

A közvetlen átsugárzás figyelembevétele felszínmodellekben: Barázdált felszín egyszerű modellje

FERENCZ CSABA

(MTA ELTE Geofizikai tanszék)

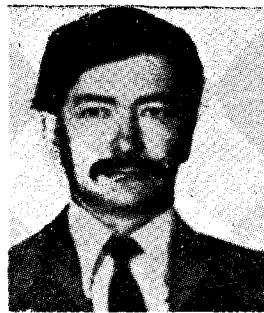
FERENCZNÉ ÁRKOS ILONA

(BME Elméleti Villamosság-tan Tanszék)

HAMAR DÁNIEL—LICHTENBERGER

JÁNOS—TARCSAI GYÖRGY

(ELTE Geofizikai Tanszék)



ÖSSZEFOGLALÁS

A távérzékelés során mért visszavert sugárzási intenzitás adatok — azaz képpontok — értelmezéséhez a vizsgált felszín sugárzási viszonyait pontosan kell ismerni. Itt olyan barázdált (szántott) felszín sugárzási modelljét mutatjuk meg, amelyik tartalmazza a felszínelemek közötti közvetlen átsugárzás hatását. Igazoljuk, hogy a közvetlen átsugárzás lényeges szerepet játszik az eredő sugárzási (reflexiós) kép kialakításában. Egyidejűleg e cikket annak illusztrálásaként is szánjuk, hogy az elektromágneses hullámterjedési — általánosságban fogalmazva a nem digitális technikai elektronikai — vizsgálatok fontossága világszerte rohamosan növekszik, amit hazai villamosmérnöki közösségünk nem hagyhat figyelmen kívül.

1. Bevezetés

A műholdas és repülőgépes távérzékelési technika terjedése az alkalmazási területek bővülése és egyes területeken már a szolgálatszerű alkalmazásbavételre tett kísérletek megkívánják a nyert adatok interpretációja pontosságának és megbízhatóságának a növekedését. Ez végeredményben a különféle (növénytakaróval fedett vagy attól mentes) felszín-részekről nyert adatok (spektrális szignatúrák) sugárzási vagy reflexiós (szórási) jellemzőkre redukálásának pontosabbá tételét igényli. Ehhez pedig elegendően pontos modellekkel kell rendelkezünk a távérzékelte adatokat befolyásoló tényezőkről, azaz a teljes hullámterjedési folyamatról, amelyik reflektált jel esetén a jelforrástól (Nap, radar-adó stb.) a felszíni reflexión át a detektorig, míg kisugárzott jel esetén (hősugárzás stb.) a sugárzó felszíntől a detektorig terjed. Az eddigi vizsgálatok alapján tudjuk, hogy mind a *légkörü terjedés (szóródás)*, mind a *felszín minősége és geometriája* erősen befolyásolja a mért adatokat [1—12]. Ezért kielégítő interpretáció során ezeket a hatásokat részleteiben is kellően pontosan figyelembe kell venni.

A spektroradiométeres távérzékeléssel történő felszínazonosítás egyik *sine qua non*-ja a légkörü hatások korrekciója [13], s e téren — mint az a már hivatkozott munkákból is látszik — kiterjedt kutatás folyik. A fontosabb figyelembe veendő és többségében vizsgálni kezdett folyamatokat az 1. ábra [14] foglalja össze. Ezek a vizsgálatok is távol állnak még attól, hogy lezártnak legyenek

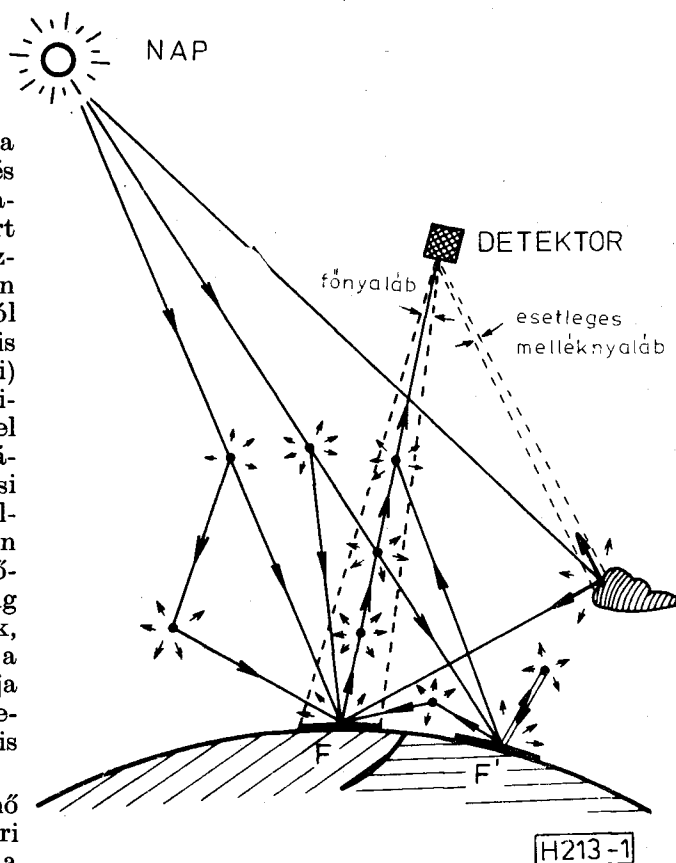
Beérkezett: 1986. V. 22. (H)

Híradástechnika XXXVIII. évfolyam, 1987. 2. szám

FERENCZ CSABA

1941-ben Csíksomlyón született. 1964-ben a Budapesti Műszaki Egyetemen híradástechnikus villamosmérnökként kiüntetéses oklevelet szerzett. 1968-ban „Sub auspiciis rei publicae popularis” kiüntetéssel egyetemi doktorrá avatták. 1972-től a műszaki tudományok kandidátusa,

majd 1981-től a műszaki tudományok doktora. 1961 óta foglalkozik úrkutatással. folyamatosan, mérnöki, kutatói és tudományos szervezői tevékenysége döntően e területre esik. Az úrkutatásban végzett munkájáért 1980-ban az Elnöki Tanács a Munka Érdemrend arany fokozatával tüntette ki.



1. ábra. A légkörü hatások vázlata

tekinthetők, bár már több figyelemre méltó eredmény született [11, 2, ...].

A másik sarkalatos kérdés a felszín viselkedésének a tisztázása. A felszín egyes részei között (1. ábra — F és F') a légkörü szóráson keresztül

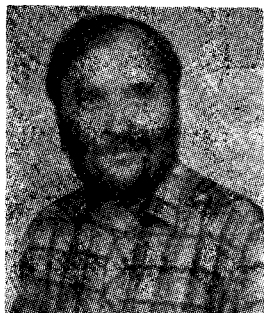


**FERENCZÓNÉ
ÁRKOS ILONA**

1952-ben az Eötvös Loránd Tudomány Egye-

temen matematika-fizika szakos tanár diplomát, 1962-ben a Budapesti Műszaki Egyetemen híradástechnikus villamosmérnöki diplomát szerzett. 1952-től 1958-ig a BME Villamos Kari Matematika Tanszéken, majd 1963-ig a Műszeripari Kutató Intézetben dolgozott. 1963 óta a BME Elméleti Villamosságban Tanszéken dolgozik. Űrkutatással 1967 óta foglalkozik, s ezen belül az utóbbi években a műholdas távérzékelés egyes kérdéseit tanulmányozza.

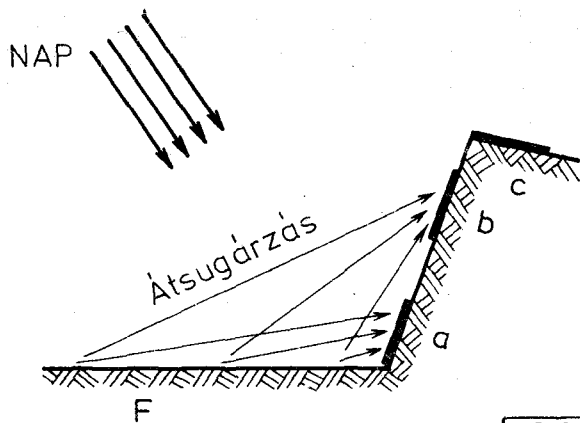
HAMAR DÁNIEL



1974-ben geofizikus oklevelet szerzett az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, majd 1977-ig az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben dolgozott. Utána az ELTE Geofizikai Tanszékére került, ahol jelenleg is magnetoszféra kutatással foglalkozik. 1981-ben egyetemi doktorrá avatták. A távérzékeléssel 1983 óta foglalkozik.

létrejövő kölcsönhatást célszerű a légköri hatások részének tekinteni. A felszint takaró növényzet viselkedését kiterjedten vizsgálják — pl. [15—19] — beleértve a növénytakaróban lejátszódó sugárzási-reflexiós folyamatokat és a növénytakaró geometriai jellemzőinek (függőleges szárhelyzet, sorszerkezet stb.) a hatását.

Ezekben a vizsgálatokban már szerepel a növény, a növény árnyékával fedett talaj és a megvilágított talaj, ahol jellemző még az, hogy e három tartományt fizikailag különböző reflektáló közegként kezelik [15, 17, 19]. E leírások növénytakaró vizsgálatokban esetenként elegendően pontosak lehetnek, de talajvizsgálati célra már nem. Ugyancsak a felszínminőséget írják le a különféle síkalapszerkezetre vonatkozó reflexiós modellek — az ideális és reális Lambert-modell, a Torrance-Sparrow modell, a Hapke-modell, az Egbert-modell, a numerikus modellek. Ezek esetenként geometriai effektusokat is tartalmaznak (pl. Egbert-modell) már. Ahhoz azonban, hogy egy modellt elegendően pontosnak tekintsünk, több tényezőt is figyelembe kell venni. Ezek közül alapvető, de csak egy tényező az, hogy a felszint (talajt) elemi felületeiben Lambert-féle vagy bonyolultabb reflektornak (sugárzóknak) tekintjük. — Egyéb effektusok kereséskor jobb a jól áttekinthető Lambert-féle modell használata, míg a gyakorlati programokban várhatóan csak a numerikus modellek elegendően pontosak. — Másik fontos tényező a felszint alkotó elemek keveredési aránya és jellemzői

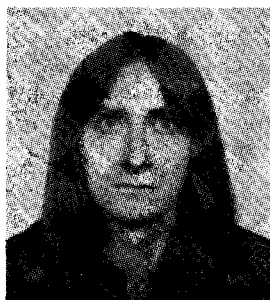


H213-2

2. ábra. A közvetlen átsugárzás szerepe tagolt terepen. Az „F” felületről érkező közvetlen átsugárzás „a” esetében nagy, „b” esetében kisebb, míg „c” esetében nulla

(talajfajta; talaj-avar, talaj-trágya, stb. arány; talajnedvesség; szemcsézettség; az utolsó művelési fázis milyensége és előzményei; ...). További meghatározó tényező az alapvetően a geometriától függő, a talajelemek között fellépő közvetlen átsugárzás mértéke — 2. ábra, amely ismereteink szerint eddig fontosságánál kisebb publicitást kapott. Az effektus különösen tagolt terepen (szántott felszín, szabdalt terep, lakótelep-szerű települések, ...) fontos szerepet játszik. A cikkben ennek az effektusnak a figyelembevételét kívánjuk bemutatni rendezett geometriájú — pl. szántott — talaj esetén. Az átsugárzási hatás jobb vizsgálhatósága érdekében a többi befolyásoló tényezőt a lehető legnagyobb mértékben egyszerűsítjük.

LICHTENBERGER JÁNOS



Az ELTE fizikus szakán 1980-ban diplomázott. 1981-től az ELTE Geofizikai tanszékén dolgozik, jelenleg tudományos munkatársként. Szakterülete a magnetoszféra-fizika, ezen belül a VLF hullámterjedés. Távérzékeléssel 1983 óta foglalkozik.

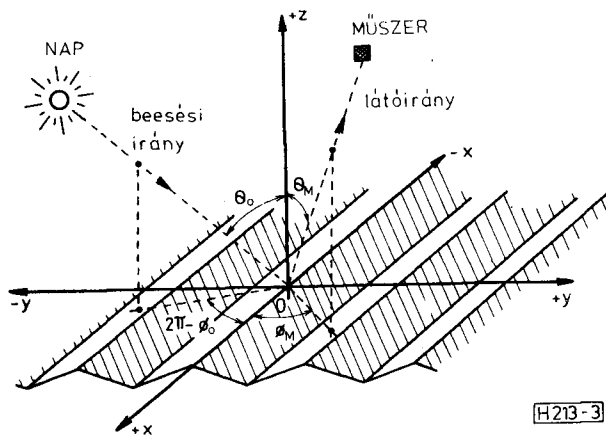


TARCSAI GYÖRGY

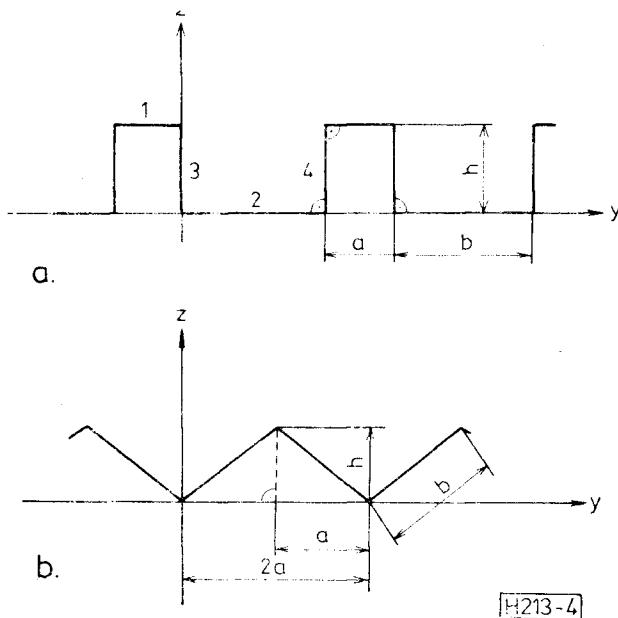
1967-ben az ELTE geofizikus szakán diplomázott. 1970-ig az ELTE Térképtudományi tanszékén dolgozott, azóta az ELTE Geofizikai tanszékén tudományos kutató. Közben 1980-tól másfél évig a Földmérési Intézet Távérzékelési Főosztályán dolgozott, utóbb annak vezetőjeként. 1969-ben egyetemi doktori címet szerzett, 1982-től a földtudományok kandidátusa.

2. A probléma megfogalmazása

Vizsgáljuk meg barázdált, de ettől eltekintve igen nagykiterjedésű (homogénnek és végtelennek tekinthető) sík egy képelemének reflexiós viselkedését, ha a megvilágító Nap és az érzékelő műszer helyzete tetszőleges. A barázdátság mérete legyen akkora és a légkör állapota olyan, hogy a légköri csillapítás stb. a barázdaméreteken belül elhanyagolható. Ezen túlmenően is eltekintünk a légköri hatások általános figyelembevételétől. Egy képelemnek (pixelnek, pontnak stb) a vizsgált felszín akkora darabját tekintjük — értelemszerűen a látóirányra merőleges vetületben —, amely jóval kisebb, mint a teljes sík látóirányú vetülete és



3. ábra. A barázda-modell számításához. A Nap helyzetét a (Θ_0, Φ_0) , a műszer látóirányát a (Θ_M, Φ_M) szög-párral adjuk meg. A koordinátarendszer x -tengelye a barázdairány, az (x, y) -sík a barázdált síkkal esik egybe a barázdák legmélyebb pontjain átfektetve, z -tengelye a sík normálisa (n_0)



4. ábra. A sugárzási modellben használt barázda-keresztmetszetek. a) Derékszögű-négyszög keresztmetszet. b) Egyenlőszárú háromszög keresztmetszet

nagyobb-egyenlő a barázdátság periodicitását jellemző mérettel. Az elvi elrendezés a 3. ábrán látható. Kétféle barázdakeresztmetszetet vizsgálunk meg, a számítások egyszerűsítése érdekében egyenes szakaszból felépíthető metszetprofilokat — 4. ábra. E két modell elemeiből bármilyen, egyenes szakaszból álló keresztmetszet sugárzási modellje összeállítható. Nem-egyenes szakaszokból álló keresztmetszetekkel most nem foglalkozunk. Az élek mentén fellépő diffrakciót előzetes, durva hibabecslés alapján elhanyagoljuk, de ez később egy pontosabb modellbe beépíthető.

A geometriából adódó hatások jobb áttekinthetősége érdekében ebben a vizsgálatban az összes barázdafelület azonos minőségű, $\tilde{\rho}$ átlagos reflexiós tényezővel (reflektancia) jellemezhető ún. reális Lambert-féle reflektornak tekintjük. $\tilde{\rho}$ -t a szokásos módon definiáljuk a (λ_1, λ_2) hullámhossztartományban:

$$\tilde{\rho} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) d\lambda,$$

mivel a légköri hatásokat figyelmen kívül hagyjuk. Pontosabban a légkör alján fellépő megvilágítással és a felszínről éppen lelépő sugárzással számolunk, s elhanyagoljuk a többszörös szórás, a visszaszórás, ... befolyását. — Célunk, hogy meghatározzuk a műszer irányában (a látóirányban) mutatkozó

átlagos reflexiót (reflektanciát) — $\tilde{\rho}_M$ -et, amelyet a világosabb és sötétebb felületelemek átlagfényességéből számíthatunk. Így a modell egy irányfüggő (anizotróp) reflektanciát ad amely általában a Nap és a műszer helyzetétől egyaránt függ, azaz $\tilde{\rho}_M = \tilde{\rho}(\Theta_M, \Phi_M; \Theta_0, \Phi_0; \tilde{\rho})$. A numerikus számításokban a talajvizsgálatnál szóba jöhető $0,05 \leq \tilde{\rho} \leq 0,6$ tartományt tekintettük. Természetesen végül interpretációs célból a problémát invertálni kell, ugyanígy

$\tilde{\rho}_M$ a mért mennyiség és $\tilde{\rho}$ -t keressük. Azonban ez a kívánatos inverzió is igen nehéz, s ezért első lépésben egy $\tilde{\rho}$ léptetésére alapozott szukcesszív approximációs $\tilde{\rho}_M$ interpretálással meg kellett elégedni.

A vizsgálatban a megvilágítást a Nap közvetlen sugárzásával és az égboltfényléssel vesszük figyelembe. A napsugárzás teljesítménysűrűségének a *légkör alján*, a felszínnél fellépő (L_0) értékét használjuk. Az égboltfénylést az áttekinthetőség megőrzése érdekében $L_\epsilon = \text{állandó}$ értékűnek tekintjük, de megjegyezzük, hogy az összefüggésekbe az irányfüggően változó égboltfénylés is beépíthető. Egy-egy elemi felületet tehát modellünkben

$$L(\Theta, \Phi) = L_0 \delta(\Theta, \Phi) + L_\epsilon(\Theta, \Phi)$$

ahol δ a Dirac-delta disztribúciót jelöli. Egyszerűsítő feltételezéseink következtében

$$L(\Theta, \Phi) = L_0 \delta(\Theta, \Phi) + L_\epsilon, \quad (1)$$

ahol $L_0 = \text{állandó}$, $L_\xi = \text{állandó}$. A számítás során (1)-et kiegészítő feltételként kell érvényesíteni, hogy a $\Theta_0 \cong \pi/2$ tartományban a teljes felszint csak az égboltfény világítja meg (pl. árnyékos lejtő), s ha $\Theta_M \cong \pi/2$, akkor a műszer nem látja a felszint (pl. domb átellenes oldala). (1)-ből kiindulva az egyes felületelemek teljes E gerjesztését a szokott módon a beeső teljesítménysűrűség térszög szerinti integrálásával kaphatjuk meg — pl. [20].

3. A derékszögű-négyszög keresztmetszetű barázda-modell

A modellt három fő lépésben építjük fel: Meghatározzuk az (1) megvilágításból adódó közvetlen gerjesztést. Meghatározzuk az egyes felületek egymásra átsugárzásának a hatását. Végül megadjuk \tilde{q}_M értékét.

3.1 A közvetlen gerjesztés

A felvett barázda-profil a 4. a. ábrán látható és összesen négy részfelületből áll, s x irányban a profil változásmentesen végtelen.

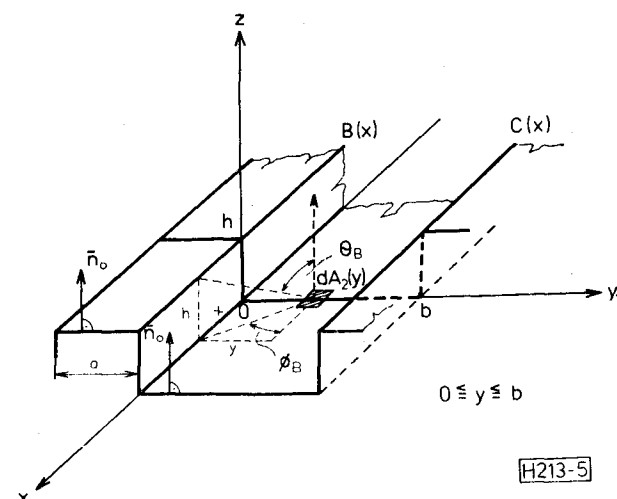
Az égbolt valamely dF elemi darabjáról az „1” felület valamely dA_1 elemére beeső gerjesztés

$$d^2P_1 = L(\Theta, \Phi) \cdot dA_1 \cdot \cos\Theta \cdot dF, \quad (2)$$

ahol $dF = \sin\Theta \cdot d\Theta \cdot d\Phi$, s az irányszögek a $-\pi \cong \Phi \cong \pi$ és $0 \cong \Theta \cong \pi/2$ tartományokban változhatnak. (2) integrálása során találkozunk a Heaviside-féle (egységugrás) disztribúcióval, amelyiket e vizsgálatokban célszerű

$$1(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0, \end{cases}$$

szerint értelmezni. Az „1” felület bármely pontjáról a teljes fél-éggömb, azaz a megadott teljes (Θ, Φ) tartomány látszik, tehát



5. ábra. A „2” felület gerjesztettségének a számításához. $dA_1(y)$ -ből nézve az égboltnak csak a $B(x)$ és $C(x)$ közé eső részét látjuk, s a Nap helyzetétől függően $B(x)$ vagy $C(x)$ takarhatja a Napot is

$$dP_1 = \int_{-\pi}^{+\pi} \times \int_0^{\pi/2} [L_0 \cdot \delta(\Theta_0, \Phi_0) + L_\xi] (dA_1 \cdot \cos\Theta) \cdot \sin\Theta \cdot d\Theta \quad (3)$$

(3)-ből az integrálok kifejtésével az $E = dP/dA$ gerjesztés megkapható, és így az „1” felület közvetlen gerjesztése

$$E_{1k} = L_0 \cos\Theta_0 \cdot 1\left(-\frac{\pi}{2} - \Theta_0\right) + \pi L_\xi$$

Hasonló gondolatmenettel — végül is szintén közismert módon — kaphatjuk meg a többi („2”, „3” és „4”) részfelület közvetlen gerjesztését is, csak figyelembe kell venni, hogy a barázda kontúrvonalai az égbolt kisebb-nagyobb részét kitakarják; illetve a felületek egyes részéről nézve a kontúr vonalak takarják a Napot, azaz ezek a felületek árnyékban vannak. Például a „2” felület esetén a geometriai viszonyokat az 5. ábrán láthatjuk. A (3)-mal analóg egyszerű számításokat nem részletezzük. Az így adódó összefüggések azért előnyösek, mert minden további manipuláció nélkül, automatikusan tartalmazzák az árnyékhatast is; s igen egyszerűen általánosíthatók változó égbolt-fény eloszlás esetére. Mivel x -irányban végtelen, homogén felszínmodellét vizsgálunk, a „2” felület gerjesztése y -től, a „3” és „4” felületé pedig z -től függ csak, azaz

$$E_{2k} = E_{2k}(y), \quad E_{3k} = E_{3k}(z) \quad \text{és} \quad E_{4k} = E_{4k}(z)$$

Állandó égbolt-fény esetén, ha (1) érvényes, az adódó integrálok zárt alakban kifejezhetők, míg $L_\xi = L_\xi(\Theta, \Phi)$ esetén általában numerikus integrálást kell végezni.

3.2 A felületek közvetlen egymásra átsugárzásának a hatása

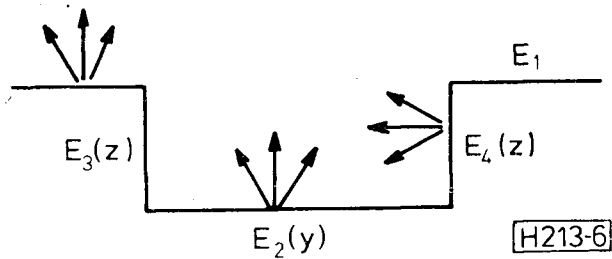
A barázda-modell felületelemeire (síkjaira) tett feltevéseink szerint a beeső energia g -szorosát Lambert-féle sugárzó módjára verik vissza a felettük elterülő féltérbe (6. ábra). Mivel a dA felületelemre beeső gerjesztés $dP_{be} = E(\zeta) \cdot dA$, a reflexió következtében kialakuló teljesítménysűrűség eloszlás

$$\frac{d^2P_r}{dAd\Omega} = \frac{\rho}{\Pi} E(\zeta) \quad (4)$$

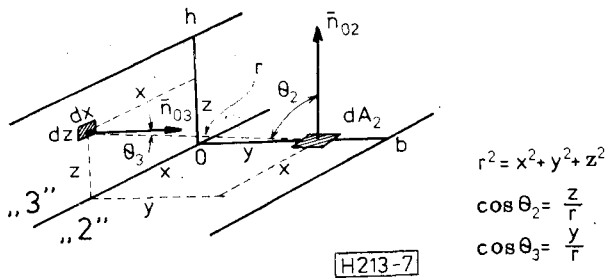
A vizsgált felület helyzetétől függően ennek egy része a szomszédos felületelemeket világítja meg (6. ábra). Az átsugárzás egy konvergens „reflexió-sorozat” eredményeként egyensúlyi megvilágított-sági állapotot alakít ki. (E tranziens-analízissel nem foglalkozunk, mivel vizsgálatainkban a stationer állapotot használjuk fel.) Így a felületek (stationer) gerjesztettsége

$$E(\zeta) = E_k(\zeta) + E_A(\zeta), \quad (5)$$

ahol $E_A(\zeta)$ az átsugárzásból eredő komponens, míg $E_k(\zeta)$ a 3.1 pontból ismert közvetlen gerjesztés. Ebben a vizsgálatban — mint már hangsúlyoz-



6. ábra. A közvetlen átsugárzás értelmezéséhez



7. ábra. A „3” → „2” átsugárzás számításának geometriai elrendezése

tuk — $E_A(\zeta)$ -ban elhanyagoljuk az azonos síkba eső elemek légköri visszaszórással történő átsugárzását, a barázdába „beülő” esetleges légköri inhomogenitások, pára stb. hatását... Ezek egy pontosabb modellben $E_A(\zeta)$ -ba beépíthetők. Most azonban csak a közvetlen átsugárzást kívánjuk vizsgálni azt vesszük figyelembe.

A 6. ábrából is látható, hogy az „1” felületre a másik háromból közvetlen átsugárzás nem érkezik, így

$$E_1 = E_{1k} = L_0 \cos \Theta_0 \cdot i \left(\frac{\pi}{2} - \Theta_0 \right) + \pi L_\epsilon \quad (6)$$

Ugyanakkor a másik három felület kölcsönösen átsugározz egymásra. A stacioner állapot meghatározására a „self consistent field” módszert [pl. 20] alkalmazhatjuk, azaz az

$$\begin{aligned} E_2(y) &= E_{2k}(y) + [E_{A23}(y) + E_{A24}(y)] \\ E_3(z) &= E_{3k}(z) + [E_{A32}(z) + E_{A34}(z)] \\ E_4(z) &= E_{4k}(z) + [E_{A42}(z) + E_{A43}(z)] \end{aligned} \quad (7)$$

egyenletrendszerből határozhatjuk meg, ahol $E_{Aij}(\zeta)$ a „j” felületről az „i” felületre átsugárzott gerjesztést adja meg. (A számítás menete egyébként triviálisan egyszerű, s a 7. ábrán példával illusztrált geometriai viszonyokat kell figyelembe venni.)

Megjegyezzük, hogy a számítás menete és az alapvető megfontolások bonyolultabb esetekben is — helyfüggő ρ , nemlamberti reflexió az elemi felületeken, nem-sík felületekből álló profil stb. — érvényesek, csak az eredmények formailag bonyolultabbak lesznek.

A részletszámítások elvégzése után (7) az alábbi alakot ölti:

$$\begin{aligned} E_2(y) &= E_{2k}(y) + \frac{\rho}{2} \times \\ &\times \left[y \int_0^h E_3(z) \frac{z}{z^2 + y^2} dz + (b-y) \times \right. \\ &\times \left. \int_0^h E_4(z) \frac{z}{z^2 + (b-y)^2} dz \right] \\ E_3(z) &= E_{3k}(z) + \frac{\rho}{2} \times \\ &\times \left[z \int_0^b E_2(y) \frac{y}{y^2 + z^2} dy + b^2 \times \right. \\ &\times \left. \int_0^h E_4(\zeta) \frac{1}{b^2 + (z-\zeta)^2} d\zeta \right] \quad (8) \\ E_4(z) &= E_{4k}(z) + \frac{\rho}{2} \times \\ &\times \left[z \int_0^b E_2(y) \frac{b-y}{(b-y)^2 + z^2} dy + b^2 \times \right. \\ &\times \left. \int_0^h E_3(\zeta) \frac{1}{b^2 + (z-\zeta)^2} d\zeta \right] \end{aligned}$$

A (8) integrálegyenlet-rendszer általában csak numerikusan oldható meg, s az $E_i(\zeta)|_0 = E_{ik}(\zeta)$ kezdőértékkel indított szukcesszív approximáció konvergens.

(8)-ból már jól látható, hogy a közvetlen átsugárzás hatását még sötét talajok — $\tilde{\rho} \cong 0,05 \div 0,2$ — esetén sem célszerű elhanyagolni. Világosabb felszíneknél — $\tilde{\rho} \cong 0,2 \div 0,6$ — szerepe összemérhető a közvetlen napsugárzásból adódó gerjesztéssel, nem is beszélve a havas, jeges felszínekről. Megítélésünk szerint az optikai és IR sávban feltétlenül figyelembe veendő, de úgy tűnik, hogy az MW sávban sem hanyagolható el.

3.3 A mérési irányban mutatkozó $\tilde{\rho}_M$

Határozzuk meg ezután a mérési irányban (látóirányban) a felületről visszasugárzott teljesítmény viszonyát egy totálisan reflektáló ($\tilde{\rho} = 1$), azonos méretű, Lambert-i sík által ugyanabban az irányban visszavert teljesítményhez (8. ábra). „Megfigyelt” felületelemnek az $A_D = (a+b) \cdot 1$ felületet tekintjük, s a valódi pixel által lefedett teljes felszíndarab ilyen A_D -elemekből összerakható. A látóirányból észlelt felület-méret így $A_{DM} = (a+b) \cdot$

$\cos \Theta_M$. Ha az A_D sík $\tilde{\rho} = 1$ teljes reflexióval Lambert-i módon reflektálnia változatlan megvilágítás, azaz (6)-nak megfelelő gerjesztettség mellett, akkor a (Θ_M, Φ_M) irányba visszavert teljesítmény

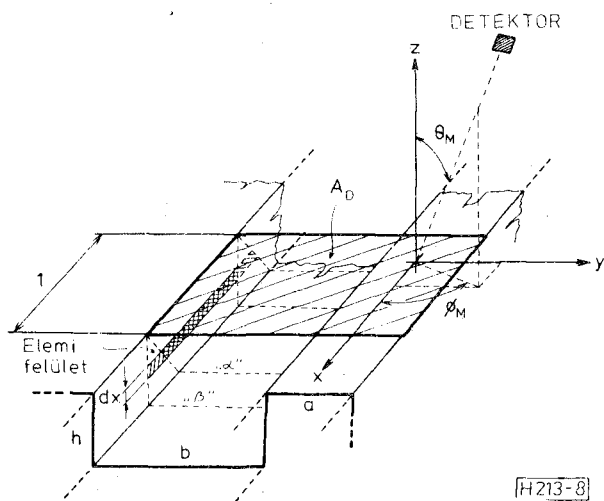
$$P_T = \frac{A_D}{\pi} \cos \Theta_M \cdot \left[L_0 \cdot \cos \Theta_0 \cdot i \left(\frac{\pi}{2} - \Theta_0 \right) + \pi L_\epsilon \right] \quad (9)$$

lenne. E helyett P_M -et mérünk, tehát

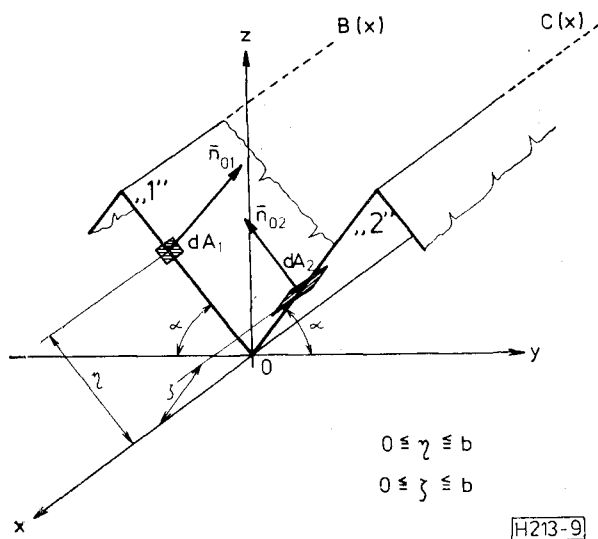
$$\tilde{\rho}_M = \frac{P_M}{(a+b) \cdot \cos \theta_M \left[L_0 \cos \theta_0 \cdot 1 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) + \pi L_0 \right]} \quad (10)$$

a keresett reflektancia. P_M számításához $E_i(\zeta)$ ismert — (6) és (8) —, de változik a műszer által az egyes részfelületekből látott darabok nagysága. Az egyes részfelületek láthatóságának geometriai tárgyalása szintén egyszerű feladat. Ennek elvégzés után az átlagreflektancia

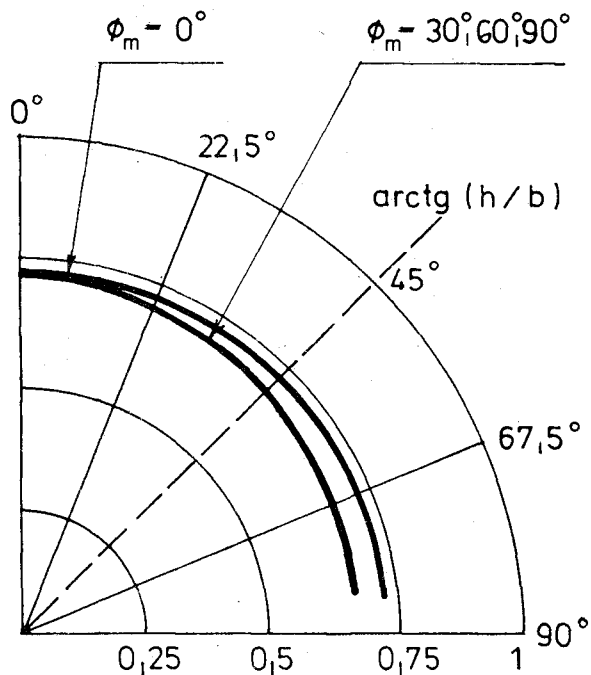
$$\tilde{\rho}_M = \frac{\tilde{\rho} \cdot 1 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_M \right)}{(a+b) \cdot \cos \theta_M \left[L_0 \cos \theta_0 \cdot 1 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) + \pi L_0 \right]} \times$$



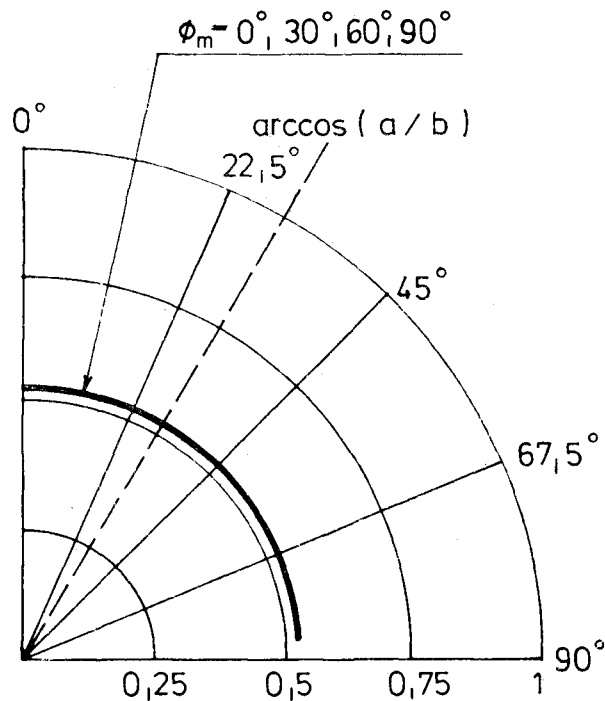
8. ábra. A felszíni átlagreflexió értelmezéséhez. Elemi úton belátható, hogy a modell x -irányú homogenitása következtében a látott A_D felületet kiadó „ α ”-kontúr ez esetben „ β ”-val helyettesíthető



9. ábra. Az egyenlőszárú-háromszög modell számításánál a geometriai viszonyok

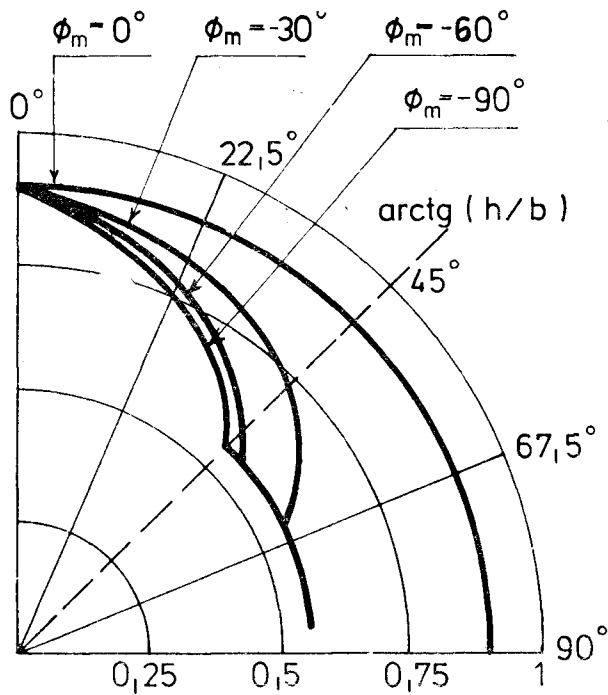


H213-10a

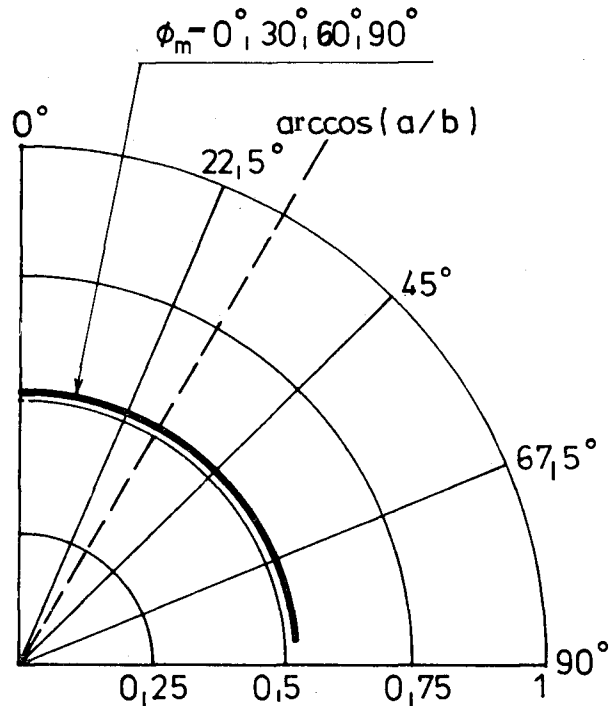


H213-10b

10. ábra. Árnyékban lévő ($\theta_0 > \pi/2$) felszín viselkedése a kétféle modell alapján. A négyszög-modell gyengén anizotróp, míg a háromszög-modell izotróp viselkedést mutat. Tényleges mérésben tehát gyenge anizotrópiára kell számítanunk. a) Négyszög-modell. b) Háromszög-modell



H213-11a



H213-11b

11. ábra. Barázdamodell viselkedése zeniten álló Nap esetén, azaz $\Theta_0=0^\circ$. Az anizotróp viselkedés már szembeszökő. a) Négyszög-modell. b) Háromszög-modell

$$\begin{aligned} & \times \left\{ \cos \Theta_M \cdot \left[a E_1 + \int_{y_{21}}^{y_{22}} E_2(y) dy \right] + \sin \Theta_M \sin \Phi_M \times \right. \\ & \left. \times \left[1(\Phi_M) \int_{z_{31}}^{z_{32}} E_3(z) dz - 1(-\Phi_M) \int_{z_{41}}^{z_{42}} E_4(z) dz \right] \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

ahol y_{21} és y_{22} a „2” felület, z_{31} és z_{32} a „3” felület, z_{41} és z_{42} a „4” felület láthatósági határa a műszer irányából nézve. (11) alapján nyilván való, hogy a barázdált felszín akkor sem Lambert-féle reflektor, ha az elemi felületek Lambert-i módon viselkednek.

4. Az egyenlőszárú-háromszög keresztmetszetű barázdá-modell

A számítás menete pontosan megegyezik a 3. pontban látottakkal, csak a geometria más (9. ábra). A beeső sugárzást is ugyanúgy (1) szerint választjuk. A 3.1 és 3.2 pontokban látottakkal pontosan megegyező megfontolások után adódik a (7)-tel analóg

$$\begin{aligned} E_1(\eta) &= E_{1k}(\eta) + E_{A_{12}}(\eta) \\ E_2(\zeta) &= E_{2k}(\zeta) + E_{A_{21}}(\zeta) \end{aligned} \quad (12)$$

egyenletrendszer. (12) látszólag egyszerűbb szerkezete nem jelent érdemi egyszerűsödést a 3. ponthoz képest sem analitikailag, sem numerikusan. A részletszámítások elvégzése után

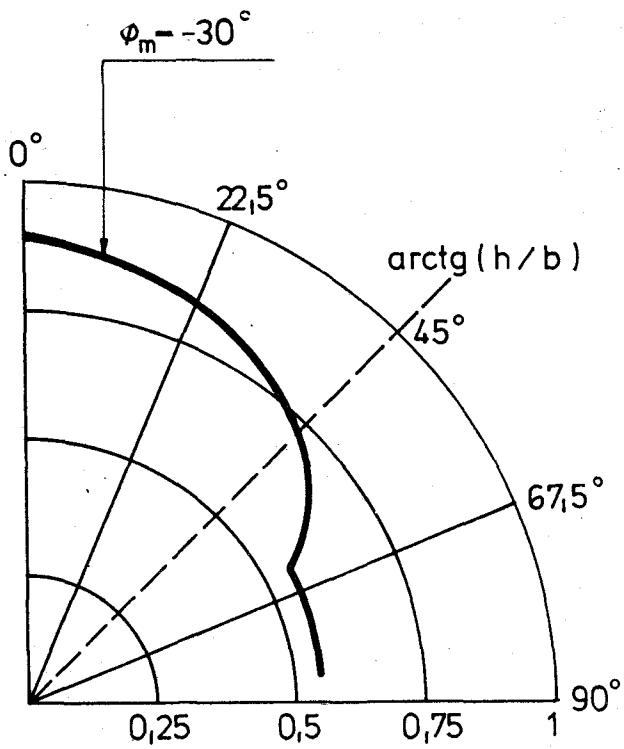
$$\begin{aligned} E_1(\eta) &= E_{1k}(\eta) + \frac{\tilde{\rho}}{2} \eta \sin^2 2\alpha \int_0^b E_2(\zeta) \times \\ & \times \frac{d\zeta}{\eta^2 + \zeta^2 + 2\eta\zeta \cos 2\alpha} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} E_2(\zeta) &= E_{2k}(\zeta) + \frac{\tilde{\rho}}{2} \zeta \sin^2 2\alpha \int_0^b E_1(\eta) \times \\ & \times \frac{d\eta}{\eta^2 + \zeta^2 + 2\eta\zeta \cos 2\alpha} \end{aligned}$$

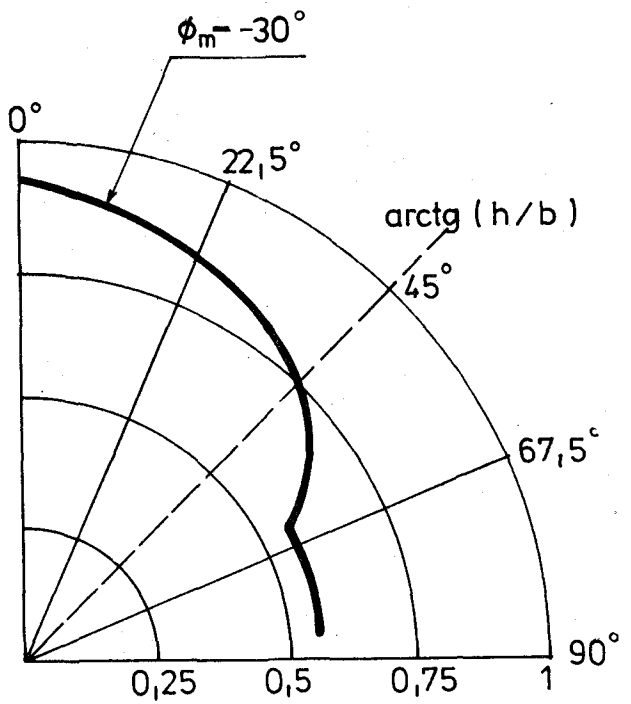
A (13) egyenlet (8)-hoz hasonlóan szukcesszív approximációval jól kezelhető, míg invertálását (legalább is pillanatnyilag) ennek sem tudtuk megoldani.

$\tilde{\rho}_M$ meghatározásakor az átlagoláshoz a „megfigyelt” felületet a 8. ábrán láthatóval analóg módon választjuk meg, amikor is — a 9. ábrát is figyelembe véve — $A_D = 2a \cdot 1$ és $A_{DM} = 2a \cdot \cos \Theta_M$. Az átlagreflektancia pedig

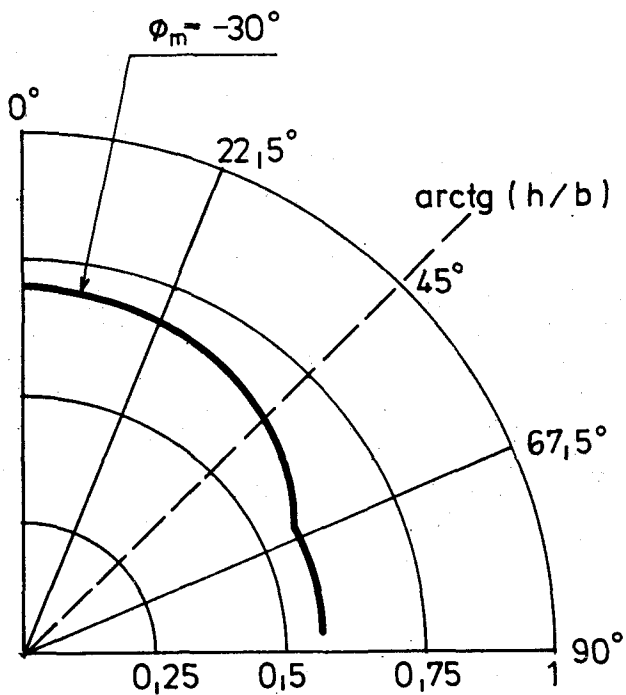
$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_M &= \frac{\tilde{\rho} \cdot 1 \left(\frac{\pi}{2} - \Theta_M \right)}{2a \cos \Theta_M \left[L_0 \cos \Theta_0 1 \left(\frac{\pi}{2} - \Theta_0 \right) + \pi L_i \right]} \times \\ & \times \left\{ i \left(\frac{\pi}{2} - \Theta_{M1} \right) \cos \Theta_{M1} \int_{\eta_n}^{\eta_{12}} E_1(\eta) d\eta + 1 \left(\frac{\pi}{2} - \Theta_{M2} \right) \times \right. \\ & \left. \times \cos \Theta_{M2} \cdot \int_{\zeta_{21}}^{\zeta_{22}} E_2(\zeta) d\zeta \right\}, \end{aligned} \quad (14)$$



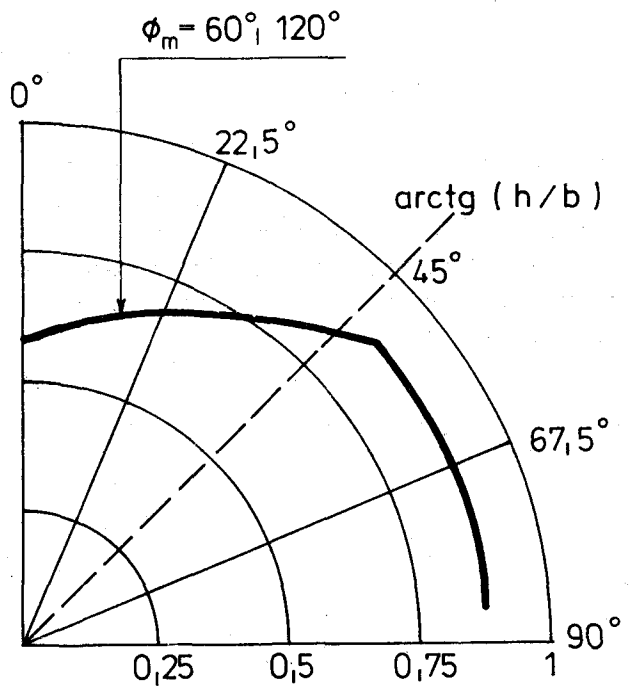
H213-12a



H213-12b

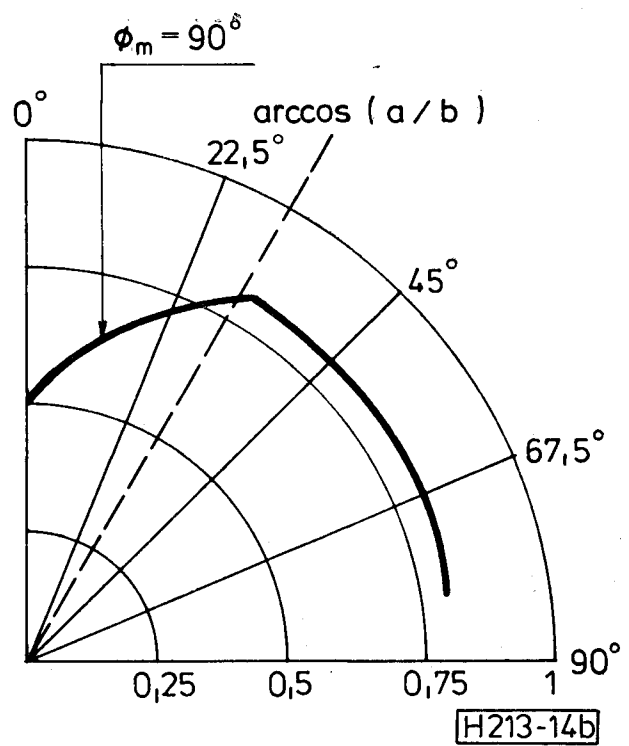
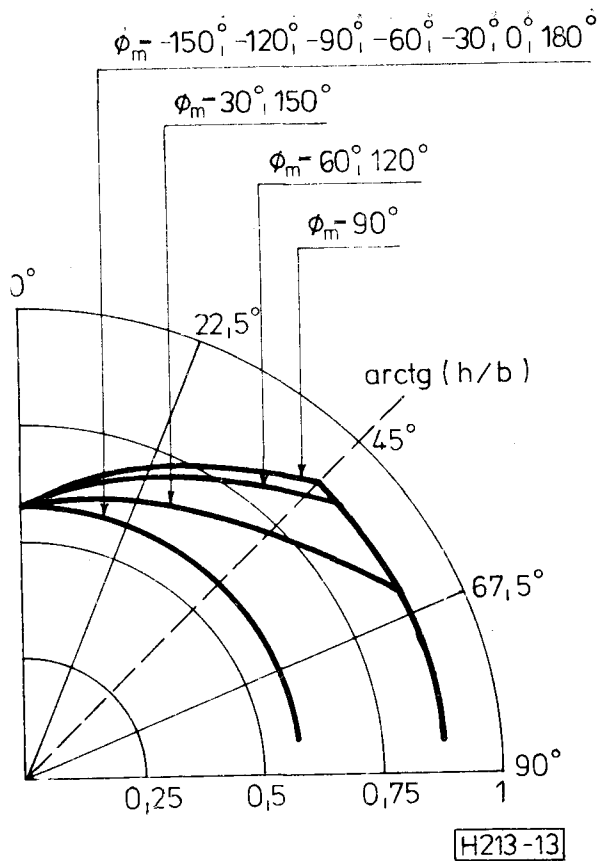


H213-12c

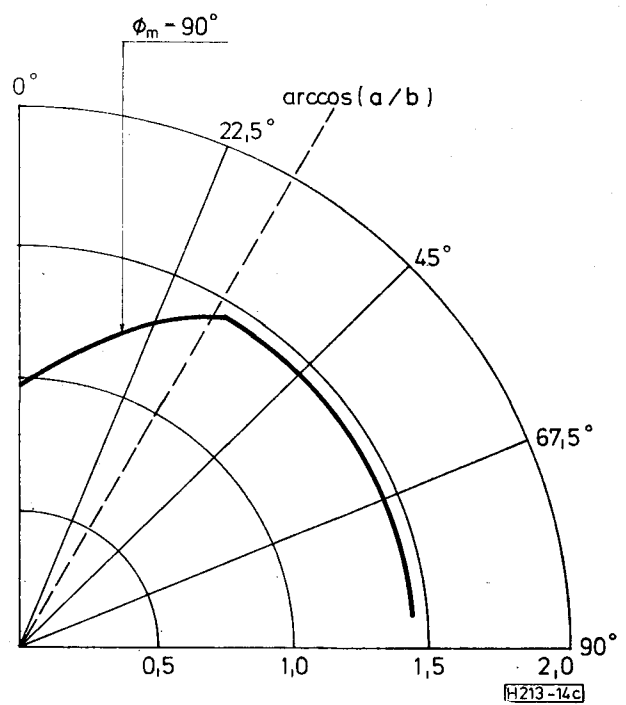
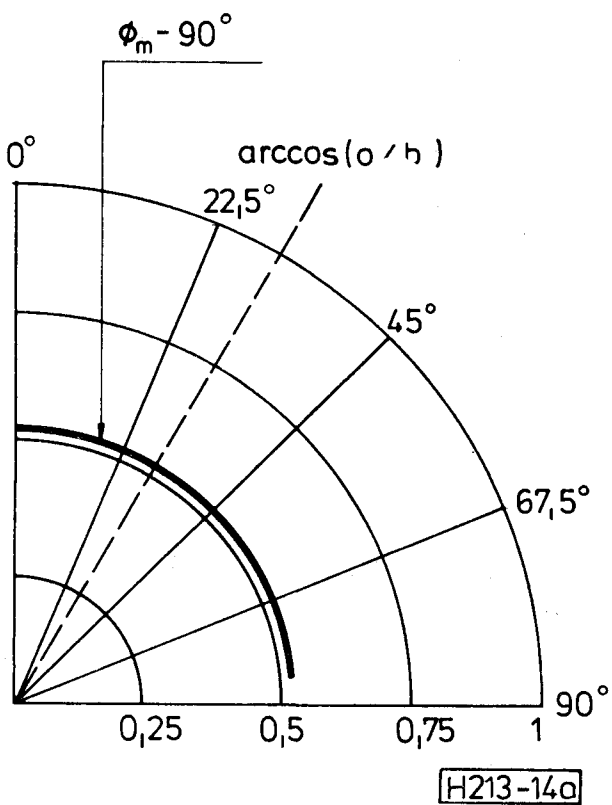


H213-12d

12. ábra. Négyzögkeresztmetszetű barázda-modell viselkedése változó megvilágítási irány mellett, miközben $\Phi_m = -30^\circ$. A Nap helyzete: a) $\Theta_0 = 0^\circ$, Φ_0 tetszőleges. b) $\Theta_0 = 30^\circ$, $\Phi_0 = 0^\circ$. c) $\Theta_0 = 30^\circ$, $\Phi_0 = 90^\circ$. d) $\Theta_0 = 45^\circ$, $\Phi_0 = 90^\circ$



13. ábra. Négyzetkeresztmetszetű barázda-modell viselkedése változó műszer-pozíció (látóirány) esetén. A Nap helyzete $\Theta_0=45^\circ$, $\Phi_0=90^\circ$, azaz a megvilágítási irány merőleges a barázdairányra



14. ábra. Háromszögkeresztmetszetű barázda-modell viselkedése változó megvilágítási irány mellett, miközben $\Phi_m=90^\circ$. A Nap helyzete: a) $\Theta_0=0^\circ$, Φ_0 tetszőleges. b) $\Theta_0=25^\circ$, $\Phi_0=90^\circ$. c) $\Theta_0=60^\circ$, $\Phi_0=90^\circ$. Ez utóbbi esetben Θ_m csökkenésével a kifényesedés olyan erős, hogy $\tilde{\rho}_M/\tilde{\rho} > 1$ áll elő, s ezért az ábrán kétszeres léptékváltás található!

ahol η_{11} és η_{12} az „1” felület, ζ_{21} és ζ_{22} a „2” felület láthatósági határa a műszer irányából nézve; Θ_{M1} és Θ_{M2} a műszer látóirányának az \bar{n}_{01} illetve \bar{n}_{02} normálisokkal bezárt szöge.

(11) és (14) alapján általánosabban is kimondhatjuk, hogy a barázdált vagy göröngyös felszín, a domborzat, az egyenetlen magasságú növényzet stb. — azaz az árnyékot is tartalmazó felszín nemlamberti sugárzó, s viselkedésében a közvetlen átsugárzás fontos szerepet játszik.

5. Diskusszió

Bár a 3. és 4. pontokban leírt (igen egyszerű) barázda-modellek eredő energiaeloszlását leíró csatolt integrálegyenlet rendszert invertálni nem sikerült, numerikusan meg lehetett oldani elég egyszerűen. Így a (Θ_M, Φ_M) irányban visszavert energia és $\tilde{\rho}_M(\Theta_M, \Phi_M; \Theta_0, \Phi_0; \varrho)$ is számolható. A teljes program pl. BASIC-nyelven megírva kisméretű PC-ben is futtatható. Bemenő adatnak az $L_0, L_e, \Theta_0, \Phi_0, \varrho$ és a, b, h paramétereket tekintettük, s eredményként $\tilde{\rho}_M$ -et jelenítettük meg. A megjelenítésnél a

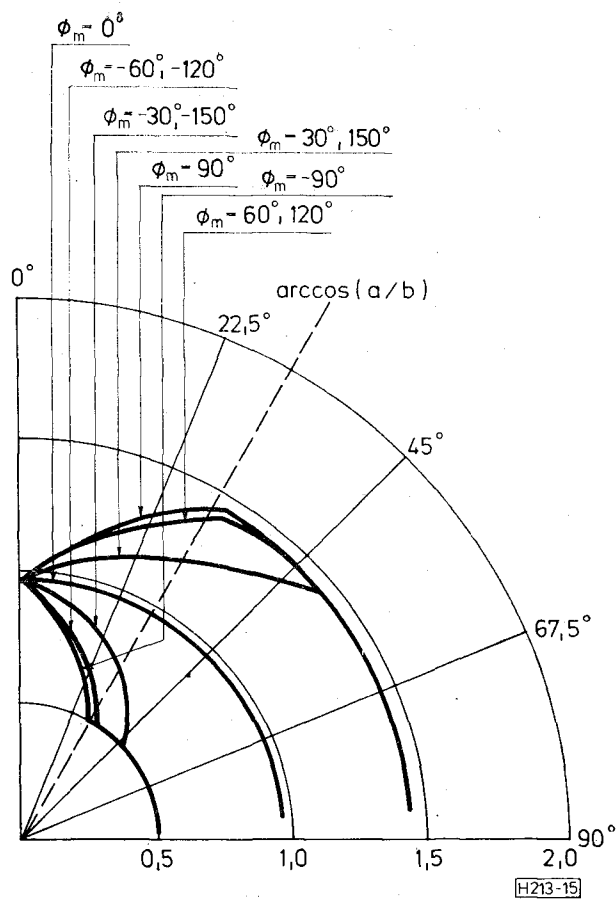
$$\frac{\tilde{\rho}_M(\Theta_M) | \Phi_M = \text{const}}{\tilde{\rho}} \equiv RO \langle TH_m, FI_m \rangle / RO \quad (15)$$

görbékét rajzoltattuk fel a $\Phi_M \equiv FI_m$ paraméter léptetésével. A következőkben bemutatandó ábrákon az $a=b=h=1$ négyzetkeresztmetszetű és az $a=0,5; b=1$ egyenlő oldalú háromszög keresztmetszetű barázdákra vonatkozó adatok szerepel-

nek $L_0=1$ és $\tilde{\rho}=0,2$ paraméterek mellett. (A $\tilde{\rho}=0,2$ jó tájékozódást tesz lehetővé a magyarországi művelt talajok többsége esetén.) Az égboltfényesség általában $L_e=0,1$, de bemutatjuk L_e változásának — $L_e=0,3$ — a hatását is.

Már a levezetett összefüggésekből — (29) és (41) — is láttuk, hogy a visszavert sugárzás nagyfokú anizotrópiát mutat. Ezt a modellel végzett numerikus vizsgálatok messzemenően megerősítették. Részletesebben elemezve: Árnyékban lévő, csak L_e által megvilágított felszín a háromszögmodell esetén izotróp, a négyzetmodell esetén kvázi-izotróp (gyengén anizotróp) mutatkozik — 10. ábra. A pontosan a zeniten ($\Theta_0=0^\circ; \Phi_0$ tetszőleges) álló Nap esetén még elegendően szimmetrikusak a megvilágítási viszonyok. — 11. ábra. — Ekkor a háromszögmodell még izotróp marad, mivel az „1” és „2” felület megvilágítottsága szigorúan megegyezik, az egyenlőszárú háromszög feltételezés miatt. A négyzetmodell már erősen anizotróp mind Θ_M , mind Φ_M függvényében. Egyéb megvilágítási irányok esetén az anizotrópia mértéke nagyon megnő — 12.—15. ábrák. Külön is érdemes kimondani, hogy az árnyékban lévő felszín *nem* tekinthető sötétnek (10. ábra).

Az anizotrópia nagymértékben függ mind a megvilágítási iránytól, mind a látóiránytól. A 12. ábrán a négyzetmodell viselkedését láthatjuk azonos látóirány mellett változó Nap-irányoknál, míg a 13. ábrán a Nap helyzete állandó és a látóirány változik. A háromszögmodell viselkedését



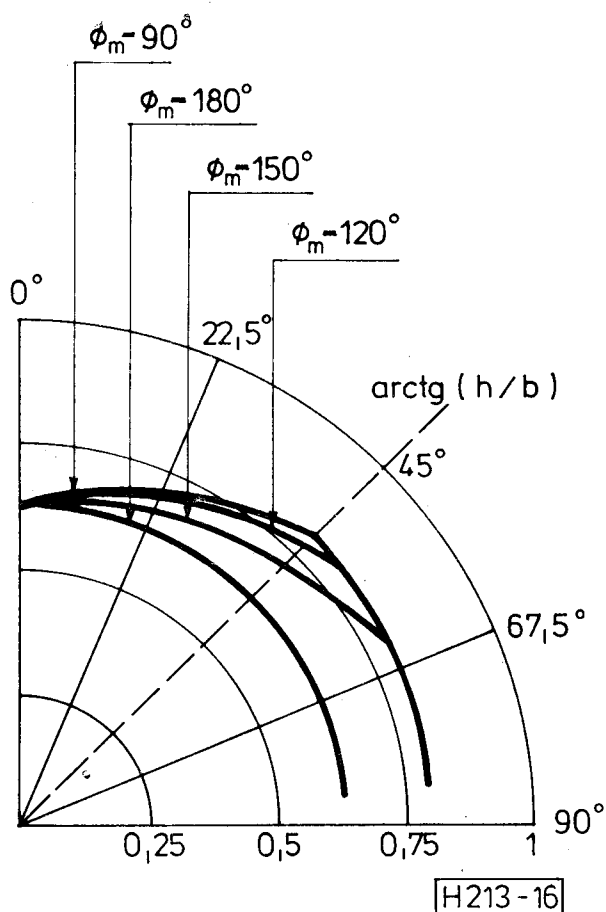
15. ábra. Háromszögkeresztmetszetű barázda-model viselkedése változó műszer pozíció (látóirány) esetén. A Nap a barázdairányra merőlegesen világít, azaz $\Theta_0=60^\circ, \Phi_0=90^\circ$. Az erős kifényesedés miatt a $30^\circ \approx \Phi_M \approx 150^\circ$ ábrákon $\tilde{\rho}_M/\tilde{\rho} > 1$ értékek is fellépnek

analóg paraméterváltozás mellett a 14. és 15. ábrák mutatják.

A barázdafalak közvetlen átsugárzása igen lényeges az eredő energiaeloszlás kialakulásában. Éppen ez az a legfontosabb tényező, amelyik esetenként a $\tilde{\rho}_M/\tilde{\rho} > 1$ értékek kialakulásához is vezet. (Természetesen a konkrét értékek kialakulásában szerepe van a profil részfelületének a látóirányhoz képest eltérő helyzeteinek is.) — 15. ábra. Ugyanakkor figyelemre méltó, hogy a szórt fény arányának a növekedése a közvetlen napfényhez képest a megvilágítottság anizotrópiájának a csökkenése révén a felszín anizotróp viselkedését enyhíti — 16. ábra.

Megállapíthatjuk, hogy a megvilágítási viszonyok illetve a megfigyelési iránytól is függő mértékben a reflektancia Θ_M növekedésével növekedhet is, csökkenhet is ebben az egyszerű geometriájú, nagyon szabályos modellben (pl. 15. ábra). Fel kell figyelni arra, hogy a modell az (x, z) -síkhöz képest a Nappal megegyező térfélből végzett megfigyelések esetén növekvő Θ_M mellett

kifényesedést ($\tilde{\rho}_M/\tilde{\rho}$ növekedését) adja. Ez megegyezik a szántott felszíneknél tapasztaltakkal (pl. 17. ábra). Ugyanezek az eredmények egyben magyarázzák a Nap irányából (az északi féltéken



16. ábra. Négyzögkeresztmetszetű barázda-modell viselkedése változó (relatív) égboltfény esetén. A Nap iránya $\theta_0=45^\circ$, $\Phi_0=90^\circ$, a) $L_e=0,1$, — lásd a 13. ábrát; b) $L_e=0,3$

a délies jellegű irányokból) végzett megfigyelésekben növekvő Θ_M esetén tapasztalt kifényesedést. A modellt általánosítva nem ennyire szigorú geometria szerkezetekre, várható, hogy a növekvő Θ_M esetén tapasztalható általános talajkifényesedésre is magyarázatot kapunk.

Úgy tűnik, hogy a fentiekén túlmenően a közvetlen átsugárzás hatását nem szabad elhanyagolni sem szabdalt, hegyes vidék (különösen csupasz felszínű vagy világos növényzettel borított hegyek-dombok) adatai értékelésénél illetve felhők (különösen magasabb vagy tornyos gomolyfelhők) napsütötte oldalához közeleső pixelek — 1. ábra — reflexiós értékei meghatározásánál stb. Azonban ekkor a keresztbesugárzási út hosszabb, ezért a vastagabb légréteg hatásait is számításba kell venni.

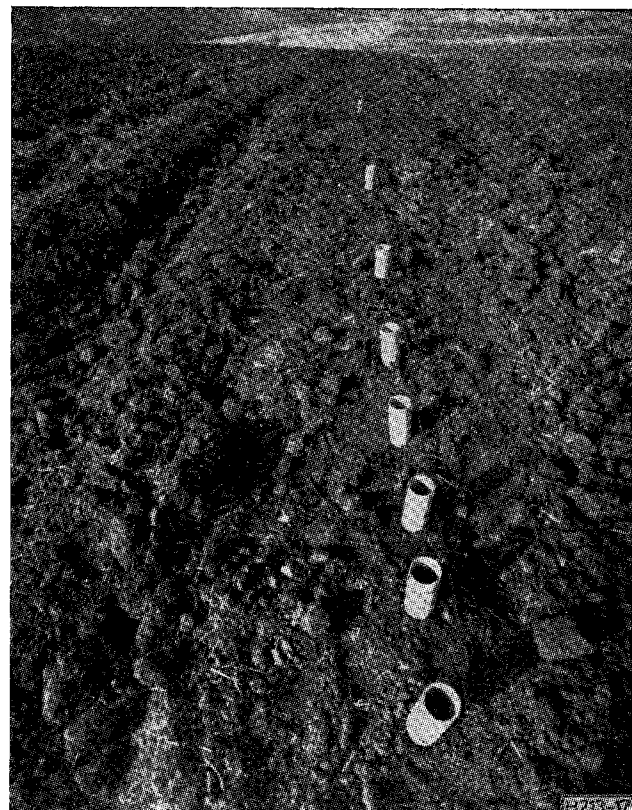
Köszönet: Ez úton is köszönetet mondunk Szilágyi Andrea tud. munkatársnak a munkánkat segítő kooperációért.

A cikkben leírt kutatást az ELTE Geofizikai Tanszékén végeztük a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával, alkalmazási részeiben a Földmérési Intézzel kötött szerződés keretében.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Guyot G. (1982): Principales Conclusions du Colloque International „Signatures Spectrales D'Objects

- én Teledetection”; in: Signatures Spectrales D'Objects en Teledetection, 345—354, Toulouse.
- [2] Diner D. J., Martonchik J. V. (1984): Atmospheric Transfer of Radiation above an Inhomogeneous Non-Labertian Reflective Ground — I. Theory; J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer, 31, 97—125.
- [3] Pfeiffer B. (1982): Untersuchung des richtungsabhängigen Strahlungsverhaltens in multispektralen Abtastdaten; Bildmessung und Luftbildwesen; 50, 35—47.
- [4] Holben B. N., Justice Ch. O. (1980): Topographic Effect on Spectral Response from Nadir-Pointing Sensors; Phot. Eng. and Rem. Sens., 46, 1191—1200.
- [5] Teillet P. M., Guindon B., Goodenough G. G. (1982): On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data; Canadian J. of Rem. Sens., 8, 84—106.
- [6] Kowalik W. S., Lyon R. J., Switzer P. (1983): The Effects of Additive Radiance Terms on Ratios of Landsat Data; Phot. Eng. and Rem. Sens., 49, 659—669.
- [7] Idso S. B., Jackson R. D., Reginato R. J., Kimbrell B. A., Nakayama F. S. (1975): The Dependence of Bare Soil Albedo on Soil Water Content; J. Appl. Met., 14, 190—113.
- [8] Tanre D., Herman M., Deschamps P. Y., de Loffe A. (1979): Atmospheric Modeling for Space Measurements of Ground Reflectances, Including Bidirectional Properties; Appl. Optics, 18, 3587—3594.
- [9] Tanre D., Herman M., Deschamps P. Y. (1981): Influence of the Background Contribution upon Space Measurements of Ground Reflectance; Appl. Optics, 20, 3676—3684.
- [10] Deschamps P. Y., Herman M., Lenoble J., Tanre, D., Viollier M. (1980): Atmospheric Effects in



17. ábra. Felszántott terület barázdára közel merőleges megvilágítás esetén. (FÖMI, Szilágyi Andrea felvétele.) Növekvő Θ_M -nél a $\Phi_M \sim \Phi_0$ irányban erős kifényesedés, a $\Phi_M \sim \pi + \Phi_0$ térfélben elsötétülés látható — a 15. ábrával összhangban

Remote Sensing of Ground and Ocean Reflectances; Rem. Sens. of Atm. and Oceans, 115-148, Academic Press.

- [11] *Otterman J., Ungar S., Kaufmann Y., Podolak M.* (1980): Atmospheric Effects on Radiometric Imaging from Satellites under Low Optical Thickness Conditions; Rem. Sens. Env., 9, 115—129.
- [12] *Ghhikkara R. S.* (1984): Effect of Mixed (Boundary) Pixels on Crop Propagation Estimation; Rem. Sens. Env., 14, 207—218.
- [13] *Slater P. N.* (1980): Remote Sensing: Optics and Optical Systems; Addison-Wesley, Reading, Mass.
- [14] *Ferencz Cs., Ferenczné Árkos I., Hamar D., Lichtenberger J., Tarosai Oy.* (1984): Ferde talajfelszín viselkedésének vizsgálata; tanulmány ELTE GEO-EXP.
- [15] *Richardson A. J., Wiegand C. L., Gaussman H. W., Guellar J. A., Gerbermann A. H.* (1975): Plant, Soil and Shadow Reflectance Components

of Row Crops; Phot. Eng. and Rem. Sens. 41, 1401—1407.

- [16] *Suits G. H.* (1983): Extension of a Uniform Canopy Reflectance Model to Include Row Effects; Rem. Sens. Env., 13, 113—129.
- [17] *Kimes D. S.* (1983): Remote Sensing of Row Crop Structure and Component Temperatures Using Directional Radiometric Temperatures and Inversion Techniques; Rem. Sens. Env., 13, 33—55.
- [18] *Otterman J.* (1977): Monitoring Surface Albedo Change with Landsat; Geoph. Res. Lett., 4, 441—444.
- [19] *Otterman J., Robinove G. J.* (1983): Landsat Monitoring of Desert Vegetation Growth, 1972—1979 Using a Plant-Shading Model; Adv. Space Res., 2, 45—50.
- [20] *Ferencz Cs., Ferenczné Árkos I.* (1982): Fizika I—II, A távérzékelésben fontos elektromágneses hullámterjedési jelenségek alapjai; BME Mérnöki Továbbképző Intézet, M 323—324, Budapest.