



A műholdas radar-interferometria alkalmazásának korlátai a felszín deformációjának vizsgálatában

Petrik Ottó

Földmérési és Távérzékelési Intézet, Távérzékelési Központ

Bevezetés

A radar-interferometria alkalmazása a Föld felszínén történt változások mérésére az 1990-es évek elején kezdett elterjedni. Ez az új geodéziai technika interferencia mintát számol a képalkotó radarműhold két eltérő időben készített felvételének fáziskülönbségéből [1]. Az eredményül kapott interferogram a felszín és a radar közötti távolságváltozás kontúrtérképe. Ez a térkép kitűnő térbeli felbontást (kb. 1000 pixel/km²), versenyképes pontosságot (kb. 0,5–1 cm/év) és hasznos felvételezési gyakoriságot (kb. 1 áthaladás/hónap) szolgáltat. Az interferogram rögzíti a felszín mozgásait, az atmoszféra zavarait, a talaj dielektromos tulajdonságainak változásait és a domborzatot. Az interferogram érzékeny továbbá a műhold pályájában bekövetkezett változásokra és a referenciafrekvencia ingadozására.

Az interferometriához felhasznált adatoknál az alapképet *Master*-nek, míg a másik felvételt *Slave*-nek szokás nevezni. A radarképek között gyakran koherenciavesztés tapasztalható, amelyet dekorrelációnak is nevezünk. Az alábbi tanulmány ennek a hatását elemzi, és az ebből származó pontosságvesztésre mutat gyakorlati példát.

A dekorreláció forrásai

A radarképek között fellépő interferometrikus fázist az alábbi dekorrelációs hatások befolyásolják: (i) termális dekorreláció, (ii) temporális dekorreláció, (iii) geometriai dekorreláció, (iv) Doppler-centroid dekorreláció, (v) feldolgozás okozta dekorreláció [2, 3, 4].

Amikor a fenti hatásokat együtt vizsgáljuk, azok összeszoródnak, így a teljes dekorrelációs érték (γ_{teljes}) a következőképpen becsülhető [5]:

$$\gamma_{teljes} = \gamma_{termális} \cdot \gamma_{temporális} \cdot \gamma_{geometriai} \cdot \gamma_{FDC} \cdot \gamma_{proc}$$

A következőkben az egyes tagokat részletezem.

Termális dekorreláció

A termális zaj ($\gamma_{termális}$) hatása az interferometrikus fázisra a szenzor jel/zaj arányával fejezhető ki [5]:

$$\gamma_{termális} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}},$$

ahol a jel/zaj arány (*Signal to Noise Ratio*; SNR) definíciója $SNR = \frac{P_S}{P_N}$, P_S és P_N pedig a jel és a zaj teljesítménye.

A terminális dekorrelációt főként a radarrendszer kialakítása (az ERS-1/2 műhold jel/zaj aránya 11,7 dB) és a szórópontok elhelyezkedése befolyásolja [2].

Temporális dekorreláció

A temporális dekorreláció ($\gamma_{temporális}$) az egymást követő áthaladásokból számított interferometria esetén alakul ki, amely a radar-interferometria alkalmazásának egyik jelentős korlátja. A temporális dekorreláció a két felvételezési időpont között bekövetkezett összes fizikai felszínváltozás függvénye, magába foglalja a talajnedvesség, a felszín érdesség és a növényzet változását. Az analitikus modellezés és a számszerű becslés a lehetséges befolyásoló tényezők széles skálája miatt majdnem lehetetlen. Az emberi tevékenység okozta környezeti változás jó példa lehet a temporális dekorrelációra. Kiszámíthatatlan és egyedi mivolta miatt hatását azonban nem lehet mennyiségileg modellezni.

Geometriai dekorreláció

A geometriai (térbeli) bázisvonal dekorrelációs függvénye az oldalra nézési szögek (θ_M és θ_S) közötti fáziseltolás eredményeként adható meg [6]:

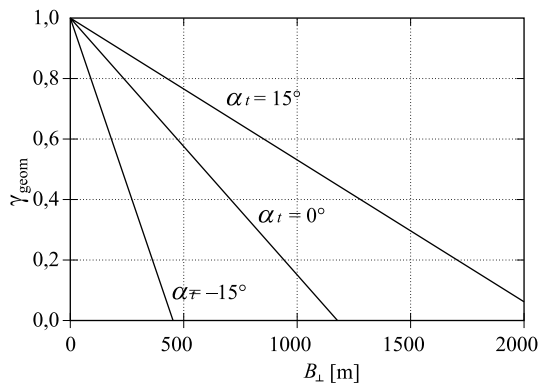
$$\gamma_{\text{geometriai}} = 1 - \frac{|B|R_g \cos^2 \theta}{\lambda R},$$

ahol θ az átlagos oldalra nézési szög, λ a hullámhossz, B a bázisvonal horizontális komponense, R_g az oldal irányú (pályára merőleges) felszíni felbontás, R a radar és a felszín közötti távolság.

A fenti egyenlet módosításával a geometriai dekorrelációt a következő alakban is felírható [7]:

$$\gamma_{\text{geometriai}} = 1 - \frac{cB_{\perp}}{\lambda R B_W} |\cos(\theta_0 - \alpha_i)|,$$

ahol c a fénysebesség, B_{\perp} a merőleges bázisvonal (a két felvételezési helyzet távolságának merőleges komponense), θ_0 a névleges oldalra nézés (az ERS-1/2 esetén 23°), B_W a kisugárzott jel frekvenciájának sávzélesség, α_i a lokális felszíni meredekség.



1. ábra Geometriai dekorreláció az ERS-1/2 radarrendszerek esetén [1]

Az 1. ábrán a geometriai dekorreláció mértéke látható ERS-1/2 műholdak esetén, a merőleges bázisvonal (B_{\perp}) és a felszínmeredekség (α_i) függvényében. Az ábrán látható, hogy a merőleges bázisvonal növekedése a fázis dekorrelációjához és alacsonyabb koherenciához vezet. Ha a merőleges bázisvonal növekedése elér egy kritikus hosszát, a koherencia teljesen elvész és nem lehet interferogramot készíteni. Ez a kritikus hossz a következőképpen írható fel:

$$B_{\perp, \text{kritikus}} = \frac{\lambda B_W R}{c} \tan(\theta_0 - \alpha_i).$$

Az ERS-1/2 műholdak esetén a $B_{\perp, \text{kritikus}}$ értéke körülbelül 1100 m.

Doppler-centroid dekorreláció

A képképző radarok esetén a pályára merőleges irány kitüntetett, mert ebben az irányban a legjobb a pályamenti felbontás, így a képképzés során ezt az irányt használják a kép keresztirányú koordináta-tengelyének, míg a hosszirányú koordináta-tengely a műhold pályájának iránya. Az angol szakirodalomban a pályára merőleges irányt *range* vagy *across-track direction*-nak, míg a pályamenti irányt *azimuth* vagy *along-track direction*-nak nevezik. A visszaverődött radarjel az antenna és a felszín sebességkülönbsége miatt Doppler-frekvencia eltolódást szenved. Ha a műholdtest menetközben elfordul, és nem pontosan a pályára merőlegesen sugározza be a felszínt, akkor a pályára merőleges irányból érkező jel frekvenciája is csúszást szenved. A Doppler-centroid frekvencia tehát a műholdpályára merőleges irányból visszaverődő jel Doppler-frekvenciája [8].

A Master és a Slave képek Doppler-centroid frekvenciái közötti különbség ($\Delta f_{DC} = f_{DC}^M - f_{DC}^S$) adja Doppler Centroid Dekorrelációt (γ_{FDC}):

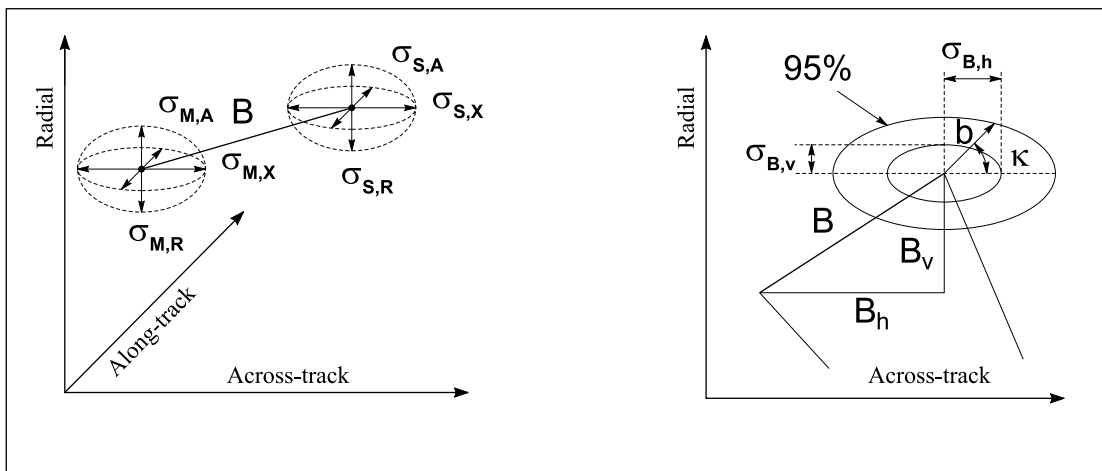
$$\gamma_{FDC} = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta f_{DC}}{B_A} & \text{ha } |\Delta f_{DC}| \leq B_A \\ 0 & \text{ha } |\Delta f_{DC}| > B_A \end{cases}$$

ahol B_A az azimut-irányú sávzélesség.

A Doppler-centroid frekvenciák nagy különbsége növeli a fáziszajt. A tapasztalatok azt mutatják, hogy csak $|f_{DC}| < 500$ Hz esetén működik az interferometria.

Feldolgozás okozta dekorreláció

Az interferogram készítése során a két kép pontatlan egymáshoz illesztése (geometriai fedésbe hozása) újabb zaj, az ún. feldolgozás közbeni dekorreláció forrása. Ha az összeregisztrálás pontossága jobb mint $1/8$ pixel, akkor a dekorreláció mértéke már elhanyagolható [9]. A feldolgozás során további lehetséges dekorreláció forrása lehet a fázis szűrése is [10].



2. ábra: a) A két pályához tartozó hibaellipszisek (balra); b) A radiális és a pályára merőleges hibák hatása a bázisvonal vertikális (B_v) és horizontális (B_h) komponensére (jobbra) [2]; (Along-track: pályamenti irány; Across-track: pályára merőleges irány)

A műholdak pályahibája

Az interferometrikus bázisvonal meghatározásához és az interferometrikus eredmények georeferálásához a műholdpálya adatainak pontos ismerete szükséges. Minden pályahiba közvetlenül megjelenik az előállított domborzat modell (DEM) vagy deformációtérkép hibájaként.

A helyvektor felbontható radiális (σ_R), pályamenti (σ_A) és pályára merőleges (σ_X) komponensekre (2.a ábra).

A pályamenti hibát (σ_A) a Master és Slave kép összeregisztálása általában megfelelően korrigálja és befolyása elhanyagolható az interferometrikus fázisra [2]. A probléma így kétdimenzióssá egyszerűsödik: csak a radiális és a pályára merőleges komponens hatására kialakuló fázishibákkal kell foglalkozni. Feltételezve, hogy a Master és a Slave pályák közötti hibák nem korrelálnak, a radiális (σ_R) és a pályára merőleges (σ_X) hibák az alábbi módon hatnak a bázisvonalra [2]:

$$\sigma_{B,h} = \sqrt{\sigma_{M,X}^2 + \sigma_{S,X}^2},$$

$$\sigma_{B,v} = \sqrt{\sigma_{M,R}^2 + \sigma_{S,R}^2},$$

A konfidencia intervallumot 95% értékre növelve, a b bázisvonal hibája belül marad a hiba ellipszoidon (2.b ábra). A b vektor iránya ismeretlen, ezért az interferometrikus fázisra bármilyen hatással lehet, amely trend-jellegű és akkor

a legnagyobb, ha b iránya közel 0 vagy π , illetve gyakorlatilag elhanyagolható akkor, amikor b iránya $\pm \frac{\pi}{2}$.

Atmoszférikus heterogenitás

Különböző időpontokban készült felvételek esetén szinte biztos, hogy az atmoszféra állapota nem azonos. Így a szenzor és felszín között mért sugárút megváltozhat a különböző troposzférikus és az ionoszférikus zavarok által okozott időcsúszások miatt. Minden atmoszférikus heterogenitás fázistorzulásként jelenik meg az interferogramon, így korlátozza az eredmények megbízhatóságát.

A légköri vízgőz idő- és térbeli változása befolyásolja az ismétlődő átvonulási interferometria-vizsgálatokat. A nyomás és a hőmérséklet változásai nem okoznak jelentős torzulásokat; a száraz területeknek kevesebb ingadozása van, mint a nedves területeknek [11, 12]. Az éjjeli felvételezés a statisztikusan stabilabb éjszakai légkör miatt [13] csökkentheti az atmoszféra hatását, azonban az újabb vizsgálatokban az ENVISAT/MERIS-IWV szenzorának vízgőz térképező képességével kalibrálják és javítják az atmoszférikus hatást [14].

Az ionoszféra hatását nagyon nehéz eltávolítani a radar észlelésről. A GPS technika az ionoszféra diszperz tulajdonságát kihasználva, a fázismérést két különböző frekvencián hajtja végre, így az io-

noszférikus hatás nagy részét ki tudja küszöbölni. Ez a megközelítés egyidejűleg két különböző frekvencián észlelt radarképet kívánna, azonban ilyen radarrendszer egyelőre nem létezik. Az ionoszférikus zavarok pályairányú eltolást okoznak az interferogramon, amely a C-sáv hullámhosszán kilométeres skálájú elcsúszást eredményez. Ezt a képek összeregisztálásakor javítani lehet, ezért feltételezhető, hogy az ionoszférikus hatás nincs jelentős befolyással az egyedi radar képekre [15]. A saját vizsgálatomban nem tapasztaltam ilyen pályairányú elcsúszást.

Figyelembe véve, hogy a radar-interferometria nagyon érzékeny a légköri állapotok változására, meteorológiai vizsgálatokra is lehet használni. Ha domborzat és a deformáció hatása ismert, az interferometrikus késés mérése nagy felbontású integrált légköri vízgőztartalom nagyfelbontású térképezésére alkalmas [16].

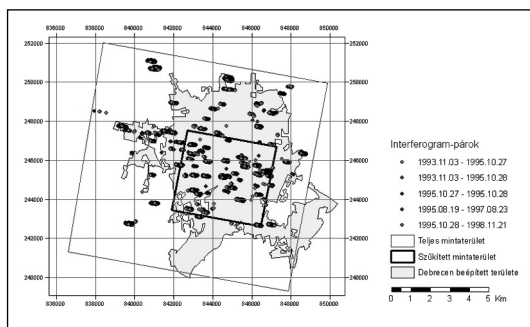
Az atmoszféra heterogenitásának hatását kalibrációs vagy statisztikus módszerrel lehet csökkenteni. A kalibrációs módszer esetén a légkör vízgőztartalmát valamilyen független eljárással a radarfelvétel készítésének időpontjában meghatározzák, és az interferogram készítésekor ezt figyelembe veszik. Nagyon gyakran azonban nem áll rendelkezésre megfelelő adat a kutatási területre. Kalibráló eljárás lehet (a) meteorológiai légkömböklés és a terepen végrehajtott *in situ* mérés, (b) a vízgőz tartalom becslése GPS mérés alapján [17, 18], (c) vízgőztartalom spektrális becslése (pl. az Envisat műhold esetén egyidejű ASAR-képalkotó radar, MERIS-vízgőz térkép felvételezés), (d) a bekezdés végén leírt előre modellezés. A légköri hatások kb. 100 m felbontású korrekciójához ugyanilyen felbontású meteorológiai adatok szükségesek [19]. A meteorológiai és GPS mérések messze nem elégítik ki ezt a felbontást, a mintaterületen csak néhány pontban adnak adatokat. A MERIS vízgőztartalom-térképe az egész mintaterületre képes adatot szolgáltatni, de csak 300 m felbontással. A MERIS másik hátránya, hogy csak 2002, az Envisat műhold felbocsátása óta van róla elérhető adat. Az előre modellezés valamilyen atmoszféra modell felhasználásával a felszíni mérésekből állítja elő kb. 1 km horizontális felbontással a légköri paramétereket.

Az atmoszféra hatás csökkentésének statisztikus módszerei: (i) az idősor alkalmazása és (ii) az állandó szórópontok (*permanent scatterers* – PS) módszere. A statisztikus módszerek hátránya a nagy pontszám igény, amelyet csak nagy

képszám (pl. a PS technika min. 35 képet igényel) mellett lehet kielégíteni. A PS technika másik hátránya, hogy az eljárás még kutatási célra sem nyilvános.

Eredmények

Egy Debrecen környéki mintaterületre számos kép-pár felhasználásával készítettem interferogramokat. A felszín gyors változása miatt a növényzettel fedett területen nagy a temporális dekorreláció. Azt tapasztaltam, hogy vizsgálatomban ez olyan mértékű koherencia veszteséget okozott, hogy a mérés pontossága érdekében a növényzettel fedett területet ki kellett zárni a feldolgozásból. A mintaterületet szűkítése után (3. ábra) a növényzettel fedett terület már nem domináns, a dekorrelációs hatást a 0,2-nél kisebb koherenciájú pontok kizárásával lehet tovább csökkenteni. Az előforduló adathiányos területek nagy részét interpolációval ki lehet tölteni. A feldolgozás során az interpoláció végrehajtásához 200 méteres sugarat és minimum 12 pont felhasználását határoztam meg [20].



3. ábra A 0,5-nél nagyobb koherenciájú pontok elhelyezkedése a mintaterületen

Az atmoszféra hatását vizsgálatom során csak statisztikus módon lehet csökkenteni, mert az 1992–2000 időszak archivált képeiből dolgoztam, és utólag a kellő felbontású meteorológiai adatokat már nem tudtam elérni. Egy öttagú idősorral dolgoztam, amely lefedte az egész időszakot. Ez a módszer megőrzi a trendeket és átlagolja a légkör kis ingadozásait. A címlapon a felső színes ábra ezt az idősort mutatja. Az ábrán a fehér terület a koherencia vesztesé miatti adathiányt mutatja.

Az interferogramokat a feldolgozás végső lépésében a radar koordinátákból (pálya irányú és arra merőleges irányok) át kell számítani geodéziai referencia rendszerbe. Az általam használt program

ezt a WGS84 rendszerbe végzi el. Az eredményt végül EOVB-ba kell transzformálni [21, 22, 23]. Ezután végeztem el az idősor elemeinek összesítését. Az átlagtól való eltérést (abszolút értékben) a címlapon látható alsó színes ábra mutatja. Az ábrán látható, hogy hol vannak az atmoszférikus hatás vagy a felszín megváltozása (pl. az épített környezet megváltozása) miatt jelentős zavarok. Az időbeli felbontás növelésével (több mintával) a terület vertikális mozgását pontosabban lehet majd meghatározni.

Köszönetnyilvánítás

Az interferometria vizsgálat hátterét a MŰI (2003, TP 145-146), az ESA CAT-1 (C1P.2380) és az ESA PECS (No 98026) pályázatok biztosították. Köszönöm Dr. Grenczy Gyula (FÖMI KGO) közreműködését.

IRODALOM

- Henderson, F. M.–Lewis, A. J. (eds., 1998): Principles and Applications of Imaging Radar. John Wiley & Sons Inc., New York, 866p.
- Hanssen R.F. (2001): Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic, Dordrecht, 308p.
- Ferretti, A.–C. Prati–F. Rocca (2001): Permanent Scatters in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1, 8–20.
- Ferretti, A.–C. Prati–F. Rocca (1999): Permanent Scatters in SAR Interferometry. *Proceeding of IGARSS'99*, Hamburg, Germany, 1528–1530.
- Zebker, H.–J. Villasenor (1992): Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing*, Vol. 30, No. 5, 950–959.
- Bamler, R. –D. Just (1993): Phase Statistics and Decorrelation in SAR Interferometry, *Proceedings of IGARSS'93*, Japan, 980–984
- Lee, H. –J.G. Liu (1999): Spatial Decorrelation due to Topography in the Interferometric SAR Coherence Imagery, *Proceedings of IGARSS'99*, Hamburg, Germany, 485–487
- Ferencz Cs., (1996) Elektromágneses hullámterjedés, Akadémiai Kiadó. Budapest, 460o.
- Just, D. –R. Bamler (1994): Phase Statistics of Interferograms with Applications to Synthetic Aperture Radar, *Applied Optics*, Vol. 33, No. 20, 4361–4368.
- Hanssen R.F. –R. Bamler (1999): Evaluation of Interpolation Kernels for SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, No. 1, 318–321.
- Hanssen R.F. –A. Feijt (1996): A first Quantitative Evaluation of Atmospheric Effects on SAR Interferometry, *Proceedings of the 'Fringe 96' Workshop on ERS SAR Interferometry*, Zurich, Switzerland, Vol.1, 277–282.
- Zebker, H.A.–P.A. Rosen–S. Hensley (1997): Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps, *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, No. B4 7547–7563.
- Massonnet, D.–K. L. Feigl (1998): Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, Vol. 36, No. 4, 441–499,
- Holley, R.–G. Wadge–M. Zhu (2005): In-SAR measurements of volcanic deformation at Etna – forward modelling of atmospheric errors for interferogram correction, *Proceedings of the 'Fringe 2005' Workshop on ERS SAR Interferometry*, Frascati, Italy, http://earth.esa.int/fringe2005/proceedings/presentations/567_holley.pdf (2007.02.21)
- Gray, A.L.–K.E. Mattar–G. Sofko (2000): Influence of Ionospheric Electron Density Fluctuations on Satellite Radar Interferometry, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 10, 1451–1454.
- Hanssen, R.F.–T.M. Weckwerth–H.A. Zebker –R. Klees (1999): High Resolution Water Vapor Mapping from Interferometric Radar Measurements, *Science*, Vol. 283, 1297–1299.
- Ge, L., S. Han – Ch. Rizos (2000): The Double Interpolation and Double Prediction (DIDP) Approach for InSAR and GPS Integration, *19th International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Congress*, Amsterdam, Holland, 205–212.
- Bonforte, A.–A. Ferretti, C. Prati–G. Puglisi–F. Rocca (2001): Calibration of Atmospheric Effects on SAR Interferograms by GPS and Local Atmosphere Models: First Results, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, No. 63, 1343–1357
- Massonnet, D. –T. Rabaute (1993): Radar Interferometry: Limits and Potential, *IEEE*

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No. 2, 445–464.

20. Petrik O. (2007): Műholdas radar-interferometria hazai alkalmazása: felszínsüllyedés-vizsgálat Debrecen környékén. *Geodézia és Kartográfia* Vol. 59, in press.
21. Mihály, Sz. (1996): Description Directory of the Hungarian Geodetic Reference. *GIS-Geo-Informationssysteme* Vol. 9, 30–34.
22. Timár G.–Molnár G.–Pásztor Sz.(2002): A WGS84 és a HD72 alapfelületek közötti transzformáció Molodensky-Badecsk-féle (3 paraméteres) meghatározása a gyakorlat számára. *Geodézia és Kartográfia* Vol. 54 (1), 11–16.
23. Molnár G.–Timár G. (2002): Az EOVS koordináták nagypontosságú közelítése Hotine-féle ferdetengelyű Mercator-vetülettel. *Geodézia és Kartográfia* Vol. 54 (3), 18–22.

Limits of satellite radar interferometry applications in surface deformation monitoring

Petrik, O.

Summary

An overview is given on the sources of coherence loss in satellite radar interferometry. A deformation map (1992–2000) was prepared on a sample near Debrecen, East-Hungary. Possible mitigation methods were specified to reduce the atmospheric effects. During the interferometric process on non-urban areas very low coherence was found due to temporal decorrelation (rapid changes in vegetation) so these areas were excluded from the interpretation. Some interferometric pairs were rejected due to large atmospheric effects. The remaining atmospheric effects were reduced with time series method. The resulted difference map is presented.

FELHÍVÁS!

Tájékoztatjuk az érintett földmérő kollégákat, hogy a földmérési és térképészeti tevékenységről szóló 1996. évi LXXVI. törvény végrehajtására kiadott 21/1997.(III.12.) FM-HM együttes rendelet 14. § (6) bekezdése értelmében, a földmérő igazolványok a kiállításától számított 10 évig érvényesek. A rendelet hatálybalépésének évében, 1997-ben kiadott földmérő igazolványok érvényessége 2007. évben lejár.

A lejárt igazolványok helyett új igazolványt kell igényelni. Az igénylőlap a www.fomi.hu internetes honlapról letölthető. Az igazolvány kiadásáért fizetendő igazgatási szolgáltatási díj összege a 63/1999.(VII.21.) FVM-HM-PM együttes rendelet jelenleg hatályos 17. § (2) bekezdése alapján 4000.- Ft, mely összeget Földmérési és Távérzékelési Intézet 100320000-0147452 7-00000000 számú csekk számlájára kell befizetni a FÖMI-től igényelhető készpénz-átutalási megbízással, vagy közvetlenül a csekk számlára átutalni „310. földmérő igazolvány” és az igazolvány tulajdonosának megjelölésével. Az igénylőlaphoz mellékelni kell a földmérő új keletű, igazolványkép méretű arcképét, a jogszabályban előírt szakképzettséget igazoló oklevél másolatát, valamint az igazgatási szolgáltatási díj befizetését igazoló bizonylat másolatát.

Az új igazolványok igénylését és kiadását érintő további kérdésekkel kapcsolatosan *Gazdagh Éva* főtanácsostól (Tel.: 06/1/460-4010, fax:06/1/222-5112; e-mail: gazdagh.eva@fomi.hu) kérhető felvilágosítás.