

LCR árapály-graviméterek abszolút módszerrel végzendő kalibrálása (1993-1995)

CSAPÓ GÉZA¹ (témavezető)

G. CSAPÓ: Absolute calibration of LCR type earth-tide gravimeters

OTKA nyilvántartási szám: T 7348

Bevezetés

A kutatás célja nagy pontosságú laboratóriumi eljárás kidolgozása FB rendszerű LaCoste-Romberg (LCR) gyártmányú relatív graviméterek leolvasó rendszerének kalibrálására.

Az elmúlt évtizedben egyre nagyobb számban alkalmaznak LCR műszereket az árapály-regisztráló állomásokon. Ezek a mérések (regisztrálások) néhányszor 10^{-9} m/s² megbízhatóságúak és mintegy $250 \cdot 10^{-8}$ m/s² mérési tartományt ölelnek fel.

Az idők folyamán a gyártó cég az alapképzésű gravimétereken két olyan fejlesztést eszközölt, amely lehetővé tette a jelen kutatási téma sikeres megvalósítását. Az egyik az, hogy a gravimétereket speciális leolvasó elektronikával látták el. Ennek lényege, hogy a graviméter ingakarját, ill. az érzékelő tömeget két kondenzátorlemez közé helyezték el (kapacitív érzékelés). Az ingakar vízszintes helyzetében a kapacitív „híd” nem folyik áram. Amikor a nehézségi térerősség változik, a lengő kitér nyugalmi helyzetéből. Ilyenkor a graviméter elektromos kimenetén a kitéréssel arányos, előjeles feszültséget regisztrálunk. Ezt az eljárást CPI (Capacitance beam Position Indicator) leolvasási rendszernek nevezik az irodalomban.

A másik, ezt követő fejlesztés lényege, hogy az ingakar kitérésekor egy szabályozott „pótlólagos” feszültség kerül a megfelelő kondenzátorlemezre, aminek eredményeképpen az érzékelő tömeg helyzete a két kondenzátor lemez között változatlan marad (FB — feedback rendszerű érzékelés). Ilyenkor a kimeneten a visszatérítő (egyensúlyozó) feszültség olvasható le. Ez szintén arányos a nehézségi térerősség változásával.

A kalibrálás célja a feszültség mértékegységben regisztrált „leolvasási” értékek átszámítása fizikai egységbe (m/s², ill. μ Gal), vagyis a „műszerszorzó” (mV/ μ Gal) minél pontosabb meghatározása.

A kutatási téma előzményei és elvi alapok

A regisztráló graviméterek kalibrálásához már a korábbi évtizedekben is számos eljárást dolgoztak ki a szakterületen tevékenykedő külföldi kutatók. Ezek lényegét az irodalomban [CSAPÓ 1994, VARGA et al. 1995] ismertették. Az általunk kidolgozott és megépített kalibráló berendezés elvi alapja a következő: ha egy graviméter közelébe nehézségi térerősség változást indikáló tömeget helyezünk el,

akkor azt a műszer érzékelő rendszere kimutatja. Növeli, vagy csökkenti a pillanatnyi helyi térerősséget annak megfelelően, hogy a „pótlólagos” térerősséget okozó tömeg a graviméter érzékelője alatt, vagy felett helyezkedik el. A pótlólagos hatást okozó tömegek elvén korábban is végeztek kalibrálást, azonban valamennyi eljárásnak közös hibái voltak. Egyrészt nem tudták megfelelő pontossággal számítani a kiegészítő hatást (a technikai kivitelezés, ill. a számításokhoz szükséges méretek, pl. az érzékelő és hitelesítő tömeg távolság-meghatározásának pontatlanságai miatt), másrészt az alkalmazott tömegek mozgatása olyan talajdeformációkat okozott (amelyek a mérőpilléren keresztül a graviméter dőlését is változtatták a mozgatás függvényében). Ez a hatás erősen rontotta a kalibrálás megbízhatóságát.

A pályázati támogatással megvalósított eljárás a korábbiakban alkalmazottaktól két dologban tér el:

- az alkalmazott tömeg kialakításában,
- a mérés elrendezésében.

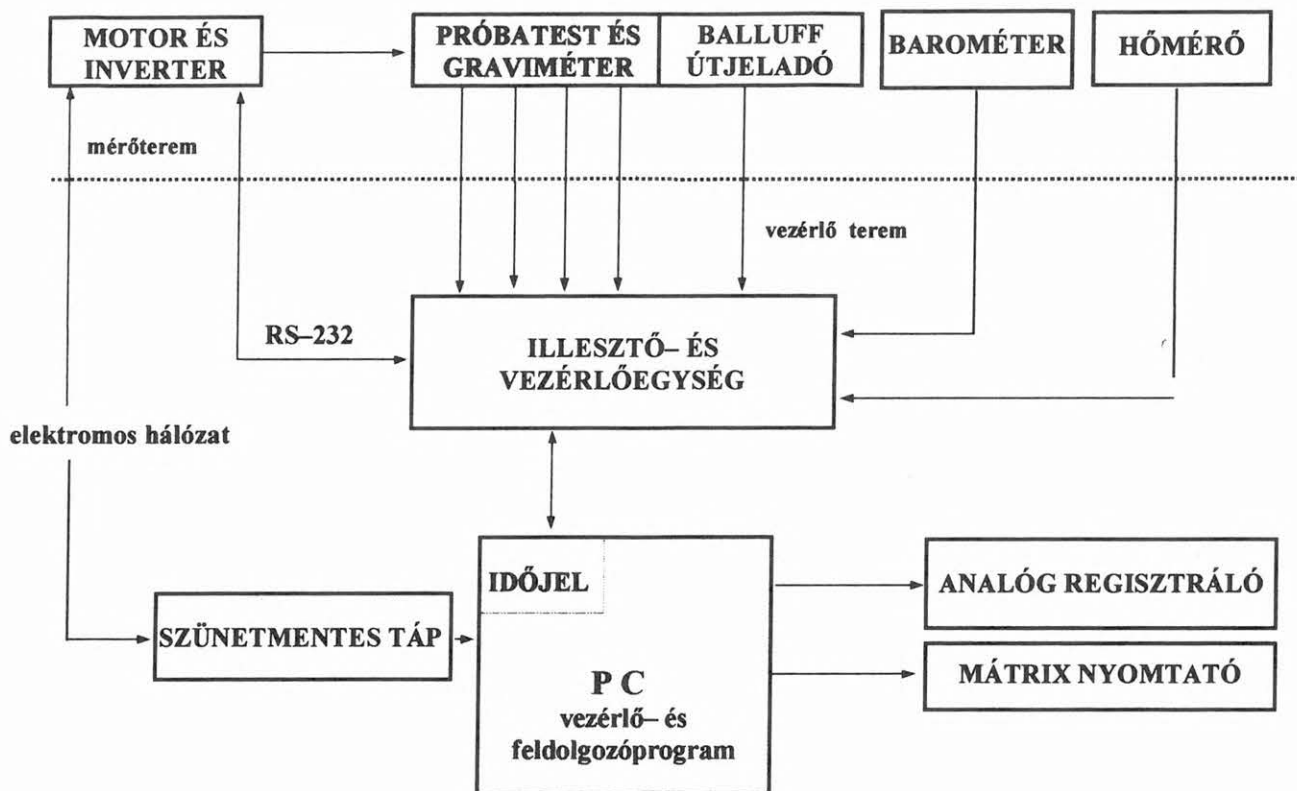
A módszer alap gondolata az, hogy egy körszimmetrikus test belsejében — annak valamely vízszintes metszeti síkjában — a nehézségi erőter is körszimmetrikus [BARTA, HAJÓSY 1985]. Ennek megfelelően kalibráló tömegnek hengergyűrű formát választottunk. A gravimétert a hengergyűrű belsejében kialakított pillére állítjuk fel. A kalibrálás során a hengergyűrűt függőlegesen mozgatjuk — miközben a graviméter helyzete nem változik — és folyamatosan regisztráljuk a kimeneti mérőjelet.

Az eljárás lényegét tekintve abszolút kalibrálás, mert a hengergyűrű és a graviméter érzékelője egymáshoz viszonyított helyzetének változtatásakor valódi (nem árapály okozta) nehézségi térerő-változásokat hasonlítunk össze a graviméter műszerleolvasási értékváltozásaiból számítható nehézségi térerősség változásokkal. A megfelelő értékpárok hányadosa a kalibrálási tényező, vagyis az a szám, amellyel a műszer mérésnél figyelembe vett szorzójának értékét megszorozva a helyes műszerszorzót kapjuk.

A pályázat támogatásával elért eredmények ismertetése

A berendezés első változatát még 1992-ben készítettük. E „deszkamodellnél” a hengergyűrű függőleges mozgatását csörlővel, emberi erővel végeztük. Ez a megoldás nagymértékben korlátozta a berendezés hatékonyságát. Nem lehetett pontosan egyforma lépésközü mozgatásokat elérni sem térben, sem időben, a kalibráló sorozatok méréséhez

¹ Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23.



szükséges idő korlátozott volt és folyamatos mozgást sem lehetett végezni. A mérés közbeni emberi jelenlét szükségessége pedig rontotta az eredmények megbízhatóságát (hőmérsékletváltozások, mozgás okozta mechanikus rázkódások stb.). Ezen hiányosságok kiküszöbölése érdekében elkészítettük az automatikus vezérlés első hardver és szoftver változatát (ld. az ábrát). A hardveres munka során a kalibráló berendezést és az irányítást két külön helyiségben helyeztük el.

A kivitelezés után zavaró elektromágneses hatások léptek fel, amelyek gyakran meghamisították a mérési eredményeket. A BME Automatizálási Tanszéke együttműködésével elhárítottuk ezeket a zavaró hatásokat (zavarforrások bemérése, majd megfelelő kis- és nagyfrekvenciás zavarszűrés készítése). Az Országos Mérésügyi Hivatal és az ELGI együttműködésében elvégeztük a hengergyűrű darabok pontos tömegmérését. A kalibráló test összsúlya: $3103,765 \text{ kg} \pm 0,021 \text{ kg}$. Ezt a nagy pontosságú meghatározást részben az tette lehetővé, hogy a tömeget 150–450 kg-os részekből állítottuk össze, részben pedig az, hogy a mérést hiteles tömegekkel történő összehasonlítással, a Bizerba cég legkorszerűbb, MCI-W típusú elektronikus mérlegével és teherelosztóival végezhetjük.

A kalibráló tömeg és a graviméter érzékelője relatív függőleges távolságának meghatározására a Balluff német cég kérésünkre távolságmérésre átalakított, 0,2 mm megbízhatóságú útjeladóját használtuk fel. A hőmérséklet- és légnyomásváltozások regisztrálására érzékelő szondákat helyeztünk el a graviméter közelében. Megoldottuk a mérőterem folyamatos termosztát-szabályozott fűtését, aminek eredményeképpen a napi hőmérsékletváltozás ott nem haladja meg az $1 \text{ }^\circ\text{C}$ értéket. A mechanikai (vibrációs) hatások csökkentése érdekében az észlelőpillér alapját 1 m mélységig padlófüggetlenül építettük meg és rezgés-csökkentő szigeteléssel láttuk el.

A kalibrálási sorozatok feldolgozásához szükséges adatok tárolására nyolccsatornás adatgyűjtő és vezérlő egységet építettünk. Az adatgyűjtő a következő adatokat tárolja: a graviméter mérőjeleit, a tömeg és a graviméter vertikális távolságának mm pontosságú értékét az adott mintavétel-nél, a mintavétel idejét, a graviméter környezetének hőmérsékletét, a légnyomást, a graviméter elektronikus libelláinak jeleit (ha van ilyen libella az adott graviméterben).

A kalibrálást vezérlő szoftver a következő üzemmódokat támogatja:

- *folyamatos tömegmozgatás* előre választott sebességgel és végállásokkal, valamint mintavételi sűrűséggel,
- *szakaszos (lépcsős) mozgatás* tetszőlegesen variálható lépcsőmagasságokkal (a mintegy 1400 mm mozgástartományban min. 4 mm lépésközzel), az előre programozott mintavételi helyeken megszabható számú mintavétellel és mintavételi időközzel, a mozgás irányának kiválasztásával, egy teljes (fel-le) mérési periódus ismétlési számának előírásával,
- *interaktív egyéni vezérlés* a számítógép billentyűzetével.

A számítógépes programot menüvezérelt rendszerben készítettük magyar és angol (előre választható) nyelven. Valamennyi fázisban gazdag „help anyag” segíti a felhasználót. A program elkészíti a fejléccel ellátott „mérési jegyzőkönyvet”, amely a szükséges kiinduló adatokat tartalmazza mind a graviméterre, mind a kalibráló sorozatra vonatkozóan (ezeket az adatokat az észlelő határozza meg egy-egy sorozat előkészítése során. A program jelzi a hibás adatbevitelt).

Az elkészült 1. változat üzembe helyezése után számos kísérleti mérést végeztünk hibaelemzés céljából, majd elvégeztük a kalibrálási eljárás hibaelemzését. Ezekről a munkákról publikáció formájában és előadásokban is beszámoltunk.

A vizsgálatok eredményének rövid összefoglalása

- A választott mérési elrendezés kiküszöböli a hasonló elven korábban kidolgozott külföldi eljárások azon hibáját, hogy azoknál nem lehetett kellő pontossággal meghatározni a graviméter érzékelője és a kalibráló tömeg tömegközéppontja közötti vízszintes távolságot. A hengergyűrű mértani tengelyének és az érzékelő tömegnek egymáshoz képesti horizontális távolságát a mi eljárásunknál 1 mm pontosan határozzuk meg — ismerve egyrészt a mérőtömeg helyét a graviméter belsejében (a szükséges méreteket a LCR gyárban magunk határoztuk meg), másrészt a távolságmérésre általunk készített segédberendezés mérési bizonytalanságát. A hengergyűrű belsejében a nehézségi erőter izovonalait az elméleti értékek meghatározásával megrajzolva (körszimmetrikus szerkezet) kiszámítottuk az 1 mm-es pozíció eltérés hatását: az kisebb, mint $5 \cdot 10^{-10}$ m/s².
- A hengergyűrű és a LCR graviméterek méretei miatt nem érhető el olyan pozicionálás, amelynél az érzékelő tömegközéppontja és a hengergyűrű szimmetriatengelye egybeesik, ezért a lineáris excentricitást minden kalibrálás előtt meg kell határozni és a jegyzőkönyvben rögzíteni. A program az elméleti hatás számításánál figyelembe veszi az excentricitás mértékét. A térváltozás a hengergyűrű szimmetriatengelye és belső fala között ($r=160$ mm) $1,6 \cdot 10^{-8}$ m/s².
- A vertikális távolság meghatározásának maximális hibája kisebb 1 mm-nél, ami a kalibrálás pontosságát nem befolyásolja.
- A súlymérés hibája úgyszintén nem rontja az eredmények pontosságát éppúgy, mint a hengergyűrű lehetséges inhomogenitásai sem (erre nézve kísérleti számításokat végeztünk és törési mintákat is vettünk a kísérleti hengergyűrű darabok gyártásánál).
- A pillérdőlés nagysága — elektronikus libellákkal történt kísérleti meghatározás eredményeként — két, egymásra merőleges síkban kisebb 2 szögmásodperc értékénél. Az ebből származó hatás elhanyagolható.
- Az időmérés pontossága abszolút értelemben 30, relatív értelemben (a mintavételek közötti időintervallumok meghatározása) 1 másodperc. Az időmérés az árapály-korrektció és a műszerjárás meghatározásánál játszik szerepet, azonban itt a hibaforrás ténylegesen nem az időmérés bizonytalansága, hanem az árapály elméleti értékének pontossága. Ezzel minden kalibrálási eljárásnál számolni kell.
- A kalibrálások idején fellépő mikroszeizmikus zavarok hatásait a hatásgörbe szélsőértékeinek közelében végzett sűrűbb mintavételezéssel és a sorozatok számának növelésével lehet csökkenteni. Tekintettel arra, hogy a laboratóriumban folyamatos árapály regisztrálás is folyik, annak analóg regisztrátuma felvilágosítással szolgál a talajnyugalanság mértékéről, így szükség esetén (pl. földrengés) a sorozat leállítható.

Mіндеzen vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy az eljárással a kalibrálás relatív megbízhatósága (mintegy 0,1–0,2%) teljesíti a pályázatban elvárt értéket.

A Nemzetközi Gravimetriai Bizottság (IAG) Sevres-ben rendezte meg 4. Workshopját relatív és abszolút graviméterek körvizsgálatára. E munka során LCR–G 1919. számú

műszerünket az ott bemutatott két, különböző elven működő laboratóriumi eszközzel kalibráltuk. Az eredmények alapján a következő megállapításokat tehetjük (amit a külföldi hivatkozások is alátámasztottak, ld. Hivatkozások):

- Az ELGI berendezésének pontossága eléri, vagy meghaladja a másik két bemutatott módszerrel és berendezéssel elérhető megbízhatóságot.
- A kiegészítő gravitációs hatás igen nagy pontossággal ismert.
- Eljárásunk reprodukáló képessége (néhány napon belül többször megismételt kalibrálás eredményei közötti eltérések alapján) jobb mindkét külföldi eljárás hasonló paraméterénél.
- Tekintettel arra, hogy a mi eljárásunknál a kalibrálás idején a graviméter mozdulatlan, vagyis olyan állapotban van, mint árapály regisztráláskor, ebből semmiféle torzító hatás nem keletkezik, míg a másik két eljárásnál a gravimétert mozgatják a kalibrálás során. Nem hallottunk arról, hogy elemezték volna az ebből adódó esetleges hatásokat.
- A mi eljárásunk alkalmazásához semmiféle — a berendezés kezelésére vonatkozó előképzés, vagy speciális szakismeret nem szükséges, a feldolgozás automatikusan történik és a kalibrálás eredménye a mérési sorozat befejezése után 10 perccel rendelkezésre áll.

Eljárásunk hátránya a másik két eljárással szemben, hogy a jelenleg alkalmazott etalon-tömeg viszonylag kis kalibrálási tartományt biztosít (kb. $1,1 \cdot 10^{-6}$ m/s²), a berendezés helyhez kötött és az, hogy a vasból készített hengergyűrű esetleges mágneses hatásai torzíthatják a mérések eredményeit. A mágneses hatások kimutatására számos mérést végeztünk, azonban ezek a vizsgálatok nem tekinthetők befejezetteknek. Proton magnetométerrel (GSM-19) végzett mérések a hengergyűrű környezetében és a gyűrűn belül maximálisan 14 μ T változást mutattak ki. A normál földi tér értéke Budapesten mintegy 46 μ T. Tekintettel arra, hogy a LCR graviméterek érzékelőjét kettős μ -fém burkolattal látják el — ami a földi térrel megegyező nagyságú változásokat kompenzál — elvileg a kb. 30%-os variáció nem jelenthet hibaforrást. Azonban ezzel a magnetométer típussal nem lehet mérni a tér komponenseit, külföldi tapasztalatok szerint viszont néhány graviméternél mintegy $6\text{--}10 \cdot 10^{-8}$ m/s² hatást mutattak ki az egyes komponensek értékének megduplázásával. Fluxgate magnetométerrel (Bartington MAG 03 MSS) az egyes komponensekben a földi térkomponensek értékeit megközelítő változásokat regisztráltunk. Mindezek alapján a kutatás jelenlegi stádiumában az a következtetés vonható le, hogy a jelenlegi berendezéssel végzendő kalibrálások előtt szükséges a graviméterek mágneses hatás-vizsgálata (Helmholtz-tekercs), amely vizsgálattal kimutatható az egyes komponensek változásának mértéke és a graviméter műszerleolvasás-változásai közötti összefüggés.

További kísérleteink közben tapasztaltuk, hogy a laboratóriumban meglehetősen gyakoriak az 5–90 perc közötti áramkimaradások, ami számos mérést tönkretett. Ezért a rendszerbe egy mikroprocesszoros stabil tápáramforrást illesztettünk (az ábrán UPS), amely 15–20 perces áramkimaradások idejére képes a rendszer „életben tartására”. Tekintettel arra, hogy a kalibrálás éjszakai órákban is

végezhető (programozható a mérési sorozat kezdésének időpontja), ezzel a változtatással sok idő takarítható meg, ami különösen a külföldi kutatók itteni munkájánál fontos. Ez a változtatás a szoftver módosítását is szükségessé tette (2. variáció elkészítése). A módosítás során a vezérlőprogramot úgy egészítettük ki, hogy az mind a képernyőn, mind az adatgyűjtő mágneslemezen rögzíti az áramszünet kezdetének és végének időpontját és kijelzi a hibaforrást is (külső hálózati zavar, vagy rendszerhiba).

HIVATKOZÁSOK

- BARTA GY., HAJÓSY A. 1985: Új módszerű gravitációs állandó meghatározás elvi alapjainak kidolgozása. ELTE Kutatási Jelentés. Budapest
- VARGA P., HAJÓSY A., CSAPÓ G. 1995: Laboratory calibration of LaCoste-Romberg type gravimeters by using a heavy cylindrical ring. *Geoph. Journal Internat.* 120, 3, 745–757
- CSAPÓ G. 1994: A nehézségi gyorsulás mérése. *Mérésügyi Közlemények* 2, 65–72

IRODALMI REFERENCIÁK

Az általunk megépített laboratóriumi abszolút kalibráló berendezés „üzemszerű” használatba vételére 1994-ben került sor, az első eredményekről — szóbeli előadás formájában — 1994 szeptemberében a Nemzetközi Gravimetriai Bizottság Grazban tartott szimpóziumán számoltunk be. Ettől az időtől kezdve a következő irodalmi referenciákkal találkoztunk:

- MEURERS B. 1994: Problems of gravimeter calibration in high precision gravimetry. *International Association of geodesy symposia* 113, p. 26
- BALDI P., CASULA G. et al. 1994: Intercomparison of IMGC absolute and GWR superconducting gravimeters. Ugyanott, p. 28
- BECKER M., BALESTRI L. et al. 1995: Microgravimetric measurements at the 1994 International Comparison of Absolute Gravimeters. *Metrologia* 32, p. 145
- RICHTER B., WILMES, H., NOWAK I. 1995: The Frankfurt calibration system for relative gravimeters. *Metrologia* 32, p. 217
- MEURERS B. 1996: Comparison of feedback calibration methods — results from LCR D-9. *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, Heft 14*, 235–247, Vienna

BARÁTH István és CSAPÓ Géza



MÁRTON Péter és PÁLYI András

