

A MAGSAT mesterséges hold mágneses méréseinek feldolgozása II., a mérési adatok interpolációja¹

KIS KÁROLY², WITTMANN GÉZA³

A MAGSAT mesterséges hold mágneses mérési adatai rendezetlenül, egy gömbhéj szegmensben oszlanak el. Az adatokat a földkéregből származó anomáliák analizésére kívánjuk felhasználni. Ennek a célnak érdekében az adatokat előzetes szelekciónak kell alávetni. Az előzetes feldolgozás lépései: azok az adatok kerültek további feldolgozásra, amelyekre vonatkozó Kp -index értéke kisebb-egyenlő mint $2+$; eltávolításra kerültek a 2500 km-nél hosszabb hullámhosszúságú anomáliák, mivel ezek a Gauss-féle sorfejtés együtthatóinak spektrális analizise alapján a földmagból származnak; a magnetoszférikus eredetű áramok hatásának korrekciója. A szelektált, illetve korrigált mérési adatok interpolációja 6770 km sugarú, szélességben 35° – 65° és hosszúságban -12° – 30° intervallumban történt, $0,2$ fokként. Az interpoláció súlyfüggvénye a Gauss-féle felülvágó szűrő volt. Az interpolált adatok hibabecslése abszolút hiba megadásával történt.

K. KIS and G. WITTMANN: Interpretation of the magnetic measurements of the MAGSAT, part II, interpolation of the magnetic measurements

The magnetic measurements of the MAGSAT are randomly distributed in a spherical shell. The data will be used for the analysis of magnetic anomalies originated from the crust. The data were selected for this purpose. The steps of selection were: those data were used for the further analysis which were characterized by $Kp \leq 2+$; the anomalies which had wavelength greater than 2500 km were eliminated because they originated from the core according to the spectral analysis of the Gaussian coefficients of the Earth's magnetic field; correction of the effect caused by the magnetospheric field. The selected and corrected data were interpolated for a sphere of radius 6770 km, for the interval of 35° – 65° in latitude, and for the interval of -12° – 30° in longitude. The data were interpolated into a spherical grid of 0.2° . The weight function of interpolation was the Gaussian low-pass filter. The error of the interpolated data was estimated by the absolute error.

Bevezetés

A MAGSAT (1979-094 sorszámú) mesterséges holdat az Egyesült Államok Űrkutatási Hivatala (NASA) bocsátotta Föld körüli pályára. A nevezett mesterséges hold 1979. október 30. és 1980. június 11. közötti időintervallumban történt keringése során 352 – 561 km-es (prigeum, illetve apogeum) magasságtartományban végezte a földi mágneses tér totális és x , y , z összetevőjének mérését [KIS et al. 1993].

Mivel az adatokat a földkéregből származó anomáliák analizésére kívánjuk felhasználni, ezért az adatokat előzetes szelekció után, rögzített magasságra és adott φ , λ koordinátájú pontokba kellett interpolálni. Az előzetes feldolgozás, illetve szelekció lépései:

- azok az adatok kerültek további feldolgozásra, amelyekhez tartozó Kp -index értéke kisebb-egyenlő mint $2+$;
- az adatokból el kellett távolítani a földmagból származó mágneses teret;
- külső eredetű mágneses tér hatásának korrekciója.

Az előzetes feldolgozás során alkalmazott szelekció

A mesterséges holdon elhelyezett cézium skalár magnetométer (gyártó: Ball Brothers and Varian Associates, Kanada) és fluxgate vektor magnetométer (gyártó: Goddard Space Flight Center, USA) abszolút hibája ± 2 nT, illetve ± 6 nT volt. Ennek a pontosság-nak az elérése ± 20 szögmásodperces pontosságot követelt meg az iránybeállítás során. A mesterséges hold pozíció meghatározását két csillagkamera és egy napérzékelő szenzor működtetésével érték el. A mesterséges hold helyzetét vertikálisan ± 60 m, horizontálisan ± 300 m pontossággal lehetett meghatározni. A mesterséges holdon az időmérés pontossága ± 1 ms, a földi állomáson ± 10 μ s volt. A mágneses tér mérése $4,81545$ másodpercenként történt (ez körülbelül 40 km-es pályamenti mintavételi távolságnak felel meg) [LANGEL et al. 1982].

Mindegyik mérési adat a hely és idő függvényében adott. A helykoordináták: r , φ , λ (gömbi polár-koordináták: sugár, szélesség, hosszúság); időkoordináták: módosított Julián-nap, az adatrekord első adatának időpontja, és az egyes mérési pontok közötti időkülönbség.

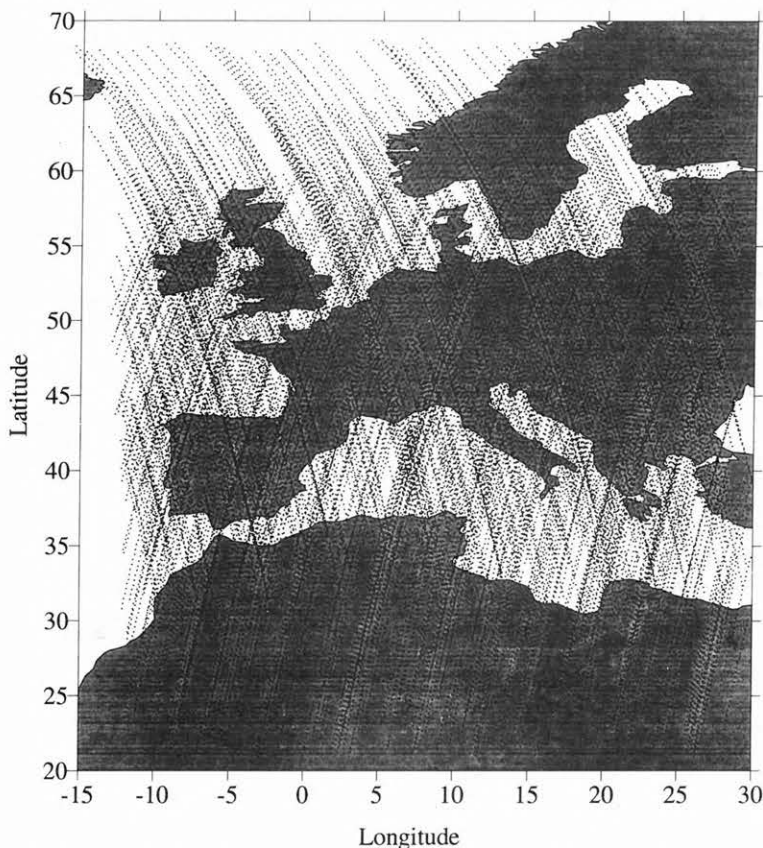
Az adatrendszer tartalmazza a pálya felszálló és leszálló csomópontjában a planetáris Kp -index értéket. A Kp -index definíciója megtalálható LINCOLN [1967] munkájában. A rendelkezésre álló $69\,570$ adat közül $43\,563$ esetben teljesült az, hogy a rájuk vonatkozó Kp -index értéke kisebb-egyenlő volt mint $2+$. A továbbiak során csak azok az adatok kerültek

¹ Beérkezett: 1995. május 16-án

² ELTE Geofizikai Tanszék, H-1083 Budapest, Ludovika tér 2.

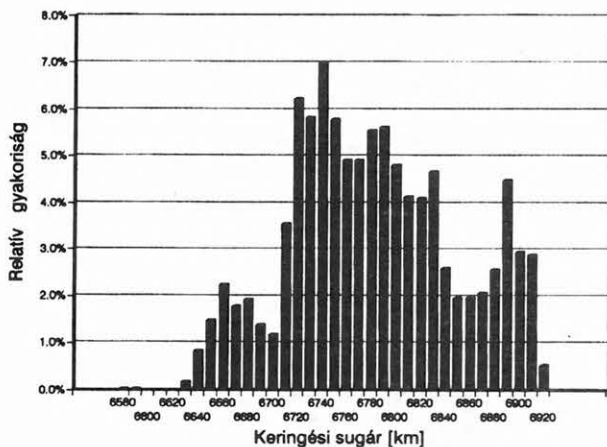
³ Geofizikai Szolgáltató Kft., H-1068 Budapest, Városligeti fasor 42.

feldolgozásra, amelyekre ez a feltétel teljesült. A Kp -index értéke alapján szelektált adatok eloszlása szélességben $20,778^\circ$ és $68,803^\circ$, hosszúságban $-15,512^\circ$ és $29,964^\circ$ közé esett. A szelektált adatok szélesség és hosszúság szerinti eloszlása az 1. ábrán látható. A szelektált adatok sugár szerinti eloszlása $6620,047$ km és $6908,418$ km intervallumba esett. A szelektált adatok magasság szerinti eloszlása a 2. ábrán látható.



1. ábra. A MAGSAT szelektált mérési adatainak eloszlása a gömbi szélesség (φ) és hosszúság (λ) függvényében

Fig. 1. Distribution of the selected data measured by the MAGSAT versus the spherical latitude (φ) and longitude (λ)



2. ábra. A MAGSAT szelektált mérési adatainak eloszlása a sugár függvényében

Fig. 2. Distribution of the selected data measured by the MAGSAT versus the spherical radius

Az adatok szelektálásának következő lépése a földmagból származó mágneses tér eltávolítása. Ez a földi mágneses tér spektrális analízisen alapult. A *Project Magnet* keretében a Földet körülvevő, közel $37\,000$ km hosszúságú szelvény légi mágneses méréseinek Fourier-analízisét végezték el [ALLDREDGE et al. 1963]. A meghatározott harmonikus együtthatók vizsgálatából megállapítható, hogy 3700 km-nél hosszabb hullámhosszú anomáliák származnak a földmagból, míg az ennél rövidebb hullámhosszal rendelkező anomáliák a földkéregből származnak. A földi mágneses tér spektrális analízise elvégezhető a Gauss-féle sorfejtés együtthatóinak felhasználásával is [LOWES 1974; LANGEL, ESTES 1982; MEYER et al. 1985]. Az együtthatók spektrális analíziséből kimutatható, hogy az $n \geq 15$ fokú tagok reprezentálnak olyan mágneses teret, amely a földkéregből származik. A sorfejtés $n=15$ -höz tartozó együtthatói mintegy 2500 km-es hullámhossznak felelnek meg. A számítások során a 2500 km-es hullámhosszát tekintettük annak az értéknek, amely a földmagból, illetve a földkéregből származó anomáliákat a forrás helyzetétől elválasztja.

Az Sq variációt létrehozó ionoszférikus áramok helyi időben a déli órához tartozó meridián felett koncentrálnak. A MAGSAT mesterséges holdat hajnal—alkony napszinkron pályára állították ennek a hatásnak ha nem is teljes eliminálása, de jelentős csökkentése érdekében.

A külső határból származó mágneses tér figyelembevételét a következő — bár gondolatilag megalapozott — de numerikus kivételében közelítő eljárással határozzák meg. Ezeknek az eljárásoknak részletes összefoglalása megtalálható SUZUKI et al. [1985]; LANGEL, ESTES [1985]; YANAGISAWA, KONO [1985] tanulmányában.

A magnetoszférikus eredetű mágneses tér és az ennek következtében kialakuló indukciós mágneses tér W potenciálját rendszerint a gömbi harmonikus sorfejtés első rendjéig veszik figyelembe [YANAGISAWA, KONO 1985]:

A magnetoszférikus eredetű mágneses tér és az ennek következtében kialakuló indukciós mágneses tér W potenciálját rendszerint a gömbi harmonikus sorfejtés első rendjéig veszik figyelembe [YANAGISAWA, KONO 1985]:

$$W = a \left[\frac{r}{a} E + \left(\frac{a}{r} \right)^2 I \right] \cos \theta \quad (1)$$

ahol a a Föld sugara ($6371,199$ km), r a mérési pont távolsága a gömbi koordináta-rendszer origójától, E jelenti a külső tér hatását reprezentáló együtthatót, míg I az indukált mágneses tér hatását tartalmazó együtthatót, továbbá θ a gömbi pólustávolság. Az ennek a potenciálnak megfelelő mágneses tér x és z komponense:

$$X = -\frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} = \left[E + \left(\frac{a}{r} \right)^3 I \right] \sin \theta, \quad (2)$$

illetve

$$Z = -\frac{\partial W}{\partial z} = \left[-E + \frac{2a^3}{r^3} I \right] \cos \theta. \quad (3)$$

Az E és I együtthatók rendelkezésre állnak mindegyik pálya felszálló és leszálló csomópontjában.

A mérési adatok interpolációja

A MAGSAT által mért mágneses adatok rendezetlenül oszlanak el egy gömbhéj szegmensben (1. és 2. ábra). A mágneses mérési adatok interpolációja rögzített sugarú ($r=6770$ km) és φ, λ koordinátákban $0,2$ fokként, $\varphi=35^\circ-65^\circ$ és $\lambda=-12^\circ-30^\circ$ intervallumban történt meg. Az interpoláció tervezése térfrekvencia tartományban került megvalósításra. Az adatok interpolációját a VÉGES [1971] által javasolt eljárással végeztük el.

Rögzítsük a derékszögű koordináta-rendszer origóját az interpolációra kiválasztott térbeli ponthoz. A koordináta-rendszer x -tengelye északi, y -tengelye keleti irányba mutat, míg z -tengelye a helyi függőleges irányába lefelé orientált.

Az interpolációs eljárás elméleti átviteli függvénye a Gauss-féle

$$S(f_R, k) = \exp(- (f_R k)^2) \quad (4)$$

felülvágó szűrő [MESKÓ 1984], ahol f_R a háromdimenziós radiális térfrekvencia, k a Gauss-féle átviteli függvény paramétere. A háromdimenziós radiális térfrekvencia kifejezhető a tengelyirányú f_x, f_y és f_z térfrekvenciákkal:

$$f_R = (f_x^2 + f_y^2 + f_z^2)^{1/2}.$$

Az interpoláció súlyfüggvénye, a Gauss-féle átviteli függvény háromváltozós inverz Fourier-transzformáltjával határozható meg:

$$W(R, k) = F^{-1} \{ S(f_R, k) \}, \quad (5)$$

ahol

$$R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}.$$

Az összefüggésben szereplő R távolságot az interpolációs ponttól mérjük. A súlyfüggvény meghatározása során kihasználható a Gauss-féle átviteli függvény változók szerinti szeparálhatósága [MESKÓ 1984], így a súlyfüggvény a

$$w(R, k) = \frac{\pi^{3/2}}{k^3} \exp\left(-\frac{\pi^2}{k^2}(x^2 + y^2 + z^2)\right) \quad (6)$$

egyenlettel írható le. Bevezetve a mintavételi távolságegységben mért x', y', z' dimenzió nélküli változókat és k' -t, a súlyfüggvény dimenzió nélküli paraméterét a következő definícióval:

$$x' = \frac{x}{\xi}, \quad y' = \frac{y}{\xi}, \quad z' = \frac{z}{\xi}, \quad k' = \frac{k}{\xi},$$

ahol ξ a mintavételi távolság, ezekkel a változókkal a súlyfüggvényt a

$$w(x', y', z', k') = \frac{\pi^{3/2}}{(k' \xi)^3} \exp\left(-\left[\frac{\pi^2}{k'^2}(x'^2 + y'^2 + z'^2)\right]\right) \quad (7)$$

alakban kapjuk meg. A hazai kutatási gyakorlatnak megfelelően a Gauss-féle súlyfüggvény jellemezhető az m paraméterével:

$$m = \frac{36}{k'}.$$

Az interpolációs feladat megoldására kiválasztott Gauss-féle átviteli függvény alkalmazása egyben felülvágó szűrést is jelent. A felülvágó szűrő f_c vágási frekvenciáját a -3 dB erősítésű átvittel definiálva, az átviteli függvény paramétere és a vágási térfrekvencia között az

$$f_c' = 0,01635 m$$

összefüggés áll fenn, ahol f_c' a dimenzió nélküli vágási térfrekvencia ($f_c' = f_c \xi$).

A súlyfüggvény ismeretében, az interpolációs pontban súlyozott összegzéssel meghatározott interpolált mágneses tér értéke a totális mágneses tér esetében:

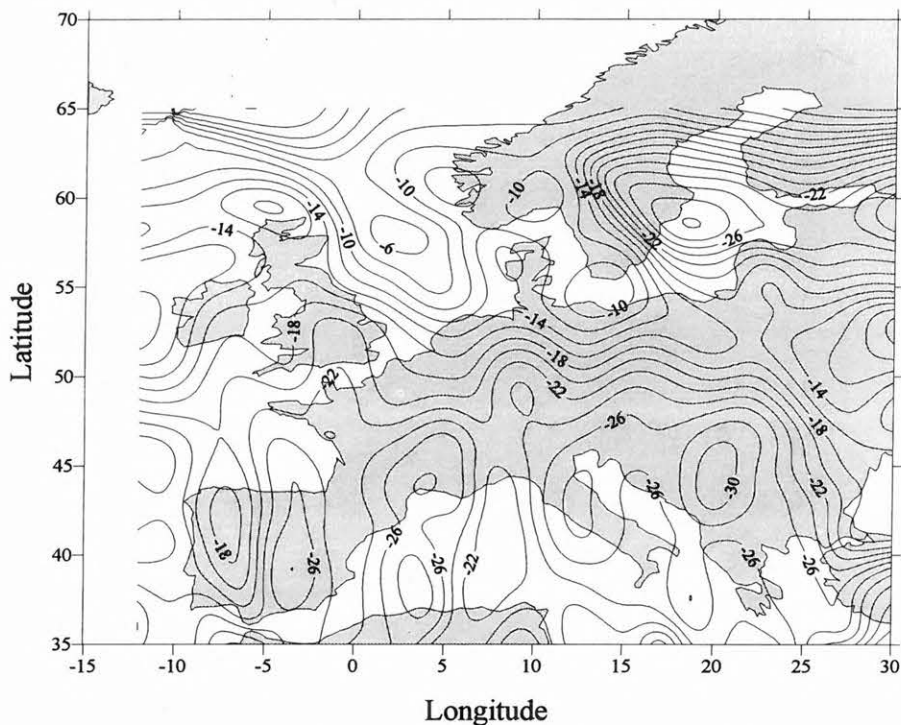
$$T_{interpolált} = \sum_{i=1}^n T_i \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad (8)$$

ahol n a figyelembe vett adatok száma és

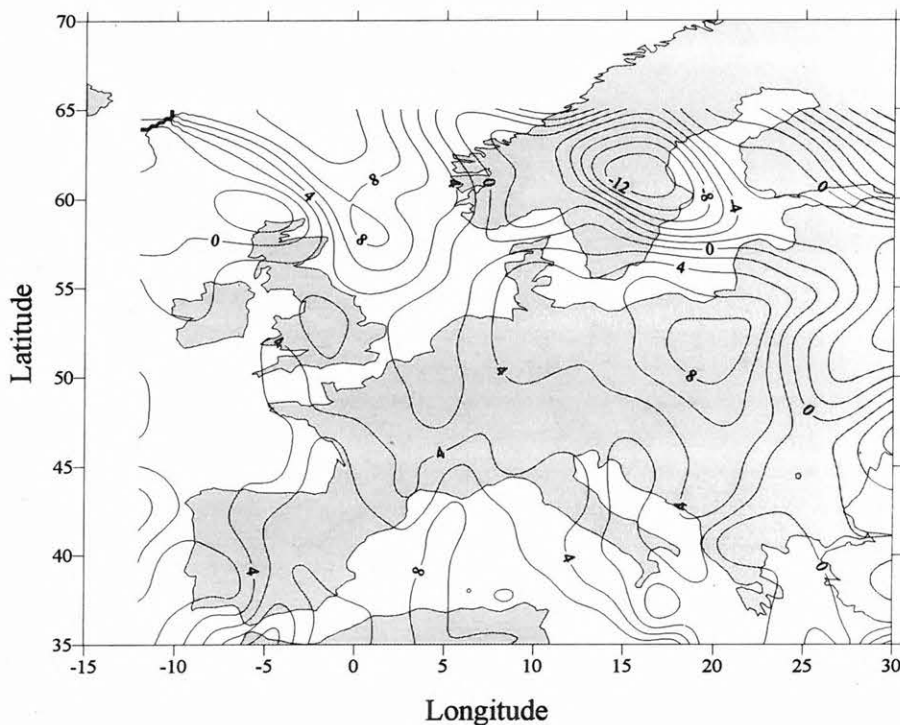
$$w_i = \frac{\pi^{3/2} m^3}{36 \xi^3} \exp\left(-\frac{\pi^2 m^2}{36^2}(x_i'^2 + y_i'^2 + z_i'^2)\right).$$

Az interpoláció során az adatok átlagos mintavételi távolsága: $\xi = 25$ km, a súlyfüggvény paramétere: $m=21$ volt. Ilyen választás mellett az interpoláció vágási térfrekvenciája $0,01373 \text{ km}^{-1}$, illetve vágási

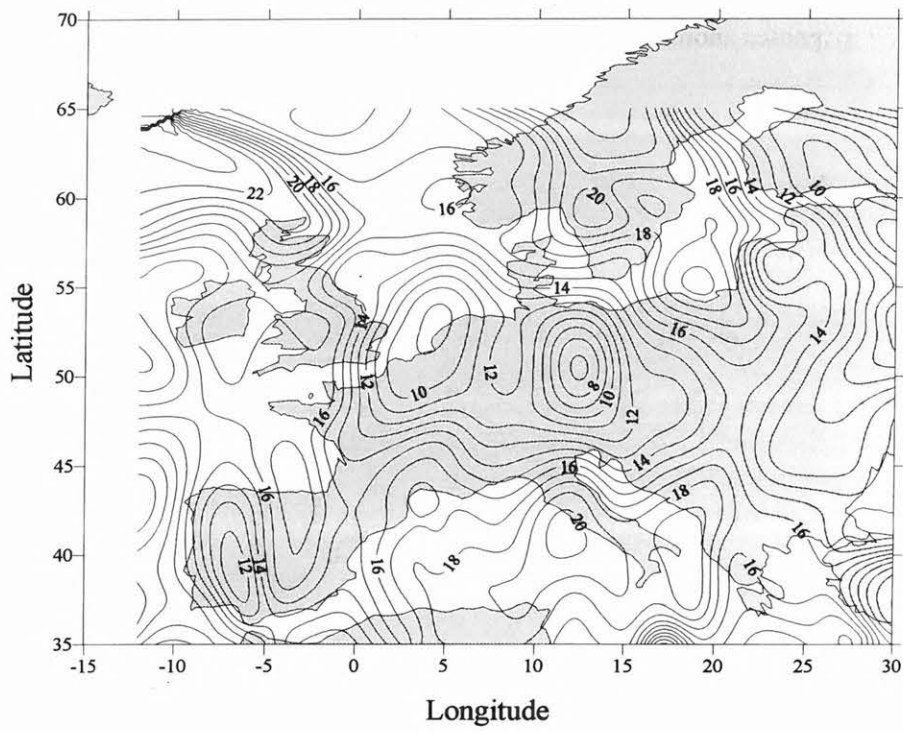
hullámhossza 72,81 km. A 6770 km sugarú gömb z -komponense és a totális anomáliatér látható a 3., 4., 5. és 6. ábrán.



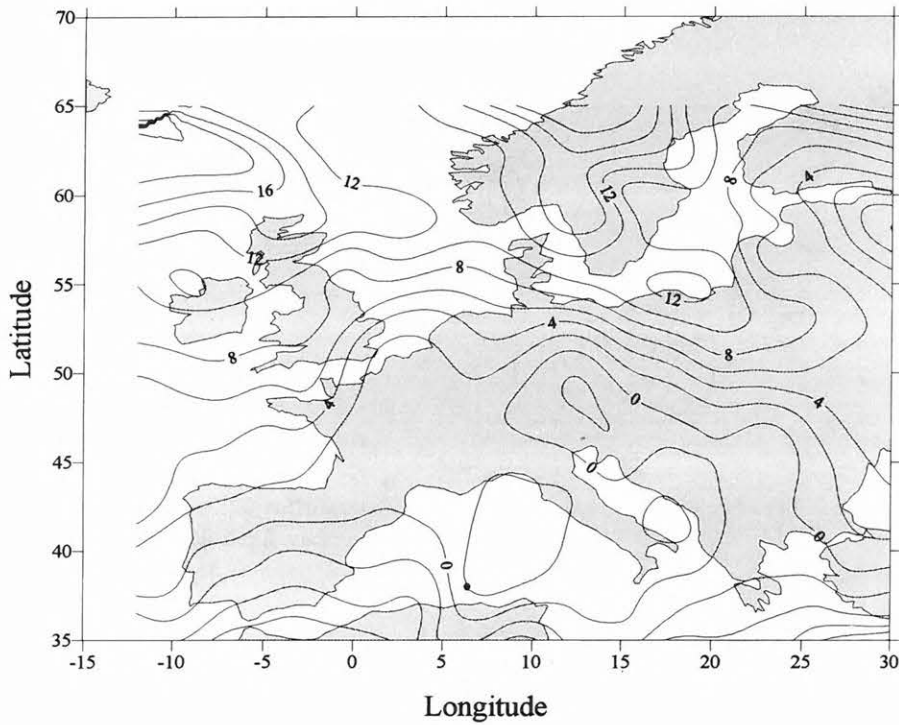
3. ábra. A 6770 km sugarú gömb felszínére interpolált mágneses anomália tér x -komponense, az izovonalak egysége nT
 Fig. 3. Interpolated magnetic anomalies of the x -component on the surface of a sphere determined by the radius 6770 km.
 Contours are given in nT units



4. ábra. A 6770 km sugarú gömb felszínére interpolált mágneses anomália tér y -komponense, az izovonalak egysége nT
 Fig. 4. Interpolated magnetic anomalies of the y -component on the surface of a sphere determined by the radius 6770 km.
 Contours are given in nT units



5. ábra. A 6770 km sugarú gömb felszínére interpolált mágneses anomália tér z-komponense, az izovonalak egysége nT
 Fig. 5. Interpolated magnetic anomalies of the z-component on the surface of a sphere determined by the radius 6770 km.
 Contours are given in nT units



6. ábra. A 6770 km sugarú gömb felszínére interpolált mágneses anomália tér totális komponense, az izovonalak egysége nT
 Fig. 6. Interpolated magnetic anomalies of the total component on the surface of a sphere determined by the radius 6770 km.
 Contours are given in nT units

Az interpolált adatok hibabecslése

Az interpolációhoz felhasznált mérési adatok, a mért mágneses tér x , y , z komponense és a totális mágneses tér abszolút hibája az irodalomban közöltek alapján 6 nT, illetve 2nT. Így a súlyozott összegzéssel meghatározott, mérési adatokból interpolált érték abszolút hibája:

$$\delta_{interpolált} = \delta_{mérés} \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad (9)$$

ahol w_i jelenti az i -ik adatra vonatkozó, súlyfüggvényből meghatározott értéket. Mivel az együtthatók összege 1, tehát az interpolált adatok abszolút hibája megegyezik a mérési adatok abszolút hibájával [DEMIDOVICH, MARON 1987].

Köszönetnyilvánítás

A jelen tanulmányba foglalt vizsgálatok az OTKA I/4. T 4377 nyilvántartási számú pályázat támogatásával készültek.

HIVATKOZÁSOK

- ALLDREDGE L. R., VAN VOORHIS G. D., DAVIS T. M. 1963: A magnetic profile around the world. *Journal of Geophysical Research* **68**, 12, 3679-3692
- DEMIDOVICH B. P., MARON I. A. 1987: *Computational Mathematics*, Mir Publishers, Moscow

- KIS K., PUSZTA S., WITTMANN G. 1993: A MAGSAT mesterséges hold mágneses méréseinek feldolgozása I. *Magyar Geofizika* **34**, 4
- LANGEL R. A., ESTES R. H. 1982: A geomagnetic field spectrum. *Geophysical Research Letters* **9**, 4, 243-245
- LANGEL R. A., ESTES R. H. 1985: Large-scale, near-surface magnetic fields from external sources and the corresponding induced internal field. *Journal of Geophysical Research* **90**, B3, 2487-2494
- LANGEL R., OUSLEY G., BERBERT J., MURPHY J., SETTLE M. 1982: The MAGSAT Mission. *Geophysical Research Letters* **9**, 4, 243-2454
- LINCOLN J. V. 1967: Geomagnetic indices. In: MATSUSHITA S., CAMPBELL W. H. (Eds.) *Physics of Geomagnetic Phenomena*, Academic Press, New York, London. **1**, 67-100
- LOWES F. J. 1974: Spatial power spectrum of the main geomagnetic field, and extrapolation to the core. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society* **36**, 717-730
- MESKÓ A. 1984: *Digital Filtering: Application in Geophysical Exploration for Oil*. Akadémiai Kiadó, Budapest
- MEYER J., HUFFEN J. H., SIEBERT M. 1985: On the identification of MAGSAT anomaly charts as crustal part of the internal field. *Journal of Geophysical Research* **90**, B3, 2537-2541
- SUZUKI A., YANAGISAWA M., FUKUSHIMA N. 1985: Antisunward space current below the MAGSAT level during magnetic storms and its possible connection with partial ring current in the magnetosphere. *Journal of Geophysical Research* **90**, B3, 2465-2471
- VÉGES I. 1971: Map plotting with weighted average on the surface of a circular disc. *Pure and Applied Geophysics* **78**, 5-17
- YANAGISAWA M., KONO M. 1985: Mean ionospheric field correction for Magsat data. *Journal of Geophysical Research* **90**, B3, 2527-2536