

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

Ll. évfolyam

10. szám

2001. október

FELHŐÉSZLELÉS A FÖLDRŐL 180° LÁTÓSZÖGŰ KÉPALKOTÓ POLARIMETRIÁVAL

Barta András, Horváth Gábor, Gál József, Suhai Bence, Haiman Ottó
Eötvös Egyetem, Biológiai Fizika Tanszék

Habár a légkörfizikusok és meteorológusok a Föld felhőzettségének mértékét, mint az éghajlati modellek egyik legfontosabb bemeneti paraméterét többnyire űrfelvételekből határozzák meg, számos esetben merül fel annak igénye is, hogy egy adott földrajzi helyen a felhőzettség fokát a földfelszínről becsüljék meg valamilyen módszerrel. Ezt sok meteorológiai észlelőállomáson még manapság is vizuális becsléssel végzik a tapasztalt megfigyelők, akik az égbolt felhőfedettségét nyolcadokban adják meg. Mindezen túl sokszor szükséges a helyi időjárási viszonyok pontos földi meghatározása is, aminek egyik fontos eleme a felhőzettség becslése. Ilyen esetekben is legtöbbször emberek végzik a megfigyelést, ami a szubjektív ítéletből következő hibákkal és ellentmondásokkal terhes. További hátránya e vizuális módszernek, hogy a megfigyelő személyzet fizetéséről is gondoskodni kell, amire a szegényebb országok általában is szűkösebb költségvetési kerettel gazdálkodó meteorológiai szolgáltatásainál kevés a pénz.

E problémákra jelentenek megoldást azok a meteorológiai eszközök, amelyek bizonyos korlátok között képesek mérni a napsütéses órák számát és detektálni az égbolt felhőmintázatát, amiből számítani lehet az égbolt borultságának fokát. A legmodernebb meteorológiai állomásokon 180° látószögű, a teljes eget leképező optikával felszerelt digitális kamerával készített színes égboltfelvételek számítógépes kiértékelése útján jutnak a felhőzettségre vonatkozó információkhoz. A két legje-

lentősebb, felhődetektálásra is alkalmas berendezés egyike egy földi fotometrikus felhődetektor (TSI-880), a másik pedig egy néhai műholdas távérzékelő rendszer (POLDER), amely polarizációs felvételeket készített a Föld felszínéről és légköréről. Mindkét eszköz főbb jellemzőit a Függelékben foglaltuk össze. Az Országos Meteorológiai Szolgálat Siófoki Viharjelző Observatóriumában Horváth Ákos meteorológus épített egy halyszemoptikás digitális fényképezőgépet használó, a helyi égboltot monitorozó, egy meteorológiai torony tetején elhelyezett berendezést, amely alkalmas fotometrikus felhődetektáló szoftverrel ellátva a TSI-880-hoz hasonló rendszerre fejleszthető.

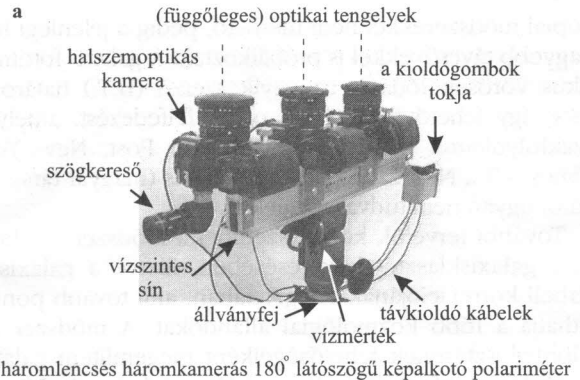
A POLDER-t nem földi használatra szánták. A földi telepítésű TSI-880 legnagyobb hátránya, hogy nem hordozható, mivel szüksége van egy jelentősebb áramforrásra és számítógépes kapcsolatra is, ami miatt általában alkalmatlan terepi mérésekre. Az általa használt felhőfelismerő algoritmus fotometrián alapszik, azaz az égboltfény intenzitása és színe alapján különbözteti el a felhőket a tiszta égbolttól. E felhődetektáló eljárás úgy fejleszthető tovább, megbízhatósága úgy növelhető, hogy az égboltfénynek a spektrum vörös, zöld és kék tartományában mért intenzitáseloszlásán (azaz színes fényképén) túl a polarizációfok és a polarizációs irány eloszlásának többletinformációját is felhasználja. Ehhez szükség van egy olyan polariméterre, amellyel az egész égbolt polarizációs mintázata mérhető.

Ilyen 180° látószögű képalkotó polarimétert fejlesztett ki North és Duggin [1] az égboltfény polarizációs paramétereinek meghatározására oly módon, hogy az égnek egy gömbtükrök alkotta tükörképét fényképezték le egy négylencsés kamerával, különböző áteresztési irányú lineáris polárszűrőkön át, s értékelték ki a fényképeket számítógéppel. Voss és Liu [2] egy cserélhető lineáris polárszűrővel ellátott, 180° látószögű halszemoptika és egy CCD-kamera felhasználásával épített egy képalkotó polarimétert, amellyel a teljes égbolt polarizációs mintázata határozható meg a kamerával a polárszűrő áteresztési irányának három eltérő állása mellett készített három égboltfelvétel számítógépes kiértékelése után. E polariméterek hátránya, hogy nem hordozhatóak, terepi mérésekre alkalmatlanok. Legutóbb három különböző állású lineáris polárszűrővel felszerelt, halszemoptikás fényképezőgépet használva Gál és társai [3], valamint Pomozi és társai [4] fejlesztettek ki egy hordozható, 180° látószögű képalkotó polarimétert, amellyel az egész égbolt polarizációs mintázata könnyen és gyorsan mérhető a terepen is.

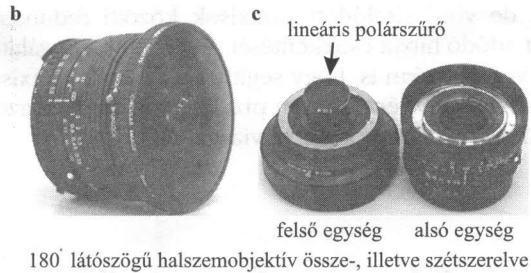
A szóban forgó, 180° látószögű halszemoptikát alkalmazó képalkotó polariméterek hátránya, hogy amennyiben az égen gyors változások történnek, például a felhők gyorsan mozognak, akkor nem lehet használni őket, mert a három égboltfelvétel az egyetlen halszemoptika és detektor miatt nem egyszerre, hanem egymás után, néhány másodperces késéssel készül, miközben a felhők elmozdulnak, ami meghamisítja a polarimetriát. A képalkotó polarimetria gyors fejlődése és a légköri optikabeli kényelmes alkalmazhatósága ellenére sem építettek még eddig olyan 180° látóterű hordozható képalkotó polarimétert, amellyel az egész égbolt polarizációs mintázatát könnyen és gyorsan lehet egyetlen méréssel meghatározni úgy, hogy az égbolt szükséges három polarizációs felvétele egyszerre készüljön el. Mi egy ilyen háromlencsés, háromkamerás, 180° látószögű ftopolarimétert fejlesztünk ki és alkalmaztunk az égbolt-polarizáció mérésére és felhők detektálására [5].

Háromlencsés, háromkamerás, 180° látószögű képalkotó polariméter

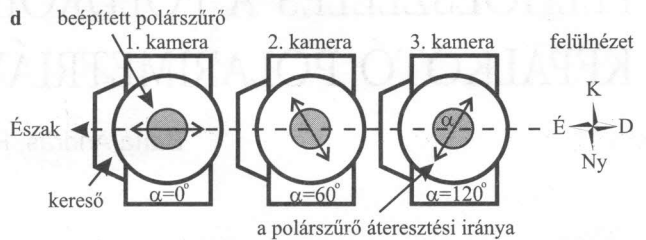
Polariméterünk (1. a ábra) három hagyományos (nem digitális) Nikon F801 típusú fényképezőgépből áll. Mind-egyik gépet egy Sigma márkájú halszemobjektívvel láttuk el (1. b ábra). Az objektívek fényereje $F = 4$, fókusztávolságuk $f = 8$ mm, látószögük 180° . A fényképezőgépek egy háromlábú állványra erősített vízszintes sínre vannak felszerelve; mérés közben a gépek keresőjét összekötő egyenes mindig észak felé mutat (1. d ábra), míg az optikai tengelyek függőlegesen fölfelé, a zenitre néznek (1. a ábra). Az egyik szélső gépen helyet kapott egy 90° -os szögkereső, aminek segítségével oldalról lehet belenézni a kamera keresőjébe, ezzel téve kényelmesebbé a beállítást. A három kamera egyidejű expozíciója a távkioldó gombok egyidejű megnyomásával biztosítható. A gombokat egy közös tokban helyeztük el, az együttes kioldás a tok fedelének lenyomásával történik. Az egyes objektívek apertúráját és expozíciós idejét a fényviszonyoktól



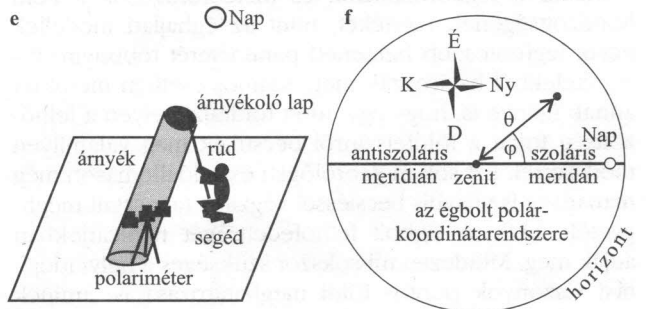
háromlencsés háromkamerás 180° látószögű képalkotó polariméter



180° látószögű halszemobjektív össze-, illetve szétszerelve



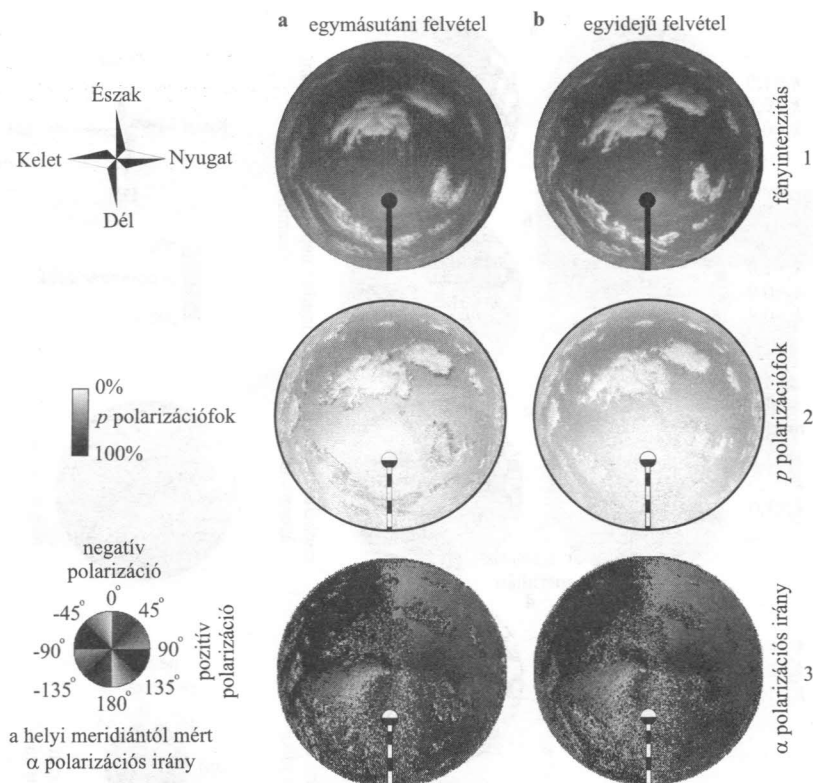
a polárszűrő áteresztési irányja



1. ábra. A háromlencsés, háromkamerás, 180° látószögű képalkotó polariméterünk felépítése. (a) A polariméter fényképe. (b, c) A Sigma halszemobjektív fényképe összeszerelt (b) és szétszerelt (c) állapotban. (d) A beépített lineáris polárszűrők áteresztési tengelyének iránya. (e) A napfénynek a halszemobjektív törőfelületein bekövetkező zavaró visszaverődéseit kiküszöbölendő, az objektíveket a közvetlen erős napfény elől ki kell takarni. (f) Az alulról szemlélt égbolt polarizációs mintázatainak polárkoordináta-rendszere. A K és Ny irány ebben az ábrázolásban felcserélődik.

függő, azonos értékre állítjuk, és mindegyiket végtelenre fókuszáljuk. A szomszédos fényképezőgépek közti változtatható, körülbelül 10–20 cm-es távolság nem okoz parallaxis-hibát, mivel az égbolt gyakorlatilag végtelen távol van.

A Sigma halszemobjektívek két alegységéből épülnek fel (1. c ábra), a két egység közé egy szűrő helyezhető. Itt kapott helyet egy szürke lineáris polárszűrő olyan módon, hogy a szűrők áteresztési irányja és a keresőket ösz-



2. ábra. Gyorsan mozgó felhőket tartalmazó égbolt fényintenzitás-eloszlása, p polarizációfok és α polarizációs irány mintázata a kék (450 nm) spektrális tartományban a háromlencsés, háromkamerás 180° látószögű képalkotó polariméterünkkel mérve. (a) Egymásutáni felvétel: a három polarizációs felvétel egymás után készült 3 másodperc késéssel. (b) Egyidejű felvétel: a három polarizációs felvétel egyidejűleg készült. A sugárirányú pepita alakzat a kitakaró tányér és rúdjának maszkja.

szekötő vízszintes egyenes közötti szög körülbelül 0° az első objektívben, 60° a másodikban és 120° a harmadikban (1.d ábra). E szögértékeknel a legnagyobb az egyes áteresztési irányok között a szögtávolság, ezért ilyenkor a legkisebb a polarimetria innen eredő hibája. A pontos szögértékeket a szűrők behelyezése után megmértük, és a kiértékelés során figyelembe vettük. Polarizációs szűrőknek a Polaroid cég HNP'B típusnéven gyártott szélessávú (275–750 nm) szűrőjét használtuk. A három polárszűrő esetleges különbözőségéből származó hiba elhanyagolható, mivel a kisméretű (átmérő = 22,5 mm) szűrőket egyetlen polarizációs szűrőlap szomszédos területeiről vágtuk ki, a lap jó optikai minőségét és homogenitását pedig a gyár garantálja, így azok azonos áteresztési tulajdonságokkal rendelkeznek.

Detektorként a fényképezni kívánt égbolt fényviszonyaitól függő típusú és érzékenységtű tekercsfilmet használunk. Nappali felvételekhez ez rendszerint Fujichrome Sensia II 100 ASA színes diafilm. Spektrális érzékenységi görbéinek maximuma és félérték-szélessége: $\lambda_{\text{vörös}} = 650 \pm 30$ nm, $\lambda_{\text{zöld}} = 550 \pm 30$ nm, $\lambda_{\text{kék}} = 450 \pm 50$ nm. Egy adott égboltról egyszerre három felvétel készül a három fényképezőgéppel, különböző áteresztési irányú polárszűrőkön keresztül. Hogy az intenzív direkt napfénynek az objektív lencsefelületein történő zavaró visszaverődéseit kiküszöböljük, a Naptól érkező közvetlen sugarakat egy segédzsemély által tartott hosszú rúd végére szerelt lappal kitakarjuk (1.e ábra). A kitakaró lap elég nagy

méretű ahhoz, hogy a három objektívet árnyékban tartsa, és ha azoktól megfelelően messze tartjuk, akkor az általa létrehozott kiértékelhetetlen (alulexponálódott) égbolterület nagysága csekély lesz.

A kiértékelési folyamat megbízhatóságát olyan módon biztosítjuk, hogy a filmek előhívását mindig ugyanabban a budapesti professzionális fotólaborban végzik, mindig azonos, automatikusan ellenőrzött módszerrel. Az előhívott filmeket egy Hewlett Packard ScanJet 6100C típusú lapbeolvasóval egyenként 8 bites színmélységgel digitalizáljuk a spektrum vörös, zöld és kék tartományában. Egy kiválasztott irányhoz képest a szögben részlegesen lineárisan poláros fény intenzitása a χ szögben áteresztő polarizációs szűrőn átjutva

$$I(\alpha) = A \sin[2(\chi - \alpha) + \pi/4] + B.$$

E görbét illesztjük a három különböző áteresztési irányú ($\chi = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$) polárszűrőn átjutott fény három intenzitásértékére az egyes színcsatornában külön-külön. Az illesztett görbéből meghatározható a maximális és minimális áteresztett intenzitás:

$$I_{\text{max}} = B + A \quad \text{és} \quad I_{\text{min}} = B - A.$$

Ezekből pedig származtatható a vizsgált fény valódi (polárszűrő nélküli) I intenzitása és p polarizációfoka:

$$I = \frac{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}{2} = B \quad \text{és} \quad p = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} = \frac{A}{B},$$

valamint polarizációs iránya, ami az a szög, ahol az átjutott intenzitás maximális. E metódust kell végrehajtani minden képpontra mindhárom színcsatornában, így kapjuk meg a szóban forgó égbolt polarizációs térképeit. A halsszemoptika és a kiértékelési folyamat kalibrációját más-hol már részletesen leírtuk [5].

A háromlencsés, háromkamerás polariméter előnyei

Az egylencsés és háromlencsés polariméter közti fő különbség az, hogy a polarizációs térképek elkészítéséhez szükséges három polarizációs felvétel az előbbivel egymás után, míg az utóbbival egyszerre készíthető el. Ha az égbolton a három felvétel közti időkből lényeges változások történnek, ezek meghamisítják a mért polarizációs mennyiségeket az egylencsés esetben.

Gyorsan mozgó felhőkkel teli égboltról készített polarizációs felvételek

A 2. ábra egy gyorsan mozgó felhőket tartalmazó égboltról készített színes képet, valamint a polarizációfok és polarizációs irány eloszlásait mutatja az égbolton egy-

idejű és egymásutáni üzemmód esetén. Az egymásutáni üzemmódban az egyes felvételek között 3 másodperc telt el. A fényképek összehasonlításából jól látszik, hogy az egymásutáni üzemmódban a finom részletek és a felhők kontúrjai elmosódtak. A felhők mozgásirányra merőleges élei háromszor látszanak egymáshoz képest eltolva, mivel a három felvételen a felhők különböző pozíciókban voltak. Az egyidejű üzemmódban készült képen ilyen jelenség nem lép föl: még akkor is éles a kép, ha a felhők gyorsan mozognak az égbolton.

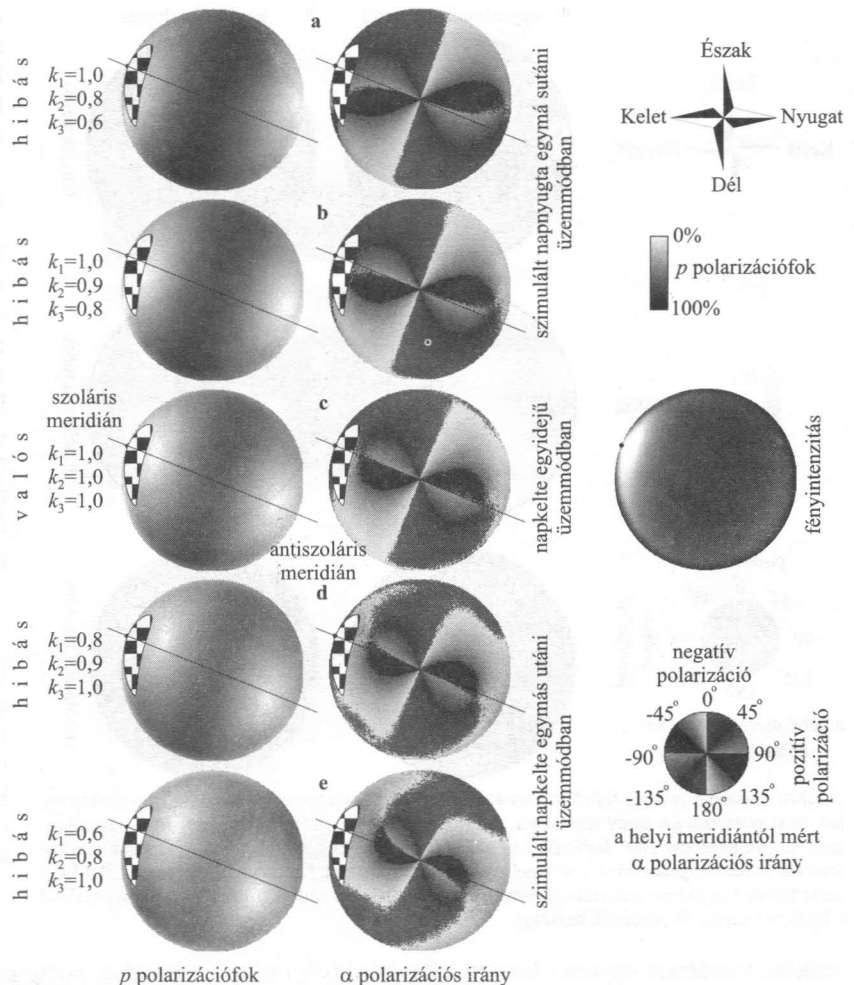
A polarizációs eloszlásokban is lényeges különbségek figyelhetők meg a két üzemmód között. A polarizációfok mintázatán a felhők kontúrjain még a tiszta égbolt polarizációfokánál is nagyobb polarizációfokok figyelhetők meg az egymásutáni üzemmód esetén. A polarizációs irány mintázatán az egymásutáni üzemmódban a valóságosnál lényegesen nagyobb a felhők látszólagos mérete.

E mozgási műtermékekért a gyorsan mozgó felhők okolhatók, és az egyenlős polariméterrel készített képekből igen nehéz lenne kiszűrni e hibákat, amelyek meghamisítják az intenzitás, polarizációfok és polarizációs irány mintázatait, lehetetlenné téve például az ezen adatok alapján történő felhőfelismerést. A mozgási műtermékeket csak úgy lehet kiküszöbölni, ha a három polarizációs felvételt egyszerre készítjük el.

Napkeltekor és napnyugtakor készített égbolt-polarizációs felvételek

Napkeltekor és napnyugtakor az égboltfény intenzitása időben gyorsan változik. Napnyugta után és napkelte előtt olyan kicsi az égbolt fényereje, hogy a polarimetriai mérésekhez szükséges expozíciós idő még különösen érzékeny (1600–3200 ASA) film használatával is elérheti a 15–30 másodpercet. Ilyenkor az egymásutáni üzemmód használatával a három égbolt-polarizációs felvétel elkészítéséhez akár másfél percre is szükség lehet, amely idő alatt az égboltfény intenzitásának változása már jelentős. Emiatt a három kép ugyanazon pontjába érkező fény intenzitása már nem csak a különböző irányú polárszűrők miatt lesz eltérő. Az ebből származó hiba kiküszöbölhető, ha az égbolt három polarizációs felvételét egyszerre készítjük el.

A 3. ábra a fenti jelenséget mutatja be. A napkelte és napnyugta szimulációjához az egyidőben készült három égboltfelvétel minden képpontjának intenzitásértékeit megszoroztuk k_1 -gyel, k_2 -vel és k_3 -mal, és ezután értékeljük ki a polarizációs eloszlásokat. Napnyugtakor az in-



3. ábra. A három polarizációs kép szimulált egymásutáni felvétele által az égbolt-polarizációs mintázatokban okozott hiba bemutatása napnyugtakor (a, b) és napkeltekor (d, e), összehasonlítva az efféle hibáktól mentes egyidejű üzemmódban készített mintázatokkal (C), amikor az expozíciós idő lényegesen megnő az égboltfény alacsony intenzitása miatt. A polarizációfok és polarizációs irány mintázat meghatározásához az egyidejűleg felvett három polarizációs égboltkép minden egyes képpontjának intenzitását megszoroztuk rendre k_1 -gyel, k_2 -vel és k_3 -mal. A Napot a horizonton egy fekete vagy fehér pont jelzi. Napnyugtakor $k_1 > k_2 > k_3$, ugyanis ilyenkor az égboltfény intenzitása gyorsan csökken, míg napkeltekor $k_1 < k_2 < k_3$, mivel ilyenkor az intenzitás gyorsan nő. Napkeltekor és napnyugtakor a helyes polarizációs mintázatok csak egyidejű felvétellel lehet mérni, amikor $k_1 = k_2 = k_3$. A Naphoz közeli felülexponált tartományokat pepita minta jelzi. A c sor jobb oldali ábrája az égbolt fényintenzitásának eloszlását mutatja.

tenzítás folyamatosan csökken, ezért ekkor $k_1 > k_2 > k_3$, illetve napkeltekor az intenzitás növekszik, ezért ekkor $k_1 < k_2 < k_3$. Napkeltekor és napnyugtakor az égbolt valódi polarizációs mintázatai csak egyidejű felvételkészítéssel határozhatók meg, amikor $k_1 = k_2 = k_3$. A 3. ábrán a következők figyelhetők meg:

- napnyugtakor a hosszú expozíciós idejű egymásutáni felvételkészítés eredményeképpen az égbolt polarizációfok-mintázatában a nagy polarizációfokú sáv kiszélesedik, megnövelve az égbolt átlagos polarizációfokát, és az egész ábra elcsavarodik az óramutató járásával ellentétes irányban (az elfordulás iránya a polárszűrők relatív helyzetétől függ, míg nagysága a három polarizációs felvétel elkészítése közti időkülönbségtől);

- napnyugtakor az égbolt polarizációs irány mintázatán a pozitív polarizációjú 8-as alakú tartomány mérete megnő, és elcsavarodik az óramutató járásával ellentétes irányban;

– napkeltekor az égbolt polarizációfok-mintázatán a nagy polarizációfokú sáv összeszűkül, és az eloszlás elcsavarodik az óramutató járásával megegyező irányban;

– napkeltekor az égbolt polarizációs irány mintázatán a pozitív polarizációjú 8-as alakú tartomány mérete lecsökken, és az egész mintázat elcsavarodik az óramutató járásával megegyező irányban;

– a szóban forgó elcsavarodásnak köszönhetően a 8-as alakú tartomány két egymástól legtávolabbi pontjában lévő Arago- és Babinet-féle neutrális (polarizálatlan) pontok is eltolódnak a szoláris, illetve antiszoláris meridiánról.

Függelék

A TSI-880 fotometrikus felhődetektáló rendszer

A TSI-880 (*Total Sky Imager*) az amerikai YES (*Yankee Environmental Systems, Inc.*) cég által kifejlesztett automatikus, valós idejű égbolt-kiértékelő rendszer. Az eszköz egyik lényeges eleme egy fém gömbtükör, mely a teljes égboltot leképezi a fölötte elhelyezett CCD-detektorra a hozzá tartozó optikán keresztül. A kamera által készített felvételeket a beépített számítógépen futó program valós időben kiértékeli, és a külvilág számára elérhetővé teszi. A képfeldolgozó program algoritmusai nem publikus; az viszont ismert, hogy fotometrikus algoritmusról van szó, amely a felhőket az égboltról készített színes képben foglalt fényerősségi és színi információk alapján ismeri föl. A gömbtükör alatti dobozban kapott helyet minden, ami a TSI-880 működéséhez szükséges. Szintén a tükrök alatt található a melegítésére szolgáló fűtőtest. A műszer az aktuális időpontból és a földrajzi koordinátákból kiszámítja a Nap pozícióját és a tükrök pereménél egy fekete szalagot (a napellenzőt) addig forgat, míg az ki nem takarja a közvetlenül a Naphól jövő fénysugarak útját, miáltal megóvjva a CCD-detektort a intenzív direkt napfény károsító hatásától.

A TSI-880 főbb technikai jellemzői a következők: (i) A felvett képek 352×288 képpont felbontásúak, 3×8 bit színmélységűek ($R+G+B = 8+8+8$ bit) és JPEG formátumban kerülnek tárolásra. (ii) A CCD-kamera minimális mintavételezési ideje 30 s. (iii) A berendezés üzemi hőmérséklete -40 °C és $+44\text{ °C}$ között van; a hó és a lecsapódott pára ellen a gömbtükör fűthető. (iv) Súlyja 32 kg, vízszintes méretei 53 cm × 48 cm, magassága 87 cm. (v) A műszert a beépített számítógép és a fűthető tükrök nagy energiaigénye miatt 110/220 V-os, 50 Hz-es tápfeszültséggel kell ellátni. Energiafogyasztása 560 W amennyiben a tükrök fűtése be van kapcsolva, ennek hiányában 60 W. (vi) A berendezés által készített égboltfelvételek és egyéb adatok távolról is hozzáférhetőek LAN kapcsolat (TCP/IP) vagy RS-232-es soros porton keresztül.

A rendszer előnye a kompaktságában rejlik. Könnyű telepíteni, teljesen önműködő, a felvett képek és a kiértékelte adatok távolról is letölthetők, a kezelő szoftver felhasználóbarát. Hátránya viszont a nagy energiaigény, így csak kiépített mérőállomásokon használható. Nem szorul folyamatos karbantartásra, de a tükrők állandóan tisztán kell tartani mindenféle szennyeződéstől. A berendezés az égboltról készített színes képeket a hatékony, de veszteséges tömörítésű JPEG formátumban tárolja, de a kiértékelésben fellépő információvesztés elkerülése érdekében a képfeldolgozást, felhőfelismerést még a teljes információtartalmú képen végzi el, és azt csak ezután tömöríti és rögzíti merevlemezen.

POLDER, a néhai műholdas képkalkotó polariméter

A POLDER (*POLarization and Directionality of Earth's Reflectance*) nevű eszközt a Föld felszíne és légköre által visszavert napfény polarizációjának és irányfüggésének mérésére tervezték *Deschamps* és társai [6]. A POLDER berendezés az 1996 elején földközeli pályára állított japán ADEOS (*ADvanced Earth Observing Satellite*) műholdon kapott helyet. Az ADEOS három évig keringett sarki

pályán a Föld körül, és gyűjtött adatokat a Földről és légköréről a fedélzetén elhelyezett számos műszerrel. Tervezik egy újabb műhold fellövését 2003-ban, amin helyet kapna a POLDER újabb változata is.

Az eszköz látóteréből érkező fényt egy nagylátószögű lencsrendszer egy cserélhető szűrőn keresztül egy CCD-detektorra képezte le. Egy forgatható szűrőtárcsán 16 szűrőhely volt. Az egyik szűrő átlátszatlan volt, ezzel mérték a detektor sötétáramát, ami a kalibrációhoz volt szükséges. A látható és a közeli infravörös spektrum hat hullámhossztartományához hat színszűrő tartozott. A POLDER három hullámhossztartományban volt alkalmas polarizációs mérések elvégzésére, amihez sávonként három polárszűrőt használt három különböző áteresztési irányban, így összesen a polarizációs mérések kilenc szűrőhelyet vettek igénybe.

A POLDER főbb technikai jellemzői a következők voltak: (i) A CCD-detektor felbontása 242×274 képpont volt. (ii) Az eszköz látószöge a mozgás irányában $\pm 43^\circ$, a mozgásirányra merőlegesen $\pm 51^\circ$, átlósan pedig $\pm 57^\circ$ volt. (iii) A detektor spektrális érzékenysége 400 nm-től 1050 nm-ig terjedt. (iv) Mintavételezés 19,6 s-onként történt, ez idő alatt a kezdetben a nadíron lévő tárgy 9° -ot mozdult el. Mialatt elrepült a POLDER egy tárgy fölött 12 méret tudott elvégezni különböző látószögekkel az összes mérési sávban. (v) Egy képpont a felszínen a nadírban egy $6\text{ km} \times 7\text{ km}$ -es területet fedett le. (vi) Egy kiválasztott földi tárgyról a visszavert napfény irányfüggésének teljes meghatározásához öt napra volt szükség, ez idő alatt a POLDER többször elrepült a tárgy fölött, és összesen 65 felvételt készített az összes szűrőn át.

A POLDER-misszió egyik célja a felhők fázisának meghatározása volt. Ehhez a szivárványszórás szögében vizsgálta a felhőket, mivel a szivárványszórás mértéke rendkívül különböző a közel gömb alakú folyadékcseppekre és a szabálytalan poliéder alakú jégkristályokra. Egy másik cél a felhőtető magasságának megállapítása volt, amit eddig infravörös tartományban mérve határoztak meg a felhőtető hőmérsékletének egy becsült hőmérsékletprofilhoz való viszonyításával. A POLDER ennél közvetlenebb módszert használt: az oxigén elnyelési maximuma körüli keskeny és szélesebb sáv intenzitásának arányából határozta meg a felhőtető magasságát, az oxigén légköri egyenletes eloszlását feltételezve.

Köszönetnyilvánítás

Kutatómunkánkat a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János kutatói ösztöndíja és az Oktatási Minisztérium Széchenyi István ösztöndíja (H. G.), valamint a Soros Alapítvány 230/2/878 számú doktori ösztöndíja (G. J.) támogatta. Hálásak vagyunk *Putsay Mártának* (Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest) a szakirodalom beszerzésében nyújtott segítségével. Köszönjük *Horváth Ákosnak* (OMSZ, Viharjelző Observatórium, Siófok) a vele folytatott szakmai megbeszéléseket.

Irodalom

1. J.A. NORTH, M.J. DUGGIN: *Stokes vector imaging of the polarized sky-dome* – Applied Optics 36 (1997) 723–730
2. K.J. VOSS, Y. LIU: *Polarized radiance distribution measurements of skylight. I. System description and characterization* – Applied Optics 36 (1997) 6083–6094
3. J. GÁL, G. HORVÁTH, V.B. MEYER-ROCHOW, R. WEHNER: *Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle* – Proceedings of the Royal Society of London A 457 (2001) 1385–1399
4. I. POMOZI, G. HORVÁTH, R. WEHNER: *How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation* – Journal of Experimental Biology 204 (2001) 2933–2942
5. G. HORVÁTH, A. BARTA, J. GÁL, B. SUHAI, O. HAIMAN: *Ground-based full-sky imaging polarimetry of rapidly changing skies and its use for polarimetric cloud detection* – Applied Optics (2001) (in press)
6. P.Y. DESCHAMPS, F.M. BRÉON, M. LEROY, A. PODAIRE, A. BRICAUD, J.C. BURIEZ, G. SÉZE: *The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives* – IEEE Transactions of Geosciences and Remote Sensing 32 (1994) 598–615