přenosu hodnoty tíhového zrychlení z referenčního bodu absolutního gravimetru do úrovně stabilizace tíhového bodu). Dalším cílem je vytvoření metodiky pro stanovení sezónních změn tíhového zrychlení (zejm. na základě experimentálně ověřených hydrologických vlivů) a vytvoření metodiky pro jednotné zpracování absolutních tíhových měření (se zahrnutím jak stávajících, tak nově zjištěných přístrojových oprav i z lokálního vlivu okolního prostředí).



Metodika jednotného zpracování absolutních měření tíhového zrychlení

1. Úvod

Tento dokument je jedním z výstupů řešení projektu TITSCUZK704 „Zvýšení přesnosti a spolehlivosti určení tíhového zrychlení na absolutních tíhových bodech v ČR“ programu BETA2 Technologické agentury ČR. Je výstupem 12. kvartálu řešení projektu v části, jejímž výsledkem je vytvoření „Metodiky postupu jednotného zpracování absolutních měření tíhového zrychlení se zavedením všech (vč. nedávno zjištěných) oprav z vlivu přístrojů, resp. lokálního vlivu okolního prostředí“. Dokument obsahuje finální verzi metodiky na základě již implementovaných postupů pro zpracování všech etap měření.

2. Zpracování měření absolutních gravimetrů FG5(X)

2.1 Matematický model observační rovnice

U absolutních gravimetrů s makroskopickými testovacími tělesy je k měření pohybu volně padajícího tělesa použit interferometr. Interferenční proužky jsou detekovány fotodiodou a k jednotlivým průchodům nulou jsou přiřazeny vzorky času. Měřenými veličinami jsou tedy dvojice časů t_i ($t=0$ je dáno počátkem zahájení sběru dat) a vzdáleností z_i (průchody nulou interferenčních proužků), které jsou násobky poloviny vlnové délky laseru, viz Niebauer et al. (1995) nebo Kostecký et al. (2012).

V prvním kroku je potřebné měřené časové vzorky opravit o časové zpoždění v důsledku konečné rychlosti světla c pomocí vztahu

$$\tilde{t}_i = t_i + k_{SOL} \frac{(z_i - z_0)}{c}, \quad (1)$$

kde $k_{SOL}=1$ je koeficient stanovující charakter odstranění časového zpoždění.

U nejpresnějších současných gravimetrů typu FG5 (Niebauer et al. 1995) a FG5X (Niebauer et al. 2011), jsou použity jodem stabilizované He-Ne lasery WEO 100 s modulací vlnové délky na frekvenci f_m . Vliv modulace laseru s uvážením proměnlivých délek ramen interferometru je podle Křen et al. (2020) vhodné modelovat vztahem

$$z_{mod} = a_1 \sin(2\pi f_m \tilde{t}_i) \cos(2\pi f_m \frac{2z_i}{c}) + a_2 \cos(2\pi f_m \tilde{t}_i) \cos(2\pi f_m \frac{2z_i}{c}) + \\ a_3 \sin(2\pi f_m \tilde{t}_i) \sin(2\pi f_m \frac{2z_i}{c}) + a_4 \cos(2\pi f_m \tilde{t}_i) \sin(2\pi f_m \frac{2z_i}{c}), \quad (2)$$

kde a_1, a_2, a_3, a_4 jsou sinové a kosinové amplitudy modulace laseru.

Dále je možné modelovat efekt modulace vzduchové mezery mezi pádovou nádobou a interferometrem v důsledku vibrací způsobených excentricitou kladky, po které se posunuje pás s vozíkem, který sleduje testovací těleso během volného pádu. Efekt lze podle Křen et al. (2020) vyjádřit vztahem

$$z_{air} = a_5 \sin(2\pi z_i / \Lambda) + a_6 \cos(2\pi z_i / \Lambda), \quad (3)$$

kde Λ je vlnová délka modulace odpovídající obvodu kladky (44 mm u gravimetrů FG5 a 122 mm u FG5X).

Výpočet zrychlení volného pádu g v tíhovém poli s konstantním vertikálním gradientem tíhového zrychlení γ se provede řešením observační rovnice

$$z_i = z_0 + v_0 \left(\tilde{t}_i + \frac{\gamma}{6} \tilde{t}_i^3 \right) + g_0 \left(\frac{\tilde{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma}{24} \tilde{t}_i^4 \right) + z_{mod} + z_{air} \quad (4)$$

Obecně bude tedy výchozí observační rovnice dána vztahem

$$z_i = z_0 + v_0 \left(\tilde{t}_i + \frac{\gamma}{6} \tilde{t}_i^3 \right) + g_0 \left(\frac{\tilde{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma}{24} \tilde{t}_i^4 \right) + \sum_j a_j f_j(t_i, z_i), \quad (5)$$

kde jsou hledané neznámé poloha z_0 , rychlost v_0 , zrychlení volného pádu g_0 v čase $t=0$ a a_j jsou hledané amplitudy efektů vyjádřených funkcí f_j . Tyto neznámé jsou určeny řešením rovnice (5) metodou nejmenších čtverců (MNC).

2.2 Vyrovnání MNC - výpočet zrychlení volného pádu

Cílem vyrovnání je odhadnout hodnoty a standardní odchylky vektoru neznámých

$$\mathbf{x}^T = (z_0, v_0, g_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)$$

Jeden řádek matice plánu A bude mít tvar:

$$A_i = \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{t}_i + \frac{\gamma}{6} \tilde{t}_i^3 \\ \frac{\tilde{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma}{24} \tilde{t}_i^4 \\ \sin(2\pi f_m \tilde{t}_i) \cos\left(2\pi f_m \frac{2z_i}{c}\right) \\ \cos(2\pi f_m \tilde{t}_i) \cos\left(2\pi f_m \frac{2z_i}{c}\right) \\ \sin(2\pi f_m \tilde{t}_i) \sin\left(2\pi f_m \frac{2z_i}{c}\right) \\ \cos(2\pi f_m \tilde{t}_i) \sin\left(2\pi f_m \frac{2z_i}{c}\right) \\ \sin(2\pi z_i / \Lambda) \\ \cos(2\pi z_i / \Lambda) \end{pmatrix}^T \quad (6)$$

Předpokládáme, že každý prvek měření z_i (vzdálenost odpovídající průchodu nulou) tvořící sloupcový vektor \mathbf{l} má stejný rozptyl, tj. váhová matice je jednotková a odhad neznámých lze vypočítat podle vztahu

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (7)$$

a odhad kovarianční matice neznámých parametrů získáme pomocí vztahu

$$\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}} = \sigma_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}. \quad (8)$$

Veličina σ_0^2 je jednotková variance (referenční rozptyl) a je definována pomocí vztahu

$$\sigma_0^2 = \frac{(\mathbf{l} - \mathbf{A} \mathbf{x})^T (\mathbf{l} - \mathbf{A} \mathbf{x})}{n - k}, \quad (9)$$

kde n je dimenze vektoru měřených vzdáleností a k je dimenze vektoru neznámých.

Výsledky zrychlení volného pádu z řešení (7) je pak vhodné (viz sekce 2.3) z g_0 v čase $t=0$ přepočíst na vrchol pádu, což lze s dostatečnou přesností podle Pálinkáš et al. (2019) učinit podle vztahu

$$g_{top} = g_0 - \gamma \frac{v_0^2}{2 g_0}. \quad (10)$$

Podle Pálinkáš et al. (2012) je potřebné rovnici (5) také vyřešit i pro homogenní gravitační pole $\gamma=0$

$$z_i = z_0^* + v_0^* \tilde{t}_i + g_0^* \frac{\tilde{t}_i^2}{2} + \sum_j a_j^* f_j(t_i, z_i). \quad (11)$$

tj. změni se matice plánu z (6) pro $\gamma=0$ na A^* a přirozeně bude pak jiný i odhad vektoru neznámých $x^* = (A^{*T} A^*)^{-1} A^{*T} l$, díky kterému se přímo určí zrychlení volného pádu g_0^* v efektivní pozici volného pádu z^* (Pálinkáš et al. 2012).

2.3 Výpočet efektivní a referenční výšky měření

Efektivní pozice volného pádu se podle (Pálinkáš et al. 2012) určí empiricky s vysokou přesností (lepší než 0.1 mm) podle vztahu

$$z^* = \frac{g_0^*(\gamma=0) - g_0(\gamma)}{\gamma} + z_0(\gamma) \quad (12)$$

kde γ je gradient (předběžný nebo známý) použitý při výpočtu g_0 a z_0 z modelu (5). Odpovídající efektivní výška měření (Niebauer 1989, Nagorny 1995) se stanoví od pozice z_0 (vztažena k $t=0$, tj. počátku záznamu dat) podle vztahu

$$h^* = z^* - z_0 = \frac{g_0^*(\gamma=0) - g_0(\gamma)}{\gamma}, \quad (13)$$

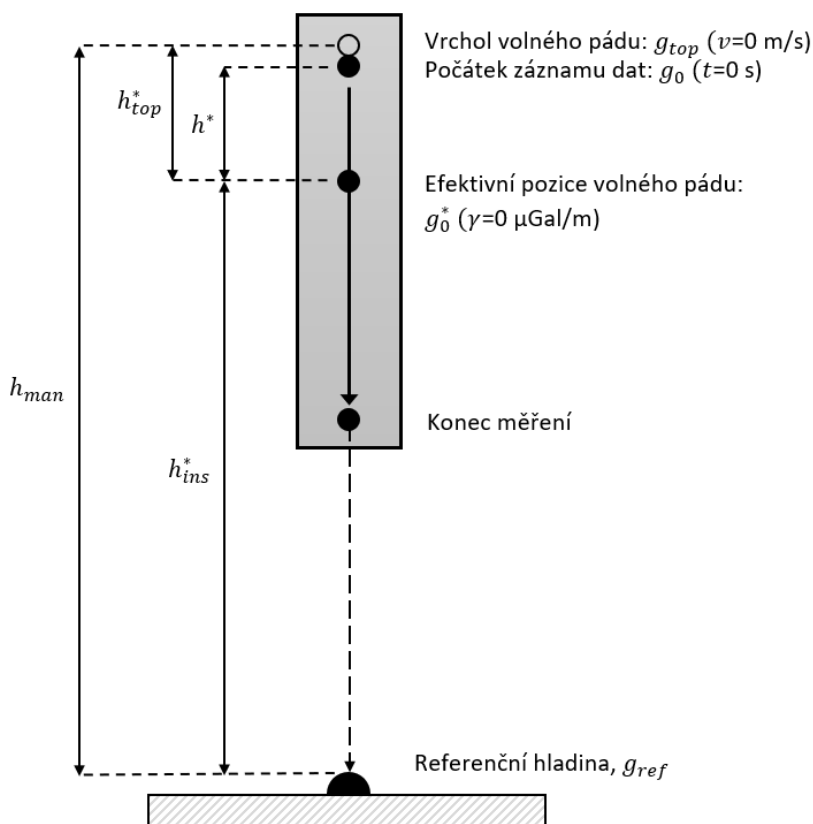
nebo od vrcholu pádu (Pálinkáš et al. 2019)

$$h_{top}^* = h^* + v_0^2 / 2 g_0. \quad (14)$$

Právě vrchol pádu je místem, ke kterému lze na základě údajů od výrobce a měřené výšky gravimetru nad bodem stanovit výšku měření nad tíhovým bodem h_{man} . Podle Wziontek et al. (2021) je při absolutním měření nezbytné stanovit a reportovat tzv. efektivní instrumentální výšku h_{ins}^* , která je definovaná jako vzdálenost efektivní pozice volného pádu od vrcholu značky tíhového bodu, viz obr. 1.

$$h_{ins}^* = h_{man} - h_{top}^* \quad (15)$$

Znalost této výšky, která závisí na typu gravimetru, rozsahu zvoleného intervalu interferenčních proužků pro výpočet g a na samotné instalaci gravimetru nad bodem, je nezbytná ke správnému referencování tíhových měření a k redukcím měření podél vertikály.



Obr.1. Schematické vyjádření efektivní pozice volného pádu, ve které je g nezávislé na konstantním vertikálním gradientu tíže (VGG) γ použitým v observační rovnici (5). Efektivní výška měření (h^* nebo h_{top}^*) má svůj počátek v samotném gravimetru (počátek záznamu dat nebo vrchol volného pádu) a závisí pouze na rozsahu volného pádu, který je použit k výpočtu g . Efektivní instrumentální výška (h_{ins}^*) závisí také na postavení gravimetru nad tíhovým bodem a musí být známa pro korektní transfer výsledků na zvolenou referenční hladinu pomocí VGG, který se může lišit od γ a může být vyjádřen polynomem vyššího stupně.

2.4 Výpočet vertikálního gradientu tíhového zrychlení

Podle Pálinkáš et al. (2019) a Robertson (2001) je při zpracování absolutních měření také vhodné vypočítat vertikální gradient přímo z absolutních měření γ_{ABS} , a to řešením observační rovnice, kde další parametry určené MNC jsou také $z_{0,ABS}$ a $v_{0,ABS}$

$$z_i - g_0^* \frac{\tilde{t}_i^2}{2} - \sum_j a_j^* f_j(t_i, z_i) = z_{0,ABS} + v_{0,ABS} \tilde{t}_i + \gamma_{ABS} \left(\frac{v_0^*}{6} \tilde{t}_i^3 + \frac{g_0^*}{24} \tilde{t}_i^4 - \frac{h^*}{2} \tilde{t}_i^2 \right). \quad (16)$$

2.5 Korekce na konvenční hodnotu tíhového zrychlení

K určení tíhového zrychlení \hat{g} je nutné zavést vybrané korekce variací zrychlení volného pádu tak, aby byla výsledná veličina v souladu s konvencí (Petit and Luzum, 2010) International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) a standardy definovanými v souladu s Wziontek et al. (2021):

- z variací slapového zrychlení tak, aby byly slapové korekce v "zero-tide" systému (Petit and Luzum 2010) za použití slapových modelů či slapových parametrů určených měření,
- ze změn odstředivého zrychlení v důsledku pohybu pólu CIP vzhledem k pólu TIO definovanému IERS (Petit and Luzum 2010) postupem podle Wziontek et al. (2021),
- o účinek anomálních vzdušných hmot podle Wziontek et al. (2021) na základě měřeného tlaku vzduchu P v místě tíhového měření a regresního koeficientu vlivu tlaku vzduchu r_p .

Soubor vstupních parametrů konkrétní měřické kampaně musí obsahovat informace o slapových parametrech, souřadnicích pohybu pólu a koeficientu r_p .

Ke každému volnému pádu jsou přiřazeny hodnoty atmosférického tlaku P , korekce ze slapů Δg_{tide} , pohybu pólu Δg_{pol} a tlaku vzduchu Δg_p . Dále jsou příslušné korekce připočteny k hodnotě zrychlení volného pádu v pozici pro vrchol pádu

$$\hat{g}_{top} = g_{top} + \Delta g_{tide} + \Delta g_{pol} + \Delta g_p \quad (17)$$

2.6 Výpočet průměrných hodnot tíhového zrychlení

Statistická akceptace pádu probíhá ve dvou krocích.

V prvním kroku je analyzován každý pád samostatně na základě šumu residuí z vyrovnání MNČ při použití observační rovnice (5). Jako charakteristika šumu se použije směrodatná odchylka residuí σ_0 ze vztahu (9). Pokud její hodnota pro konkrétní pád překročí kritickou hodnotu, je následně tento pád vyloučen z dalšího zpracování. Kritická hodnota šumu závisí na použitém gravimetru i místě měření (technickém šumu místa), implicitně lze použít hodnotu 1 nm.

Druhou úrovní akceptace je testování odlehlosti \hat{g}_{top} v rámci výsledků setů (100-150 pádů) na hladině významnosti 1%.

Průměrné tíhové zrychlení v rámci setu $\bar{g}_{top,set}$ se vypočte aritmetickým průměrem výsledků jednotlivých pádů v setu včetně výběrové směrodatné odchylky průměru setu σ_{set} .

Průměrné tíhové zrychlení v rámci celého měření \bar{g}_{top} se z důvodu časté změny vnitřní přesnosti v průběhu měření (zejména díky časově proměnné velikosti technického šumu nebo vlivu zemětřesení) vypočte váženým aritmetickým průměrem výsledků setů $\bar{g}_{top,set}$. Váhy jsou zvoleny úměrně převráceným hodnotám čtverců směrodatných odchylek podle vztahu

$$w_{set} = (\sigma_{set}^2 + \sigma_S^2)^{-1}, \quad (18)$$

kde σ_S je směrodatná odchylka vyjadřující variabilitu možných systematických chyb mezi sety (např. vlivem nastavení vertikality či nedokonalosti odstraněných korekcí zejména z tlaku vzduchu).

Při testování odlehklých hodnot průměru setů od průměru výsledku je použito kritérium Studentova t-rozdělení na hladině významnosti 5%.

Výše uvedené průměrné hodnoty tíhového zrychlení jsou asociované s vrcholem pádu. Hodnota \bar{g}_{top} se dále přepočte do efektivní pozice volného pádu podle vztahu

$$\bar{g}_{ef} = \bar{g}_{top} + \gamma \bar{h}_{top}^* \quad (19)$$

kde \bar{h}_{top}^* je průměrná efektivní výška měření od vrcholu pádu.

2.7 Přístrojové korekce u gravimetrů FG5(X)

Přístrojové korekce absolutních měření lze zavést třemi způsoby a u každého měření musí být zjevné, jaký způsob byl aplikován. Tyto tři způsoby označíme "KP1", "KP2" a "KP3". První způsob "KP1" je obdobný jako u frekvenční modulace laseru (2), nebo modulace vzduchové mezery (3), kdy jsou parametry efektu určovány matematickým modelem v rámci řešení observační rovnice. Druhý způsob "KP2" je zavedení korekcí přímo do měřených veličin (čas, vzdálenost), obdobně jako je to u korekce z konečné rychlosti světla (1), takto mohou být zavedeny některé další korekce (např. z vlastní hmoty přístroje) zmíněné v Pálinkáš et al. (2019). Oba zmíněné způsoby mají tu výhodu, že výsledná residua nejsou zatížena zavedenými efekty v rámci přesnosti použitých modelů a zbytková residua lze pak lépe použít k odhalení dalších efektů. Třetím, nejčastěji používaným způsobem "KP3", je zavedení korekce ve formě konstanty do finálního výsledku měření. U efektů, které nezávisí na poloze testovacího tělesa během volného pádu, je tento způsob zcela správný a také výhodný z hlediska případné aktualizace korekcí (není nutné nové vyrovnání MNC celého souboru měření). U každého absolutního měření musí být tedy jednoznačně uvedeno:

- jaká observační rovnice byla použita pro výpočet výsledků, např. (2), a tím stanovit korekce typu "KP1",
- jaké korekce byly zahrnuty přímo do měřených dvojic čas-vzdálenost, a tím stanovit korekce typu "KP2",
- jaké další korekce ve formě konstanty byly dodatečně započteny, a tím stanovit korekce typu "KP3".

Příslušná informace o způsobu a parametrech zavedených korekcí musí být zřejmá alespoň pro následující efekty:

- z konečné rychlosti světla, typ "KP2" podle (1) s uvedeným parametrem k_{SOL}
- z frekvenční modulace laseru, typ "KP1" daný observační rovnicí a modulační frekvencí laseru.
- z vlivu vlastní hmoty přístroje, která může být typu "KP2" viz Pálinkáš et al. (2019), nebo také častěji typu "KP3", viz např. Pálinkáš et al. (2012), kdy pro gravimetr FG5-215 byla určena hodnota $(-1,7 \pm 0,2) \mu\text{Gal}$. U gravimetru FG5X-251 byly k výpočtu použity údaje publikované v Niebauer et al. (2013) a pro používaný rozsah měření byla určena korekce $(-1,18 \pm 0,1) \mu\text{Gal}$.
- z difrakce laserového svazku (van Westrum and Niebauer 2003, Robertsson 2007, Křen and Pálinkáš 2018), která je typu "KP3" a závisí zejména od použitých optických prvků v interferometru, viz Křen and Pálinkáš (2018) a u obou gravimetrů FG5-215 i FG5X-251 dosahují hodnoty přibližně $+2,7 \mu\text{Gal}$.
- z odklonu laserového svazku od vertikality, která je typu "KP3" a závisí na metodě urovnání testovacího svazku gravimetru do svislice. Hodnoty korekcí jsou pro jednotlivé metody uvedeny v Křen et al. (2018) a dosahují hodnot typicky do $+2 \mu\text{Gal}$.
- z Eötvösova zrychlení, která je typu "KP3" a lze ji stanovit podle postupu uvedeného v Křen et al. (2019), kdy při správné orientaci gravimetru vzhledem ke světovým stranám dosahuje korekce hodnot typicky v rozmezí $\pm 1,5 \mu\text{Gal}$.
- z distorze interferenčního signálu, která je typu "KP3" a u originálních systémů gravimetrů FG5-215 a FG5X-251 reálně dosahuje hodnot od $-5 \mu\text{Gal}$ do $+2 \mu\text{Gal}$, viz Křen et al. (2019) zejména v závislosti na velikosti interferenčních proužků.

- z elektronické disperze v koaxiálním kabelu pro přenos interferenčního signálu podle Křen et al. (2016). Může být typu "KP2" nebo "KP3", závisí na použité délce kabelu, délce pádu a typu přenášeného signálu. U používaných měřicích systémů gravimetrů FG5-215 a FG5X-251 dosahuje hodnot do 1 μGal .
- z impedančního nepřizpůsobení mezi elektronikou gravimetru a fotodiodou specifikované v Křen et al. (2017). Může být typu "KP2" nebo "KP3", závisí na použité délce kabelu, délce pádu a velikosti nepřizpůsobení. HS5 systém je impedančně přizpůsoben, U originálních systémů FG5-215 a FG5X-251 dosahuje korekce hodnot do 2 μGal .
- ze systematické odchylky gravimetru od referenční hodnoty, viz např. Pálinkáš et al. (2013).

Identifikace zavedených korekcí ve výstupech z měření je popsána v sekci 4 této metodiky.

2.8 Korekce z vlivu lokálního prostředí

Výchozí observační rovnice (5) uvažuje konstantní gradient na měřeném bodě. Pokud je změna g vyjádřená kvadratickým polynomem $g(z) = g_0 + \gamma z + \delta z^2$, tj. gradient je lineární, tak je observační rovnice nelineární, a tedy přímo neřešitelná pomocí MNČ. Podle Křen et al. (2016) je v takovémto případě možné korigovat měřené vzorky vzdálenosti o

$$z_i \rightarrow z_i - 0.802 \tilde{\delta} z_i^6. \quad (20)$$

Podle terminologie z předchozí sekce se jedná o korekci typu "KP2".

Další vlivy lokálního prostředí, které eventuálně mohou být v časových řadách korigovány, jsou typu "KP3" a jde o:

- zavedení zpřesněného modelu atmosférických korekcí podle Vařko et al. (2013),
- korekci lokálních hydrologických vlivů (např. z hladiny podzemní vody),
- gravitační vliv z blízkých přesunů hmot (např. vlivem stavebních úprav v blízkém okolí tíhového bodu).

2.9 Výpočet finální hodnoty tíhového zrychlení

V sekci 2.6 byl uveden výpočet průměrné hodnoty tíhového zrychlení \bar{g}_{top} ve vrcholu pádu a v efektivní pozici volného pádu \bar{g}_{ef} , které jsou spjaty průměrnou efektivní výškou měření \bar{h}_{top}^* a gradientem γ a dále spjaty se stabilizací tíhového bodu přes znalost referenční přístrojové výšky podle vztahu (15). Všechny vlivy typu "KP1" a "KP2", které jsou sdruženy s observační rovnicí, jsou tedy uvaženy již v hodnotách vypočtených zrychlení. Zbývá tedy započíst korekce typu "KP3", Δ_i^{KP3} .

Finálním výsledkem absolutního měření je tíhové zrychlení v efektivní výšce gravimetru se zavedením všech korekcí přístrojových a eventuálně z lokálního prostředí

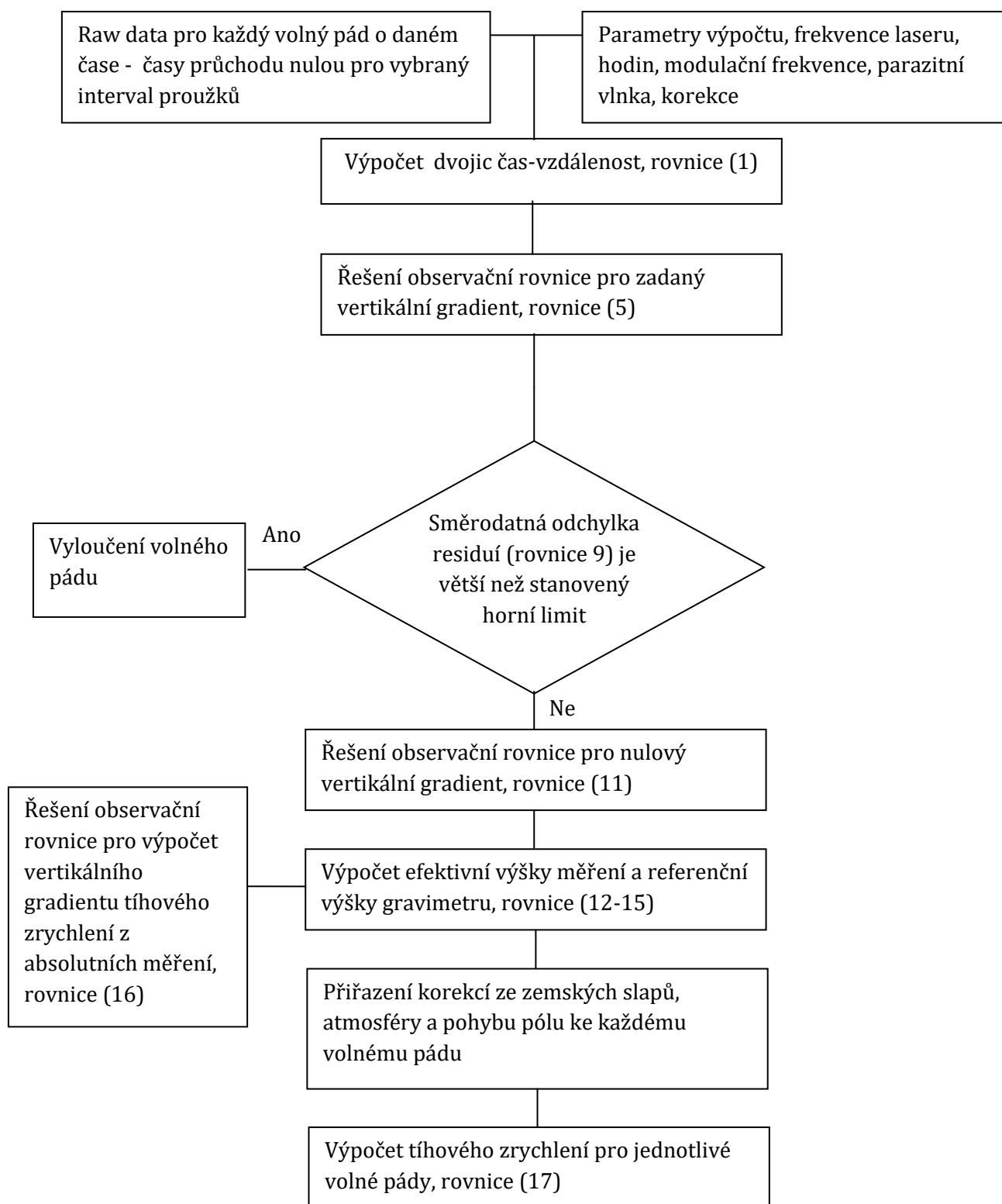
$$\bar{g}^* = \bar{g}_{top} + \gamma \bar{h}_{top}^* + \sum_i \Delta_i^{KP3}, \quad (21)$$

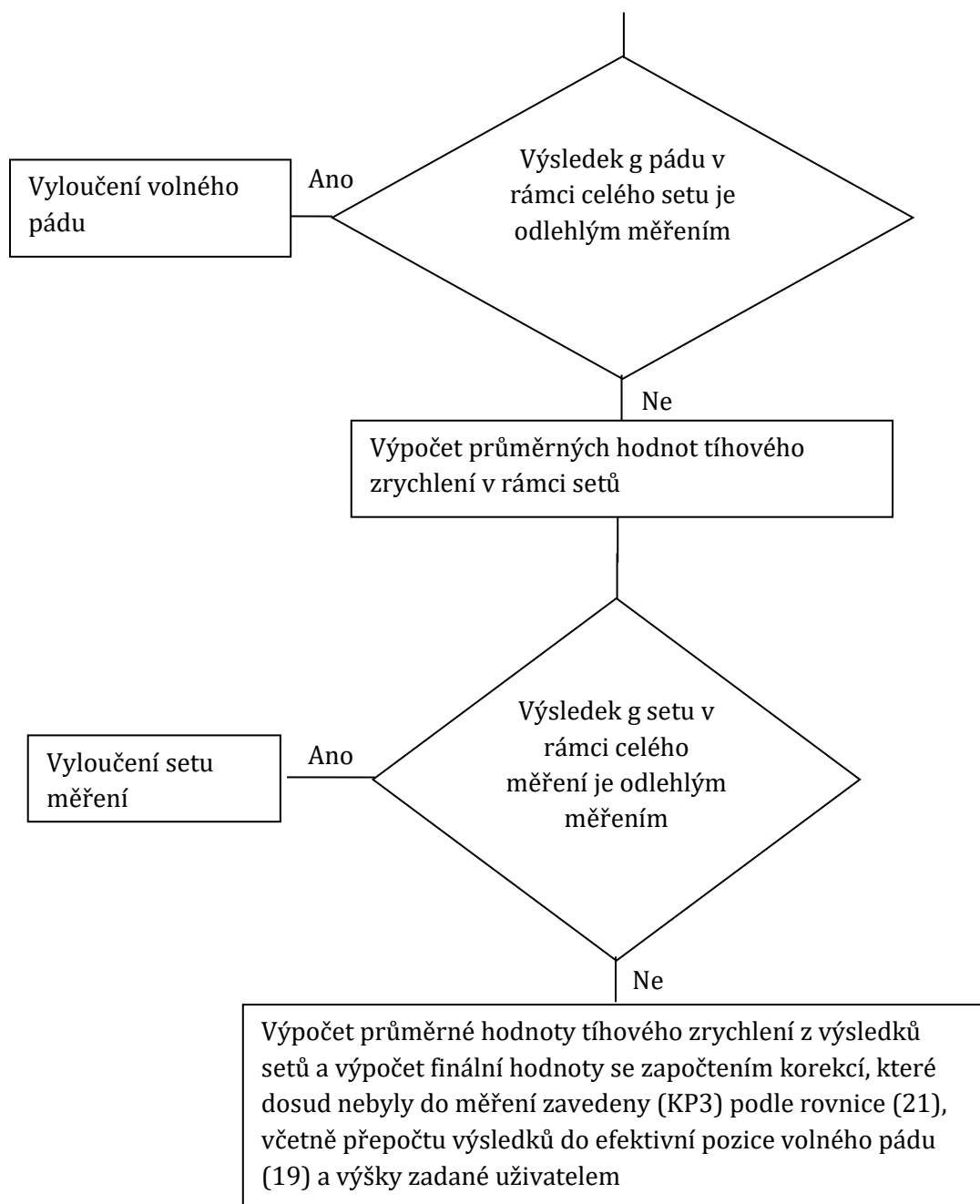
která je definována v průměrné referenční výšce gravimetru nad tíhovým bodem podle (15)

$$\bar{h}_{ins}^* = h_{man} - \bar{h}_{top}^*.$$

3. Procesní schéma

Schéma zpracování a vyhodnocení měření popsané v kapitole 2 je znázorněno v následujícím procesním schématu





4. Vstupy a výstupy

V této sekci jsou definovány vstupní a výstupní údaje, které jsou nezbytné při prezentaci výsledků měření. Organizace vstupních a výstupních datových struktur musí být taková, aby bylo možné dávkové zpracování a analýza vybraných měření, což napomůže jednak k dalšímu vědeckému zhodnocení dat a jednak k rychlému přenosu poznatků do infrastruktury ČSGS.

Vstupy:

- tíhový bod definován souřadnicemi φ, λ, H - zeměpisná šířka, zeměpisná délka a nadmořská výška, odhad gradientu γ (při neznámém lze použít hodnotu $-300 \mu\text{Gal/m}$).
- instrumentální parametry jako vlnová délka laseru, frekvence rubidiového oscilátoru, výška vrcholu pádu nad bodem h_{man} , rozsah zpracovávaného volného pádu daný počátkem a koncem zpracování, modulační frekvence laseru, perioda prostorové parazitní vlnky,
- raw data absolutních měření ve formě dvojic čas-vzdálenost průchodů interferenčních proužků pro jednotlivé pády,
- observační rovnice,
- matematické modely k výpočtu geofyzikálních korekcí ze slapů, tlaku vzduchu a odstředivého zrychlení.

Výstupy datové:

- Ke každému volnému pádu tabelovat:
datum a čas měření, $z_0, v_0, g_0, a_j, g_{top}, z_0^*, v_0^*, g_0^*, z^*, h^*, h_{top}^*, \gamma_{ABS}$, tlak vzduchu, korekci z tlaku, korekci ze slapů, korekci z pohybu pólu, tíhové zrychlení ve vrcholu pádu a efektivní výšce, efektivní instrumentální výšku, informaci o akceptaci pádu
- Ke každému setu tabelovat:
datum a čas, počet akceptovaných pádů, průměrnou hodnotu tíhového zrychlení, směrodatnou odchylku
- Ke každému měření tabelovat:
místo měření, typ gravimetru, datum a čas, počet akceptovaných pádů, průměrná hodnota tíhového zrychlení v efektivní instrumentální výšce, směrodatná odchylka, průměrná instrumentální výška a směrodatná odchylka, identifikace zavedení/nezavedení přístrojových korekcí v rámci observační rovnice, dodatečně zavedené korekce KP3, finální hodnota tíhového zrychlení, průměrná residua z akceptovaných pádů, průměrné spektrum residuí, spektrum průměrných residuí

Jako příklad uveďme v tab. 1 výstupy ze skriptu AGDAS pro zpracování měřické kampaně a v tab. 2 výstupy z analýzy dodatečných senzorů při měření, zpracované skriptem ADPAR. V tab. 3 jsou na základě parametrů uvedených v tab. 1 a tab. 2 generované dodatečné korekce měření a vypočtena je finální hodnota tíhového zrychlení a gradientu z absolutních měření.

Tab. 1. Datový obsah souboru ze zpracování absolutního měření pomocí skriptu AGDAS.

Campaign	AG	S/N	Sitename	Sitecode	Latitude deg	Longitude deg	Elevation m	P_norm hPa	baro admit. uGal/hPa
X140_Kraslice	FG5X	251	KRASLICE	53	50.33	12.5108	512.89	953.13	0.3
VGG uGal/m	WEO-IE nm	WEO-fmod Hz	Clock-10MHz Hz	L_parasit m	Ksol	Ksae 0/1	Kdis 0/1	Kimp 0/1	kpar 0/1
-2.447	632.991195	8333.355	0.0088	0.122	3/3	0	0	0	1
L_TTLcable m	Start Fringe	Final Fringe	x_pole arcsec	y_pole arcsec	Sets	Drops/Set	Year	Month	Day
2.0	150	9400	0.2115	0.3493	17	150	2020	9	8
Hour	Minute	MJD	Duration hour	Ave_P hPa	dP(MAX-MIN) hPa	Ave_tide uGal	Tide(MAX-MIN) uGal	Tstud %	Drops_accept
21	7	59100.9	16.4	966.2	1.9	-21.8	114.3	95	2521
Ef.h t0 mm	Ef.h.TOD mm	STD mm	H.ef.ins m	g@H.ef.ins uGal	STD uGal	RMS-start uGal	RMS-final uGal	VGG_AG uGal/cm	STD uGal/cm
114.40	114.48	0.002	1.2697	980951892.2	0.11	0.15	0.2	2.484	0.014

Tab. 2. Datový obsah CSV souboru ze zpracování dodatečných měřících systémů pomocí skriptu ADPAR. Jedná se o měření laterálního pohybu testovacího tělesa, meteorologického čidla Vaisala PTU 220 a HS5 měřícího systému gravimetru (Křen et al., 2016).

Campaign	Mean MJD	Coriolis uGal	Coriolis-std uGal	Verticality uGal	Verticality-std uGal	Pressure-mean hPa	Pressure-range hPa	Temp-mean deg C	Temp-range deg C
X140	59100.8	-0.79	0.03	-0.03	0.00	966.4	2.0	22.3	0.4
Humidity-mean %	Humidity-range %	Elevation m	Latitude deg	Longitude deg	VGG uGal/m	VGG kvadr uGal/m^2	WEO-IE kHz	WEO-fmod Hz	Clock-10MHz Hz
47.5	6.8	512.89	50.3296	12.5108	244.7	0.0	473612366965	8333.355	0.0088
Harmonic	MJD	Drops	HS5 uGal	STD uGal	Ef.h. mm	std mm	FG5-HS5/TH uGal	std uGal	
1	59100.88	2543	980951891.5	0.11	114.517	0.059	0.74	0.01	

Tab. 3. Stanovení dodatečných korekcí a výpočet finální hodnoty tíhového zrychlení. Výsledky měření jsou doplněny o korekce z vlastní hmoty gravimetru difrakce, vertikality, Eötvösova zrychlení, FG5 systému (zejména vliv distorze a impedančního nepřizpůsobení), disperze v kabelu a offsetu gravimetru. Finálním výsledkem je tíhové zrychlení v efektivní pozici volného pádu (lze uvést pro různé měřící systémy - původní, původní s korekcí na HS5, HS5) a příslušná nejistota. Dále je uvedena hodnota vertikálního gradientu tíhového zrychlení (VGG_AG) vypočtená z absolutního měření.

SAC	DC	Vert C	Eotv C	FG5 C	Cable C	Offset	SUM
μGal	μGal	μGal	μGal	μGal	μGal	μGal	μGal
-1.18	2.7	0.03	0.79	-0.92	-0.32	2.25	3.36

FG5	FG5/HS5	HS5		FG5	
$g@H.ef.ins$	$g@H.ef.ins$	$g@H.ef.ins$	u	VGG_AG	u
μGal	μGal	μGal	μGal	$\mu Gal/m$	$\mu Gal/m$
980951894.9	980951895.6	980951895.8	2.2	243.7	12.0

Výstupy grafické:

rozptyl tíhového zrychlení z jednotlivých volných pádů a také setů, Allanova směrodatná odchylka, průměrná residua, spektrum průměrných residuí, průměrné spektrum akceptovaných pádů, citlivost g na změnu intervalu vyhodnocení volného pádu, efektivní výška měření pro jednotlivé volné pády, parametry parazitní vlnky, směrodatná odchylka z fitu observační rovnice, průběh tlaku vzduchu během měření, průběh slapových korekcí během měření.

Literatura

Kostecký J (ml.), Pálinkáš V, Šimon Z (2012). Měření tíhového zrychlení a absolutní gravimetr FG5 č. 215 na Geodetické observatoři Pecný. Geodetický a kartografický obzor, 48 (90), č.11, 205-214.

Křen P, Pálinkáš V and Mašika P (2016). On the effect of distortion and dispersion in fringe signal of the FG5 absolute gravimeters. Metrologia, 53, 27-40.

Křen P, Pálinkáš V, Mašika P, Vaľko M (2017). Effects of impedance mismatch and coaxial cable length on absolute gravimeters. Metrologia, 54, 161-170.

Křen P, Pálinkáš V, Mašika P (2018). On the determination of verticality and Eötvös effects in absolute gravimetry. Metrologia, 55, 451-459.

Křen P, Pálinkáš V (2018). Two methods for determination of the effective wavenumber of gaussian beams in absolute gravimeters. Metrology and measurement systems, Vol. 25, No. 4, 701-713.

Křen P, Pálinkáš V, Mašika P, Vaľko M (2019). FFT swept filtering: a bias-free method for processing fringe signals in absolute gravimeters. Journal of Geodesy, Vol. 93, Issue 2, 219-227.

Křen P, Pálinkáš V, Vaľko M, Mašika P (2020). Improved measurement model for FG5/X gravimeters. Measurement 171:108739.

Nagorny V D (1995). A new approach to absolute gravimeter analysis. Metrologia, 32, 201-208.

Niebauer T M, Sasagawa G S, Faller J E, Hilt R and Klocking F (1995). A new generation of absolute gravimeters. Metrologia, 32, 159–180.

Niebauer T M, Billson R, Ellis B, Mason B van Westrum D and Klocking F (2011). Simultaneous gravity and gradient measurements from a recoil-compensated absolute gravimeter. Metrologia, 48, 154-163.

Niebauer T M, Billson R, Schiel A, van Westrum D and Klopping F (2013). The self-attraction correction for the FG5X absolute gravity meter. *Metrologia*, 50, 1–8.

Niebauer T M (1989). The Effective Measurement Height of Free-fall Absolute Gravimeters. *Metrologia*, 26, 115-118.

Pálinkáš V, Liard J and Jiang Z (2012). On the effective position of the free-fall solution and the self-attraction effect of the FG5 gravimeters. *Metrologia*, 49, 552-559.

Pálinkáš V, Lederer M, Kostecký J, Šimek J, Mojzeš M, Ferienc D, Csapó G (2013). Analysis of the repeated absolute gravity measurements in the Czech Republic, Slovakia and Hungary from the period 1991–2010 considering instrumental and hydrological effects. *Journal of Geodesy*, 87, 29–42.

Pálinkáš V, Křen P, Vařko M, Mařika P (2019). On the determination of vertical gravity gradients by corner-cube absolute gravimeters. *Metrologia*, 56, 055006.

Petit G. and B Luzum (2010). IERS Conventions 2010 IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie.

Robertson DS (2001). Using absolute gravimeter data to determine vertical gravity gradients. *Metrologia*, 38, 147-153.

Robertsson L (2007) On the diffraction correction in absolute gravimetry. *Metrologia*, 44, 35–39.

Vařko M, Pálinkáš V, Kostecký J (2013) Korekce absolutních měření z atmosférických vlivů. *Geodetický a kartografický obzor*, ročník 5/101, číslo 4, 69-76.

vanWestrum D and Niebauer TM (2003). The diffraction correction for absolute gravimeters. *Metrologia*, 40, 258–263.

Wziontek H, Bonvalot S, Gabalda G, Falk R, Makinen J, Pálinkáš V, Rulke A, Vitushkin L (2021) Status of the International Gravity Reference System and Frame. *Journal of Geodesy*, 95:7.

T A
Č R

Tento projekt je financován se státní podporou
Technologické agentury ČR
v rámci programu BETA2

www.tacr.cz
Výzkum užitečný pro společnost



[poslední strana]