

GEOPOTENCIÁLNÍ MODEL EGM96 V GEODETICKÉ OBRANNÉ STRATEGII

Milan BURŠA, Karel RADĚJ, Viliam VATRT, Marie VOJTIŠKOVÁ

Vojenský topografický ústav Dobruška

WORKING GROUP GLOBAL GEODESY TOPICS: SATELLITE ALTIMETRY APPLICATIONS (WG GGT)

1. Úvod

Geodetická Obranná Strategie (GOS) má globální charakter (Malys a Slater, 1994). To je její základní rys, který vtiskuje geodetické aktivitě účastenských zemí NATO zcela vyhraněný směr. Systémy globální geodézie se staly referenční základnou pro řešení i zcela lokálních geodetických úloh, jakými jsou určování výšek technikou GPS, transformace lokálních geodetických referenčních systémů (GRS), rekonstrukce lokálních GRS na základě geodetických map bez dalších geodetických aktivit na daném území, realizace výškového systému v geodeticky izolovaném území, monitorování nadmořské výšky letu palubní aparaturou GPS ve vojenském i civilním letectví apod.

Při příležitosti návštěvy šéfa pracovní skupiny Geodesy and Geophysics NATO K.F. Burke-ho v dubnu 1993 v Praze, z iniciativy náčelníka TS AČR plk. Ing. Karla Raděje, CSc., byla zformována pracovní skupina WG GGT (Working Group Global Geodesy Topics: Satellite Altimetry Applications). V listopadu 1993 byl na prvním společném semináři PffP předložen program WG GGT a nastíněny cesty jeho řešení; intenzivní práce začaly v červenci 1994 (Proceedings, 1997).

2. Geopotenciální model EGM96 - základ řešení úloh GOS

V symbiotické spolupráci NIMA (National Imagery and Mapping Agency, dříve DMA - Defence Mapping Agency), NASA Goddard Space Flight Center a Ohio State University byl vytvořen geopotenciální model EGM96, umožňující vypočítat tíhový potenciál Země (geopotenciál) v libovolném místě na zemském povrchu a nad ním v blízkém vnějším prostoru, v němž se pohybují letadla a eventuálně rakety, s přesností cca $5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, což činí 0,5m ve svislém směru.

Geopotenciální model EGM96 (Lemoine et al. 1997) představuje soubor Stokesových geopotenciálních koeficientů $J_n^{(k)}$, $S_n^{(k)}$ až do stupně $n = 360$ a řádu $k = 360$, jejichž celkový

počet je roven $361^2 - 3 = 130\,318$. Model byl vytvořen na základě analýz dráhové dynamiky více než dvaceti umělých družic, s použitím moderních dat GPS a TDRSS (Tracking Data Relay Satellite System), družicové altimetrie systémů TOPEX/POSEIDON, GEOSAT a ERS-1. Dále bylo použito tíhových údajů globální databáze NIMA, počítaje v to i tíhové anomálie z území bývalého Sovětského Svazu, Jižní Ameriky, Afriky a Gronska. V oblastech oceánů byly použity střední hodnoty tíhových anomálií v blocích $30' \times 30'$, odvozené z družicové altimetrie GEOSAT a rovněž Geodetic Mission altimeter data, ERS-1 a KMS z oblastí, nepokrytých altimetrií GEOSAT.

Model EGM96 je nejlepší z řady šesti modelů EGM-X01, EGM-X02, EGM-X03, EGM-X04, EGM-X05, EGM96, testovaných v mezinárodní spolupráci. Na testování se podílela i WG GGT (Bursa). Přesnost jmenovaných modelů v různých částech světa ilustruje Tab. 1, sestavená na základě testovacích prací WG GGT. Ty spočívají na světové testovací síti GMEMN (Geopotential Model Evaluation and Monitoring Network), tvořenou 24 170 testovacími body, což jsou body, zaměřené technikou GPS nebo altimetrií (na oceánech), jejichž normální (Moloděnského) výšky jsou známy. Testovací síť GMEMN postupně ve WG GGT vytváříme od r. 1994 a k dnešnímu dni ji tvoří 20 768 bodů v oblastech oceánů, 1 830 na území USA, 1 248 na území Kanady, 220 ve střední Evropě, 79 ve Skandinávii a 25 v Pobaltí. Síť pokrývá asi 70% zemského povrchu. V současné době je rozšiřována na území Austrálie (zatím 38 testovacích bodů). V oblastech pokrytých sítí GMEMN je model zpřesněn, takže po korekturách z distorzi je přesnější než jak uvádí Tab.1.

Soubor koeficientů $J_n^{(k)}$, $S_n^{(k)}$ spolu s geocentrickou gravitační konstantou a nominální střední úhlovou rychlostí rotace Země umožňuje určit geopotenciál v libovolném bodu zemského povrchu nebo nad ním, jehož geocentrické souřadnice jsou známy. Ty jsou určitelné technikou GPS nebo družicovou altimetrií s několikacentimetrovou přesností. To znamená, že na bodech GPS máme k dispozici bez jakýchkoliv dalších měření geopotenciál, a to s reálnou přesností $5 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (0,5m).

Tabulka 1. Střední chyby geopotenciálních modelů řady EGM

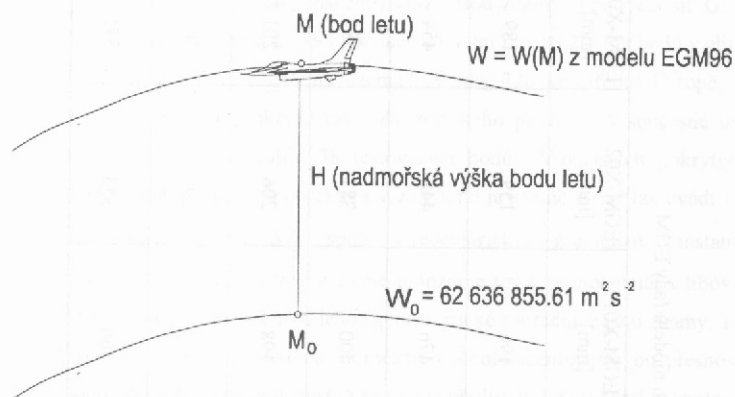
Území	Počet testovacích bodů	EGM-X01 [mm]	EGM-X02 [mm]	EGM-X03 [mm]	EGM-X04 [mm]	EGM-X05 [mm]	EGM96 [mm]
Oceány	20 768	196	159	189	187	141	141
U.S.A.	1 830	476	448	454	449	446	465
Kanada	1 248	400	387	387	376	383	368
Střední Evropa	220	198	206	201	199	195	188
Skandinávie	80	354	297	306	307	305	255
Pobaltí	25	366	353	375	368	359	330

Tato skutečnost tvoří pevný základ řešení širokého spektra geodetických úloh GOS. Pro vymezený rozsah našeho příspěvku je zde nemůžeme ani ve stručnosti projednat. Omezíme se proto na jediný příklad - monitorování nadmořské výšky letu.

3. Monitorování nadmořské výšky letu na základě geopotenciálního modelu EGM96 a geocentrických souřadnic detekovaných palubní aparaturou GPS

Předpokládáme, že letoun nese aparaturu GPS a že v bodu letu M (obr. 1) je monitorována jeho geocentrická poloha GPS. To umožňuje vypočítat geopotenciál $W(M)$ v tomto bodě z modelu EGM96 s takovou přesností, s jakou se detekují souřadnice aparaturou GPS, která je v běžné navigaci zpravidla nižší než přesnost $\pm 0,5\text{m}$, kterou poskytuje model EGM96, viz.

Tab. 1.



Obr. 1. Výpočet výšky bodu letu pomocí geopotenciálu:

$$H = \frac{W_0 - W(M)}{\gamma_m}$$

Za reálného předpokladu, že letoun bude vybaven počítačem typu PENTIUM 120, bude v časovém intervalu asi 1s nebo menším vypočten geopotenciál $W(M)$ v bodu letu M , definovaném aparaturou GPS. Tím bude určena i nadmořská výška H bodu letu M

$$H = [W_0 - W(M)] / \gamma_m; \quad (1)$$

γ_m je střední hodnota normální tíže na normální tížnici bodu M , pro jejíž výpočet použijeme vztahů

$$\gamma_m = \gamma_0 - \frac{1}{2}k[W_0 - W(M)] \left[\gamma_0 - \frac{1}{2}k \frac{W_0 - W(M)}{\gamma_0} \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$\gamma_0 = \gamma_e (1 + \beta \sin^2 B + \beta_1 \sin^2 B), \quad \gamma_e = 9,780\,32674 \text{ m s}^{-2},$$

$$\beta = 0,005\,302\,384, \quad \beta_1 = -1,000\,005\,824, \quad k = 3,086 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-2}.$$

Ty jsou známy z teorie normálního tíhového pole.

Zcela zásadní postavení v řešení úlohy má geopotenciál na ploše geoidu, veličina W_0 , kterou jsme se ve WG GGT usilovně tři roky zabývali a odvodili ji z údajů družicové altimetrie systému ERS-1/TOPEX/POSEIDON (AVISO 1998) ze 712 717 altimetrických výšek z čtyřletého časového intervalu 1993 - 1996. V hodnotě (Burša et al. 1998)

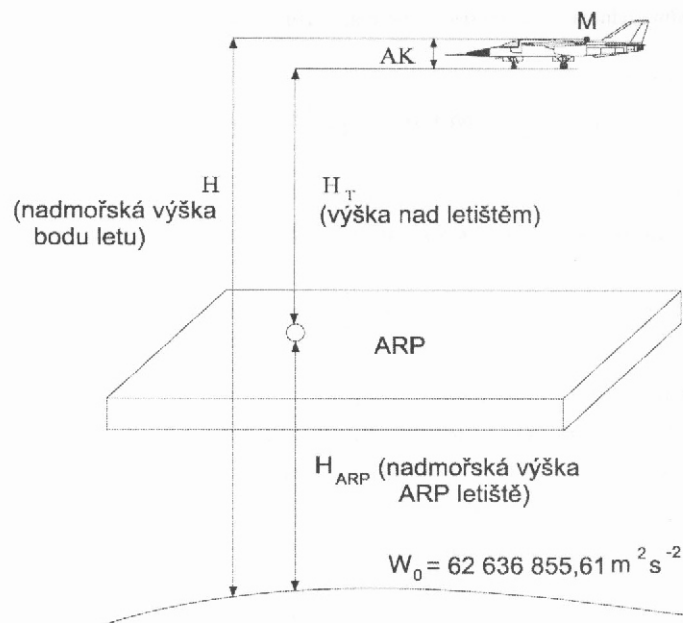
$$W_0 = 62\,636\,855,61 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}. \quad (3)$$

Tě nyní použijeme jako konstanty. Přesně vzato, měli bychom ji specifikovat podle toho, v jakém výškovém systému chceme výšky letu určovat. V systému NAVD88, v němž jsou určeny výšky letu na území USA a Kanady, je např. rovna

$$(W_0)_{\text{NAVD88}} = 62\,636\,861,39 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}, \quad (4)$$

jiná je v systému Amsterodamského vodočtu, Kronstadtského, Terstského atd. Rozdíly jsou však malé, radiálně nepřesahují 1m, avšak ve speciální navigaci by možná měly být vzaty v úvahu. Konstanta (3) charakterizuje střední hladinu celozemského oceánu a nevztahuje se k žádnému z jednotlivých vodočtů.

Pomocí geopotenciálního modelu EGM96 a souřadnic GPS lze tedy průběžně monitorovat nadmořskou výšku letu. Metodu lze použít v libovolném místě vzdušného prostoru. Při přistávacím manévru lze s výhodou použít údajů ARP (Air Point) a monitorovat rozdíl výšek bodu letu a ARP (Obr. 2).



Obr. 2. Princip určení výšky letadla nad terénem při přistávacím manévru

4. Závěry

- Geopotenciální modely mají v GOS nezastupitelnou úlohu. Spolu s konstatou (3) a prostorovými geocentrickými polohami GPS umožňují efektivně řešit soudobé úkoly a problémy GOS a to bez jakýchkoliv dalších informací, jakými jsou např. výška geoidu nebo kvazigeoidu.
- Geopotenciální modely lze využít i při řešení geocentrických úloh lokálního charakteru, jakými jsou transformace geodetických referenčních a výškových systémů, systémů výšek kvazigeoidu a jejich unifikace apod. I z tohoto důvodu je zapotřebí osvojit si je v co nejširší míře jako flexibilní, operativní geodetickou pomůcku GOS.
- V řadě úloh, v nichž potřebujeme znát výšky geoidu nebo kvazigeoidu s přesností cca 0,5m, lze s výhodou místo těchto veličin použít geopotenciálního modelu EGM96, a to v libovolném místě zemského povrchu.

d) Na základě měření poloh GPS na nivelačních bodech lze model EGM96 zpřesnit. Při vzdálenosti bodů GPS cca 15 km lze dosáhnout přesnosti asi 5 cm.

Literatura

- AVISO/CALVAL SYNTHESIS REPORT: TOPEX/POSEIDON CYCLES 1 TO 181, *Aviso User Handbook*, AVI-NT-011-315-CN, Edition 1.0, January 1998
- Burša, M., Raděj, K., Šíma, Z., True, S. A. and Vátr, V. Tests for Accuracy of Recent Geopotential Models. *International Geoid Service Bulletin No 6*, D.I.I.A.R. Politecnico di Milano, Italy, 1997, 167 - 173
- Burša, M., Kouba, J., Raděj, K., True, S. A., Vátr, V., Vojtišková, M. Mean Earth's Equipotential Surface from TOPEX/POSEIDON Altimetry. *Studia geoph. et geod.* 42, 1998, v tisku.
- Lemoine, F. G., Smith, D. E., Kunz, L., Smith, R., Pavlis, E. C., Pavlis, N. K., Klosko, S. M., Chinn, D. S., Torrence, M. H., Williamson, R. G., Cox, C. M., Rachlin, K. E., Wang, Z. M., Keyon, S. C., Salnan, R., Trimmer, R., Rapp, R. H. and Nerem, R. S. The Development of the NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model. *Proceeding of the International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy (GRACEOMAR 1996)*, The University of Tokyo, Japan, September 30 - October 5, Springer Vlg, 1997, 461 - 469.
- Malys, S., Slater, J. A. Maintenance and Enhancement of the World Geodetic System 1984. *Pres. at The Institute of Navigation, ION GPS-94, Salt Lake City, Utah*, September 1994, 1-8.
- Proceeding of the Working Group I Pfp 1993 - 1997*. Topographic Service of the Army of the Czech Republic, Praha 1997.