

**Z E M Ě M Ě Ř I C K Ý Ú Ř A D
V O J E N S K Ý G E O G R A F I C K Ý
A H Y D R O M E T E O R O L O G I C K Ý Ú Ř A D**

**TECHNICKÁ ZPRÁVA
K
DIGITÁLNÍMU MODELU RELIÉFU 4. GENERACE
DMR 4G**

ŘÍJEN 2010

Úvod

Tato technická zpráva je určena pro uživatele digitálního modelu reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G). Jejím cílem je popsat postupy zpracování výškopisných dat z leteckého laserového skenování a definovat základní charakteristiky tohoto modelu.

DMR 4G je jedním z realizačních výstupů společného projektu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK), Ministerstva obrany (MO) a Ministerstva zemědělství (MZe) České republiky s názvem „Projekt tvorby nového výškopisu České republiky“ (Praha: Zeměměřický úřad 2008). Metodickým a procesním východiskem pro zpracování dat byl „Realizační projekt zpracování výškopisných dat“ (Praha: Zeměměřický úřad 2009).

1 Technologie zpracování leteckých laserových dat

Letecké laserové skenování

Letecké laserové skenování (LLS) je realizováno systémem LiteMapper 6800 firmy IGI mbH s využitím leteckého laserového skeneru RIEGL LMS – Q680 s příslušenstvím pro autonomní určování polohy skeneru GPS (Global Positioning System) a IMU (Inertial Measurement Unit). Popis základních parametrů jednotlivých zařízení je uveden v Realizačním projektu zpracování výškopisných dat, kapitola 8.

Nosičem leteckého laserového skeneru je speciální letoun MO typu L 410 FG. Vlastní skenování se uskutečňuje z průměrné výšky 1200 m nebo 1400 m nad střední rovinou terénu v jednotlivých blocích dle realizačního projektu a v závislosti na vegetaci, přičemž bloky (převážně o šířce 10 km) s podobnou členitostí a výškovými poměry se pro realizaci LLS spojují do bloků s maximální délkou až 60 km. Skenování pásma „Střed“ se uskutečnilo v období od 22. března 2010 do 10. října 2010. Konkrétní údaje o termínech skenování jednotlivých bloků, respektive řad (pásů), lze získat v zeměměřickém odboru Zeměměřického úřadu (ZÚ) v Pardubicích (výhledově se předpokládá publikace těchto údajů na Geoportálu ČÚZK).

Předzpracování leteckých laserových dat

Cílem tohoto procesu zpracování leteckých laserových dat je analýza surových (nezpracovaných) dat s cílem nalezení jednotlivých odrazů laserového paprsku, georeferencování jednotlivých odrazů paprsků a transformace souřadnic do pracovního souřadnicového referenčního systému UTM/WGS84-G873 a výškových údajů do výškového referenčního systému Balt po vyrovnání (Bpv).

Pro řešení byly použity následující softwarové aplikace:

- IGIplan Mission Planning Software
- AEROoffice Software
- GrafNav GPS Postprocessing Software
- RiPROCESS 560
- RiWORLD 560
- RiANALYZE 560.

Pro georeferencování byla používána referenční data ve standardizovaném formátu RINEX nebo ve formátu Leica ze systému permanentních referenčních stanic CZEPOS, dále ze stanic spravovaných vědeckými a akademickými pracovišti v rámci výzkumné sítě VESOG a částečně také ze stanice POLOM spravované Vojenským geografickým a hydrometeorologickým úřadem (VGHMÚř). Výsledkem řešení jsou mračna výškových bodů georeferencovaná v souřadnicovém referenčním systému UTM (Universal Transversal Mercator) na elipsoidu GRS 80 (ETRS 89) a v systému elipsoidických výšek vztaženému k elipsoidu GRS 80.

Veškeré následné zpracování dat se po dohodě s MO uskutečnilo v souřadnicovém referenčním systému UTM na elipsoidu WGS 84-G873 a ve výškovém systému Bpv.

Pro transformace rovinných souřadnic ze systému UTM/GRS 80 do UTM/WGS84-G873 byly použity transformační klíče VGHMÚř, verze 2010. Přesnost transformace je charakterizována úplnými středními chybami souřadnic $m_x = m_y = 0,02$ m.

Pro transformace výškových údajů elipsoidických výšek GRS 80 do výškového referenčního systému Bpv byly použity údaje kvazigeoidu CZ-2005 Výzkumného ústavu geodetického topografického a kartografického (VÚGTK), autor Ing. Ivan Pešek, CSc. a prof. Ing. Jan Kostecký, DrSc., verze 2010. Přesnost transformace je charakterizována střední chybou $m_H = 0,06$ m.

Vzhledem k tomu, že bylo nutné integrovat transformační postup do ucelené technologie zpracování laserových dat, byly algoritmy naprogramovány do aplikace s názvem LASER SUPPORT 2010. Přípravu aplikace zajistil VGHMÚř ve spolupráci s VÚGTK a pracovníky ZÚ.

Robustní filtrace

Cílem robustní filtrace je separovat s využitím sofistikovaných automatizovaných metod body, ve kterých dopadl laserový paprsek až na terén včetně skal, dále na vegetaci, stavby a výškové překážky leteckého provozu a přitom identifikovat chybná měření (např. letící pták).

Pro řešení byl použit software SCOP++ verze 5.4 firmy INPHO GmbH.

Výsledkem tohoto procesu jsou samostatné soubory dat rozříděné podle dopadu paprsku na vyjmenované prvky a objekty zemského povrchu. Úspěšnost automatizovaných postupů správné klasifikace výškových bodů závisí značně na ročním období, ve kterém byla data pořízena, tj. na stupni rozvinutí vegetace. Orientačně lze klasifikovat úspěšnost zatřídění dat pořízených v období bez rozvinuté vegetace (březen – květen) na 90 % a naopak, v oblastech skenovaných později (červen – září), na 30-40 %.

Výběr reprezentativního uzlového výškového bodu pro tvorbu DMR 4G ve čtverci sítě 5x5 m

Vzhledem ke skutečnosti, že výsledkem robustní filtrace pro kategorii „reliéf“ nejsou výhradně jen body ležící na terénu, bylo nutné pro generování DMR 4G provést výběr reprezentativních bodů (dále jen uzlových bodů), u kterých se s maximální pravděpodobností předpokládá, že reprezentují terénní reliéf. K řešení je zvolen přístup, kdy jednotlivé

zpracovávané oblasti jsou „rozřezány“ na čtverce 5 x 5 m a v každém čtverci je vybrán pravděpodobný uzlový bod reliéfu jako bod s nejnižší výškou. Přitom se kontroluje, zda se tento bod extrémně neodlišuje výškou od okolních bodů. Pokud ano, pak se předpokládá, že se jedná o „zbloudilý“ paprsek a v tomto případě je vybrán jiný uzlový bod, který splňuje podmínky přiměřené odchylky výšky od okolních bodů.

Výsledkem popsaného procesu je množina nerovnoměrně rozložených uzlových bodů reliéfu (skutečně měřených), která je jeho generalizovaným modelem.

K řešení byla použita aplikace naprogramovaná pracovníky ZÚ.

Manuální kontrola vybraných uzlových bodů – odstranění hrubých chyb

K zajištění deklarované kvality DMR 4G a eliminace hrubých chyb je prováděna interaktivní vizuální kontrola takto vytvořeného modelu reliéfu generovaného z množiny uzlových bodů. Cílem je odhalit nepřírozené anomálie reliéfu. Současně jsou kontrolovány „díry“ v modelu, např. v oblastech vodních ploch, případně v oblastech po odstranění výškových bodů v prostorech zástavby.

Pro řešení je používán software DT Master firmy INPHO GmbH.

Výsledkem procesu jsou opravené soubory uzlových bodů reliéfu.

Transformace uzlových bodů do S-JTSK

S ohledem na skutečnost, že produkt DMR 4G určený pro civilní sektor má být zpracován v souřadnicovém referenčním systému JTSK a ve výškovém referenčním systému Bpv, byly souřadnice uzlových bodů transformovány v této fázi zpracování do souřadnicového referenčního systému JTSK (výškově jsou v Bpv již od počátku zpracování – viz výše).

K transformaci souřadnic ze systému UTM/WGS84-G873 do systému JTSK byly využity vztahy použité v aplikaci LASER SUPPORT VGHMÚř naprogramované s využitím koeficientů lokální dotransformace poskytnutých VÚGTK.

Interpolace výškového modelu v síti 5 x 5 m

Cílem interpolace výškového modelu v síti 5 x 5 m je interpolovat z nepravidelné sítě uzlových bodů model DMR 4G v pravidelné čtvercové síti bodů o rozměrech 5 x 5 m. Pro řešení je použita interpolační funkce programového systému SCOP++ s využitím metody adaptabilní lineární predikce. Jedná se o programovou modifikaci lineární predikce, kdy pro interpolaci výškového modelu jsou používány různé velikosti výpočetních jednotek v závislosti na analýze distribuce vstupních bodů v lokálních oblastech. Podrobnější informace o metodě lze získat v manuálu programového systému SCOP++, str. 168-183 a 311-327.

2 Obsah datových sad DMR 4G

Datové sady DMR 4G pokrývají k 31. říjnu 2010 celé pásmo „Střed“ dle Realizačního projektu zpracování výškopisných dat. V předávaných datech však nejsou obsažena data

z neúplných prostorů listů Státní mapy 1: 5000 (SM 5), tj. z prostorů, kde dosud nejsou vyrovnány styky s daty z okolních pásem, tj. z pásma „Západ“ a „Východ“, kde letecké laserové skenování bude provedeno v letech 2011 a 2012.

V datech se mohou vyskytovat „díry“ v místech rozsáhlých vodních ploch a vodních toků širších než 200 m, tj. tam, kde laserová data nejsou s ohledem na fyzikální vlastnosti laseru pořízena (voda zpravidla pohlcuje laserový paprsek).

DMR 4G reprezentuje terénní reliéf včetně skalních útvarů. Vzhledem k nutné generalizaci modelu typu čtvercové sítě o rozměrech 5 x 5 m je přirozené, že takový model nemůže podrobně vystihnout lokální členitost a výskyt terénních anomálií, jako jsou například hrany náspů, výkopů a terénních objektů (hald, valů, rozvalin, strží, rokli), malé kupy nebo též skalní útvary a věže půdorysně menší než 5 m. Současně je nutné vzít v úvahu, že v blízkosti výrazných vertikálních terénních zlomů, např. na styku zeminy a skalních útvarů, strmých svazích terénních teras a břehů nebo na vyšších náspech a zářezech silnic a železničních tratí, může dojít až k několikametrovým chybám při odvození výšky z generalizovaného modelu v takovém místě.

3 Uložení dat na předávacích médiích

Výsledkem jsou georeferencované soubory výškových bodů DMR 4G reprezentované souřadnicemi x , y v matematickém souřadnicovém referenčním systému JTSK (realizace S-JTSK/Krovak East North – EPSG:102067, kdy $x=-y_{\text{JTSK}}$ a $y=-x_{\text{JTSK}}$) a H ve výškovém referenčním systému Bpv, uložené v ukládacích jednotkách odpovídajících kladu mapových listů SM 5. Data jsou ukládána v textovém formátu. Soubory jsou dále na médiích ukládány v adresářích (složkách) po větších celcích pokrývajících listy Státní mapy v měřítku 1:50 000.

Příklad názvu adresáře: pi_sobo (pro list mapy SM 50 Sobotka).

Příklad názvu souboru: pi_sobo00_4G.xyz (pro list mapy SM 5 Sobotka 00).

4 Charakteristika přesnosti a kvality DMR 4G

K ověření a definování charakteristik přesnosti a kvality dat DMR 4G byly využity tři sady kontrolních dat:

- 1) soubory kontrolních bodů na komparačních základnách
- 2) výšky vybraných bodů základního geodetického bodového pole (trigonometrických a zhušťovacích bodů)
- 3) kontrolní geodetická měření realizovaná lokálně pro ověření přesnosti DMR 4G.

Ověření přesnosti na komparačních základnách

Komparační základnou je geodeticky zaměřené podrobné bodové pole v souřadnicích N,E systému UTM/GRS 80 (ETRS 89) s elipsoidickými výškami h a s výškami nadmořskými H_{Bpv} vypočítanými pomocí transformace výšek s využitím kvazigeoidu CZ-2005. V každém bloku o šířce převážně 10 km a délce 20 – 30 km byly vždy umístěny dvě komparační základny, pokud možno v protějších rozích bloku.

Komparační základny byly vybírány tak, aby převýšení, respektive poklesy terénu mezi kontrolními body nebyly větší než 0,15 m. Rozsah komparační základny je zpravidla 50 x 50 m (případně i větší), minimálně však 30 x 30 m. Z těchto důvodů byly voleny rovné plochy fotbalových hřišť, tenisových kurtů, náměstí (bez parkovišť) nebo jiných veřejných prostranství s antukovým, škvárovým, asfaltovým, dlážděným povrchem nebo s ošetřovaným nízkým trávníkem. Podrobné bodové pole má zpravidla formu čtvercové sítě o stranách 10 m. Kontrolní body byly zaměřeny aparaturami GPS v režimu RTK se středními chybami souřadnic a výšky do 0,03 m.

Cílem ověření přesnosti na komparačních základnách bylo zjištění systematické chyby a úplné střední chyby měřených výškopisných dat z LLS (v systému elipsoidických výšek GRS 80, tedy bez negativních vlivů transformací) a následně i odvozených modelů, tedy i DMR 4G (ve výškovém referenčním systému Bpv s ohledem na standardizované užívání geodetických referenčních systémů v ČR dle nařízení vlády č. 430/2006 Sb., o stanovení geodetických referenčních systémů a státních mapových děl závazných na území státu a zásadách jejich používání), na prakticky vodorovných a hladkých plochách s dobrou odrazivostí, tedy bez vlivů sklonu terénu a vegetačního krytu.

Pro účely ověření přesnosti DMR 4G byly podrobné body komparačních základen transformovány do souřadnicového referenčního systému JTSK. Pro každý geodeticky zaměřený bod o souřadnicích x, y, H_{GEO} (S-JTSK, Bpv) byla bilineární interpolací vypočítána odpovídající výška H_{4G} z DMR 4G a výškový rozdíl.

$$\Delta H = H_{4G} - H_{GEO}$$

Statistickým zpracováním byly stanoveny následující parametry přesnosti DMR 4G:

Systematická chyba podle vzorce:

$$c_H = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i}{n}$$

Úplná střední chyba podle vzorce:

$$m_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}{n}},$$

kde n je počet geodeticky zaměřených bodů komparační základny a ΔH_i rozdíl výšky interpolované z DMR 4G a geodeticky zaměřené na i -tém kontrolním bodě komparační základny.

Výše uvedené parametry přesnosti DMR 4G byly postupně vypočítány na 240 komparačních základnách v pásmu „Střed“ (36 % území ČR), přičemž průměrná hodnota systematické chyby dosáhla velikosti $c_H = -0,12$ m (při maximální chybě - 0,28 m) a průměrná hodnota úplné střední chyby $m_H = 0,14$ m.

Převážně systematická složka úplné střední chyby je způsobena komplexním působením několika zdrojů chyb různých operací, jež jsou součástí technologie leteckého laserového skenování a tvorby mřížového modelu DMR 4G, zejména:

- systematickou chybou měření délky prostorového rajonu mezi skenerem a měřeným bodem,

- systematickou chybou aparatury GPS při určení výšky skeneru (skokovou) o velikosti až 0,15 m, odlišnou v sousedních zčásti se překrývajících pásech LLS,
- způsobem dosavadního vyrovnání výšek v bloku 14 překrývajících se pásů,
- způsobem výběru uzlových bodů ve čtvercích 5 x 5 m (body s nejmenší výškou).

V souladu s prokazatelně homogenními výsledky zjištění parametrů výškové přesnosti na komparačních základnách byly výšky všech bodů DMR 4G opraveny o střední hodnotu systematické chyby přičtením konstanty +0,12 m, a to pro všechny bloky.

Po odstranění systematické chyby dosahují kvalitativní parametry těchto hodnot:

$$\begin{aligned} c_H &= +0,01\text{m} \\ m_H &= 0,08\text{ m} \end{aligned}$$

a charakterizují přesnost DMR 4G v prostorech komparačních základen (na vodorovném povrchu bez vegetačního krytu a staveb).

Ověření výškové přesnosti DMR 4G na vybraných bodech základního geodetického bodového pole

Cílem řešení bylo ověřit výškovou přesnost DMR 4G na rozsáhlém území a případně odhalit výrazné nehomogenity tohoto modelu v rámci celého pásma „Střed“.

Pro toto šetření bylo podle místopisů geodetických bodů vybráno 1453 trigonometrických a zhušťovacích bodů rovnoměrně rozložených po celém území pásma „Střed“. Body byly vybírány tak, aby pokud možno ležely v rovině nebo v mírně sklonitém terénu bez lokální členitosti reliéfu a mimo lesní oblasti. V úvahu však je nutné vzít, že místopisy jsou často i třicet let staré, a že výškové poměry v blízkosti vybraného bodu se mohly výrazně změnit. Provádět fyzickou kontrolu bodů v terénu však bylo kapacitně a finančně nereálné.

Pro každý takto vybraný bod o souřadnicích x , y , H_{GEO} (S-JTSK, Bpv) byla opět bilineární interpolací vypočítána odpovídající výška H_{4G} z DMR 4G a výškový rozdíl.

$$\Delta H = H_{4G} - H_{GEO}$$

Následně pak byly pomocí dříve uvedených vzorců vypočítány parametry přesnosti

$$\begin{aligned} c_H &= - 0,15\text{ m} \\ m_H &= 0,25\text{ m.} \end{aligned}$$

Dosažené výsledky vypovídají, že DMR 4G se zdá být položen systematicky o 0,15 m pod úrovní trigonometrických bodů při úplné střední chybě 0,25 m. Dosažené hodnoty korespondují s logickým vysvětlením, že geodetické body jsou zpravidla osazeny kamennými mezníky jejichž horní ploška je často 10-15 cm nad zemí a dále, že jsou zpravidla umístěny na lokální vyvýšenině terénu. Cílem ověření však nebylo ověření absolutní přesnosti DMR 4G, nýbrž homogenity přesnosti na celém pásmu „Střed“. Proto byly odchylky výšek pro jednotlivé body vyznačeny do mapy v měřítku 1:250 000 a pohledově kontrolováno, zda se nevyskytují výrazné lokální extrémní odchylek. Z provedené analýzy lze konstatovat, že

nebyly zjištěny lokální anomálie a že je dosahováno v zásadě homogenní úrovně přesnosti DMR 4G na celém území pásma „Střed“ ČR.

Ověření přesnosti kontrolním měřením v terénu

Cílem této metody ověření přesnosti bylo alespoň na menších vzorcích dat dokumentovat přesnost interpolace výšky bodu z DMR 4G v terénu s různým vegetačním krytem, zástavbou nebo častým výskytem terénních tvarů s hranami v území přetvořeném lidskou činností.

Při měření výšek kontrolních v terénu byla využita metoda trigonometrické nivelace pomocí totálních stanic Leica TC 1010 a Nikon DTM 310.

Z blízkých bodů základního bodového pole (výškově ověřených metodou GPS nivelace) bylo zaměřeno celkem 970 podrobných bodů v 25 lokalitách.

Současně byla k jednotlivým bodům zaznamenána charakteristika povrchu a půdního krytu, ve kterém se kontrolovaný bod vyskytoval v době LLS. Povrchy byly rozděleny do šesti kategorií:

- cesty a silnice (včetně příkopů, náspů, zářezů)
- zpevněné plochy v intravilánu,
- parky v intravilánu,
- orná půda,
- louky a pastviny,
- křoviny, stromořadí a lesy.

Pro každý geodeticky zaměřený bod o souřadnicích x, y, H_{GEO} (S-JTSK, Bpv) byla bilineární interpolací vypočítána odpovídající výška H_{4G} z DMR 4G a výškový rozdíl.

$$\Delta H = H_{4G} - H_{GEO}$$

Statistickým zpracováním byly stanoveny následující parametry přesnosti DMR 4G ve výše uvedených kategoriích povrchu a půdního krytu:

Kategorie povrchu a půdního krytu	Systematická chyba [m]	Úplná střední chyba [m]	Maximální chyba [m]
cesty a silnice	-0,25	0,34	0,77
zpevněné plochy v intravilánu	-0,01	0,07	0,26
parky v intravilánu	-0,09	0,14	0,22
orná půda	-0,01	0,13	0,66
louky a pastviny	-0,09	0,18	0,85
křoviny, stromořadí a lesy	-0,02	0,13	0,85

Tab. 1 Charakteristiky přesnosti DMR 4G na různém povrchu a půdním krytu

V tabulce 1 je nápadná výrazná systematická i úplná střední chyba určení výšky komunikací s využitím DMR 4G. Je tomu tak zjevně v důsledku generalizace výškopisu do čtvercové sítě o velikosti ok 5 x 5 m, kdy zejména u komunikací užších než 10 m dochází v důsledku vyhlazení modelu k zanedbání hran koruny tělesa, pat náspů, dna příkopů apod.

5 Závěry a doporučení

Dosavadní ověřovací zkoušky parametrů přesnosti DMR 4G potvrzují, že garantovaná úplná střední chyba výšky tohoto generalizovaného modelu georeliéfu (0,30 m v terénu bez souvislé vegetace a zástavby a 1 m v terénech pokrytých hustou vegetací) je dosažena.

Řešitelé projektu jsou si však vědomi, že množství použitých kontrolních dat bylo pro ověření přesnosti omezené, a že se mohou v DMR 4G vyskytnout lokální chyby, které by však podle teorie normálního rozdělení statistických veličin neměly překročit dvojnásobek úplné střední chyby v jednotlivých kategoriích terénu v 95 % případů a trojnásobek úplné střední chyby v 99,7 % případů.

Při užívání DMR 4G je nutné vždy brát zřetel na možnosti a omezení generalizované reprezentace terénního reliéfu pomocí čtvercové sítě bodů (GRID), která pochopitelně nemůže vystihnout lokální terénní anomálie a hrany. Jeho hlavním účelem je být zdrojem informací o terénním reliéfu pro účely ortogonalizace leteckých měřických snímků (tvorbu ortofotografického zobrazení celého území ČR). Lze jej využít pro řadu dalších úloh, které v regionálním a celostátním měřítku řeší např. obory meteorologie, hydrologie, vojenství, letectví, lesní hospodářství, krizové řízení a další.

Pro účely pasportizace komunikací, projektování pozemních, dopravních a vodohospodářských staveb, zobrazování výškopisu ve velkých měřítkách, pasportizace vodních toků a staveb a tvorbu územně analytických podkladů a v povrchovém důlním hospodářství je třeba používat přesnější modely, např. typu DMR 5G, ve tvaru nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN), které zobrazují výstižněji i lokální terénní anomálie. DMR 5G bude k dispozici nejdéle do 3 let od leteckého laserového skenování příslušné části území ČR (pásmo Střed-2012, pásmo Západ-2013, pásmo Východ-2014).

Při užívání DMR 4G je vždy nutné vzít v úvahu skutečnost, že se terén mohl v období od provedení LLS výrazně změnit ať již v důsledku přírodních jevů tak v důsledku lidské činnosti. Minimalizovat důsledky změn při použití DMR 4G v konkrétních aplikacích uživatelů lze jednak vyžadováním nových verzí DMR 4G u ZÚ, který zajišťuje průběžnou aktualizaci výškopisných databází ČR, a jednak důslednou rekognoskační situace v terénu v době rozhodné pro řešení aplikační úlohy. Při této rekognoskaci lze jako optimální podklad použít stínované zobrazení reliéfu, který lze buď generovat z dat DMR 4G vhodným aplikačním software, nebo vyžádat jako samostatný produkt od ZÚ.

V případě nalezení chyb v datech DMR 4G zašlete laskavě informaci o chybě do Zeměměřického úřadu. Pro hlášení použijte aplikaci „Hlášení chyb v datech“ Geoportálu ČÚZK (<http://geoportal.cuzk.cz>).