

# FELHŐZÖTTSEGMÉRÉS, OPTIKAI FELHŐFELISMERŐ ALGORITMUSOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA – 1. RÉSZ

Horváth Gábor, Egri Ádám, Blahó Miklós

Környezetoptika Laboratórium, Biológiai Fizika Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem

Barta András, Barta Pál

Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Horváth Ákos

Rutherford Appleton Laboratory, Remote Sensing Group, Oxford

Karl Bumke

GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel

Andreas Macke

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig

A meteorológiai megfigyelések egyik legfontosabb eleme az égbolt felhőborítottságának becslése, ami felhasználható többek között a tengerfelszín besugárzása és a légkör napenergia-átvitele jellemzésénél, a naperőművek számára készülő rövidtávú napsugárzás-előrejelzésekben vagy a hosszútávú éghajlatmodellekben. A felhőzöttségbecslést hagyományosan meteorológus észlelők végezték/végzik a földfelszínről. E személyhez kötött módszer azonban csak kevés mérőállomáson kivitelezhető, továbbá drága, szubjektív és csak kis felbontású felhőméréseket jelent, mert az égbolt nyolcadaiban szolgáltat felhőfedettségi adatokat. A digitális fényképezőgépek megjelenése és gyors terjedése lehetővé tette az olcsó, folyamatos működésű, automatikus felhőkamerák kifejlesztését, amelyek az égboltfény szín- és intenzitáseloszlása alapján objektív és számszerű információkat adnak a felhőborítottságról.

Ma már számos fotometrikus égboltkamera érhető el a piacon, mint például a (i) *Total Sky Imager* (Yankee Environmental Systems, Turner Falls, MA, USA), (ii) *Whole Sky Imager* (Scripps Institute of Oceanography, La Jolla, CA, USA) és (iii) *All Sky Imager* (Atmospheric Physics Group, University of Granada, Spanyolország), ám ezek csak nempolarimetrikus (szín, fényintenzitás) információkat használnak a felhőzöttség meghatározásához. A legújabb vizsgálatok szerint a felhőzöttség becslését segítik a 180° látószögű képalkotó polarimetriával mért égboltpolarizációs mintázatok [1].

A földfelszíni polarimetrikus égboltfény-mérések alapján tudjuk, hogy az égboltfény polarizációs iránymintázata a meteorológiai viszonyoktól függetlenül nagyon stabil, minőségileg gyakorlatilag azonos [1, 2].

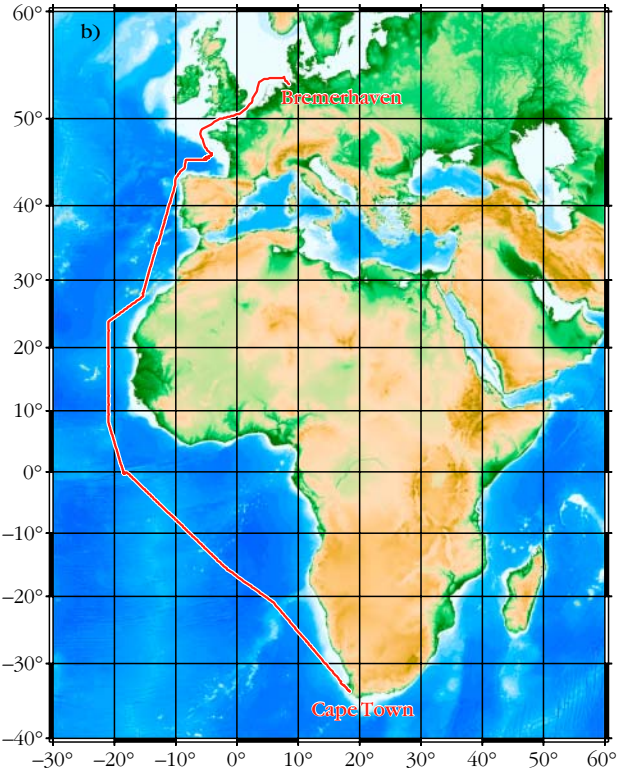
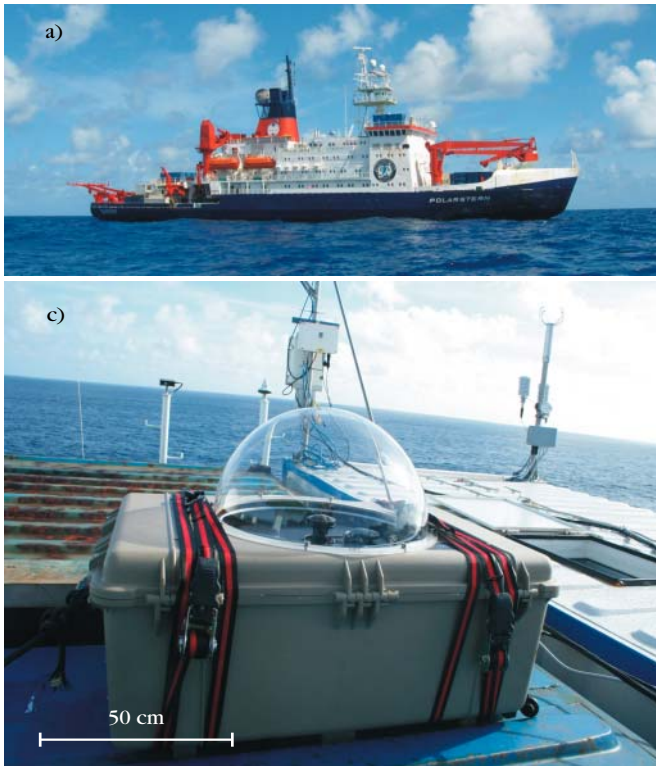
---

Köszönjük a német Alfred Wegener Intézetnek a Polarstern kutatóhajó ANT-XXVII/1 expedícióján való részvételünk lehetőségét. Kutatómunkánkat az OTKA K-105054 (*Égbolt-polarimetria a felhők felismerésére és a polarimetrikus viking-navigációknak kedvező meteorológiai viszonyok vizsgálatára*) pályázat támogatta. Horváth Gábor köszöni a német Alexander von Humboldt Alapítvány műszeradományát és egy három hónapos kutatási ösztöndíját (3.3-UNG/1073032 STP, 2013 június 1. – augusztus 31., Regensburgi Egyetem). Köszönjük *Farkas Alexandra* doktorandusz segítségét az angol cikkünk magyarra fordításában.

A tiszta, részben felhős, teljesen felhős, ködös, füstös és lombzat alatti égboltok polarizációs mintázataiban az egyetlen lényegi különbség a  $p$  lineáris polarizációfokban van: minél nagyobb a nemtisza légkör optikai vastagsága, annál kisebb az égboltfény  $p$ -értéke. Az égboltfény  $\alpha$  polarizációs szög-mintázatának robusztusságát a fény egyszeres szóródásának dominanciája okozza, ami többszörös szóródás fellépése esetén, azaz felhők és köd jelenlétében is megmarad. Az  $\alpha$ -mintázat tehát állandó, a  $p$ -mintázat ugyanakkor érzékeny a fényszóró részecskék típusára és méretére, és ez alkalmas lehet a felhődetektálás pontosságának javítására. A tiszta és felhős ég polarizációjának elméletét és mérését, továbbá a fényelnyelés, valamint a Rayleigh-, felhő- és aeroszolszórás által módosult mintázatait [1–3] foglalja össze.

A fénypolarizációban rejlő többletinformációkat a POLDER (*Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances*) és PARASOL (*Polarization and Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar*) műholdas műszerek használták fel elsőként a felhők tulajdonságainak meghatározásában [4, 5]. A műholdas polarizációs méréseket a vízfelhők és jégfelhők elkülönítésére [4], illetve a felhőket alkotó részecskék effektív sugarának meghatározására [6] használják rutinszerűen. A földi polarizációs méréseket főként a légköri aeroszolk méreteloszlásának és típusának meghatározásában alkalmazzák [7], a felhőtulajdonságok mérésében pedig csak manapság kezdik használni.

2010 őszén egy saját fejlesztésű képalkotó polarizációs felhődetektort teszteltünk a német Polarstern kutatóhajón az Atlanti-óceánt átszelő ANT-XXVII/1 expedíción [8]. Jelen cikkünkben bemutatjuk e műszert és az expedíción végzett mérések eredményeit. A felhődetektorunkkal mért adatok kiértékelését felhőazonosításra szolgáló 13 algoritmussal végeztük, köztük olyan újakkal is, amelyek polarizációs információkat is használnak. Ily módon a polarizációs és nempolarizációs algoritmusok pontosságát hasonlítottuk össze. A kutatóhajó által bejárt útvonalból adódóan számos klímaöv felhőzöttségét vizsgáltuk, miáltal a különböző felhődetektációs algoritmusokat változatos felhőzöttségi viszonyok között tudtuk összeha-



1. ábra. a) A Polarstern kutatóhajó az ANT-XXVII/1 Atlanti-óceáni expedíción (fénykép: Karl Bumke). b) Az expedíció útvonala Bremerhaventől Fokvárosig Gran Canarián át, 2010. október 25. és november 26. között. c) A hajó fedélzetén telepített polarizációs felhődetektorunk.

sonlítani. Az Atlanti-óceánon való utazás rendkívüli körülményei között alkalmunk volt felhődetektorunk terepi ellenállóképességének ellenőrzésére is.

## Mérési és számítási módszerek

### ANT-XXVII/1 expedíció

A Polarstern kutatóhajó (1.a ábra) ANT-XXVII/1 expedíciója az Atlanti-óceánon haladt keresztül a németországi Bremerhaventől a Kanári-szigetekhez tartozó Gran Canarián át a dél-afrikai Fokvárosig 2010. október 25. és november 26. között (1.b ábra). Az expedíció Biscayai-öbölben töltött első hete rendkívül viharos volt, így a felhődetektort nem tudtuk telepíteni a fedélzeten. Csak a viharzóna elhagyása után, 2010. november 2-től végeztünk 15 napon át folyamatos felhőméréseket.

### 180° látószögű képalkotó polarimetrián alapuló felhődetektor

Polarizációs felhődetektorunk egy szabadalmaztatott, hordozható, egykamerás, forgóanalizátoros képalkotó polariméter, ami egy digitális ipari kamerából, 180° látószögű halszemoptikából, lineáris polárszűrőket tartalmazó forgatható szűrőtárcsából, napkitakaró tárcsából, vezérlőegységből és időjárásálló műszerdobozból áll. Az 1.c és 2. ábra a felhődetektort és szerkezetét mutatja. A kamera (Imaging Source DFK 41BU02) felbontása 1280×960 pixel egy 1/2" formátumú CCD érzékelőlapkán (Sony ICX205AK), amelyen

egy Bayer-szűrő tette lehetővé a színes, valamint az infravörös méréseket. A teljes égboltot egy Fujinon FE185C046HA-1 180° látószögű halszemoptika képezte le a CCD egy kör alakú területére. A CCD középpontja és a halszemobjektív optikai tengelye nem esett egybe, ezért az égbolt egy kis része a mérési tartományunkon kívülre került (az égbolt ezen információmentes részeit a polarizációs mintázatokon külön jelöljük). A három különböző áteresztési irányú lineáris polárszűrővel készített 180° látószögű égbolt-

2. ábra. A polarizációs felhődetektorunk belső szerkezete. A halszemoptika és a kamera közti forgatható szűrőtárcsa öt szűrőt tartalmazott (1. táblázat). A napkitakaró egymástól függetlenül irányítható azimut- és elevációkarja lehetővé teszi, hogy a napkitakaró tárcsát a műanyag kupolán belül tetszőleges pozícióba helyezhessük, így mindig teljes árnyékban tartva a halszemoptikát.

kép alapján a polarizációs információk meghatározásának módját már részletesen leírtuk [9].

Az optikai elemek belső felületein zavaró fényviszszaverődések léptek volna föl közvetlen napfényben, ami mérési hibákhoz (becsillanások okozta műtermékekhez) vezetett volna, amelyeket egy mozgatható napkitakaró akadályozott meg. A napkitakaró mechanizmus egy ívelt kar végére szerelt fekete korongot mozgatott két (azimut, eleváció) tengely körül a halszemoptika fölött egy szervomotorral, miáltal a lencse a mérések során végig árnyékban maradt. A halszemobjektív Mueller-mátrixát a [9]-ben közölt módon határoztuk meg, a lencse reflexiójának a polarizációs állapotra gyakorolt hatását pedig elhanyagolhatónak találtuk.

A CCD-szenzor és a halszemobjektív között egy szűrőtárcsa helyezkedett el, amit egy másik szervomotor forgatott, így téve lehetővé a benne elhelyezkedő öt különböző szűrő gyors pozicionálását. E szűrők tulajdonságait az 1. táblázat foglalja össze. A látható tartományban infravörös szűrőt, a közeli infravörös mérésekhez pedig látható szűrőt használtunk. Bár műszerünk alkalmas volt közeli infravörös mérések végzésére is, ezen infraadatokat e cikkünkben nem használjuk.

A mérések időzítéséért, a napkitakaró mozgatásáért, a szűrőtárcsa forgatásáért, a kamera exponálásáért és a fényképek tárolásáért a vezérlőegység és a beépített számítógép felelt. A számítógépet hagyományos TCP/IP kapcsolaton keresztül tudtuk elérni konfiguráció, karbantartás és a mért fényképek letöltése céljából. A teljes rendszert egy robusztus időjárásálló doboz (Peli 1650) védte a környezeti hatásoktól. A doboz záró fedelét egy 42 cm átmérőjű átlátszó műanyag félgömbre cseréltük, hogy a napkitakaró szabad mozgását lehetővé tegyük. A doboz és a műanyag félgömb találkozását leszigeteltük, a műszer belső terének hőmérsékletét egy Peltier-elemes hűtő, valamint egy kis teljesítményű fűtőszál segítségével szabályoztuk, a páratartalmat pedig 1 kg szilikagéllal tartottuk alacsony szinten.

Polariméterünk ideális szárazföldi körülmények között alkalmas az égboltnapfény polarizációfokát  $\pm 1\%$  és polarizációs szögét  $\pm 1^\circ$  pontossággal mérni. Az Atlanti-óceánon ugyanakkor – felhődetektorunk pontossága a mérések szekvenciális volta és a mozgó platform miatt – kisebb volt ( $\pm 1-3\%$ ,  $\pm 1-3^\circ$ ). Előzetes méréseink szerint a műanyag védőfedélre rakódott por, esőcseppek és a tengervízből származó sókristályok is befolyásolták a kapott égboltpolarizációs adatokat, ezek azonban elkerülhetetlenül jelen voltak az expedíció során. A kiváló optikai minőségű műanyag félgömb polarizációra gyakorolt hatását nem vettük figyelembe, mivel annak mértéke nagyságrendekkel kisebbnek bizonyult az előbbi hatásoknál.

## Tanítás és teszt

A Polarstern-expedíció során készített nagyszámú mérésekből egy előszűrés során a kiértékeléshez ötven különböző égboltot választottunk ki, amelyek jól repre-

<b>Felhődetektorunk szűrőtárcsájában használt öt szűrő</b>	
sorszám	szűrő
1.	látható: a spektrum infravörös tartományát szűrte ki
2.	infravörös: a spektrum látható tartományát szűrte ki
3.	látható polárszűrő: az infravörös-tartományt szűrte ki, és a látható tartományban lineáris polárszűrőként működött a szűrőtárcsa sugarától $0^\circ$ -os áteresztési iránnyal
4.	látható polárszűrő: mint a 3., de $45^\circ$ -os áteresztési iránnyal
5.	látható polárszűrő: mint a 3., de $90^\circ$ -os áteresztési iránnyal

Kalibrációhoz a spektrum látható tartományát áteresztő szűrőt használtunk. Az infravörös szűrő kifejezetten kísérleti jellegű volt.

zentálták a különféle lehetséges meteorológiai helyzeteket. Létrehoztunk egy maszkot, amely kitakarta a hajó felépítményeit a kiválasztott összes mérésből. Mind az ötven égbolton a felhőket egymástól függetlenül három ember ismerte föl szabad szemmel. Kézi retusálással egy maszkkal jelölték ki a felhőket a látható tartománybeli szín és intenzitás alapján, vagyis az infravörös és polarizációs információk nélkül. A végső konszenzusos felhőmaszkot, amit a továbbiakban referenciának tekintettünk, e három egyedi felhőmaszkból hoztuk létre: minden olyan képpontot felhősnek tekintettünk, amit legalább két fő felhősnek ismert fel.

Az 50 mérést véletlenszerűen két 25 mérésből álló csoportra osztottuk, amelyek egyikét tanításra, másikat tesztre használtuk. A tanítókészlet méréseinek felhasználásával optimalizáltuk az alábbiakban ismertetett 13 felhődetekciós algoritmus szabad paramétereit, az algoritmusok hibáinak meghatározásához pedig a tesztkészlet méréseit használtuk. Egy adott algoritmus hibájának jellemzésére először meghatároztuk a tesztkészlet méréseinek a háttérmaszkon kívül eső képpontjainak  $N_i$  számát, valamint az algoritmus által a konszenzusos felhőmaszkokhoz képest hibásan felismert képpontok  $N_e$  számát. Egy adott algoritmus  $E$  hibáját az  $E = N_e/N_i$  hányadossal definiáltuk. A statisztikai megbízhatóság növelése érdekében a számításokat az 50 égboltból véletlenszerűen kiválasztott 10 különböző 25 tanító / 25 teszt égbolttal végeztük el.

## Felhődetekciós algoritmusok

Több felhődetekciós algoritmust fejlesztettünk ki, amelyek némelyike kizárólag fotometrikus (színes képi) információkat használ, míg mások fotometrikus és polarimetrikus adatokat egyaránt. A saját, újonnan fejlesztett algoritmusainkon kívül kipróbáltunk olyanokat is, mint például a jól ismert RBR (*Red-Blue Ratio*) módszer [10]. Összesen 13 algoritmust teszteltünk, amelyek közül némelyiknek több változatát is kipróbáltuk.

Vörös-kék különbség (*Red-Blue Difference* – RBD)

A vörös-kék különbség (RBD) algoritmus a vörös ( $I_R$ ) és kék ( $I_B$ ) intenzitást használja, és akkor tekint egy képpontot tiszta égboltnak, ha e két intenzitás különbségére igaz, hogy

$$I_R - I_B < c_{rbd},$$

ahol  $c_{rbd}$  egy küszöbérték. Tiszta kék égbolt esetén a különbség negatív értéket vesz fel, míg a fehér/szürke/pirosas felhők jelenlétében a különbség nullához közeleli.

Fehérségdetektor (*Whiteness Detector* – WD)

A WD-algoritmus a szürke/fehér képpontokat tekint felhősnek, a többi rész pedig a tiszta égboltot jelenti. Egy képpont fehér/szürke, ha

$$1 - \frac{I_R}{I_B} < c_w \quad \text{és} \quad 1 - \frac{I_G}{I_B} < c_w,$$

ahol  $I_R$ ,  $I_G$  és  $I_B$  a vörös, zöld és kék intenzitások, míg  $c_w$  egy optimalizálandó paraméter. Tapasztalataink szerint  $I_R < I_B$  és  $I_G < I_B$  mindig igaz volt a teljes égbolton, ezért

$$1 - \frac{I_R}{I_B} \quad \text{és} \quad 1 - \frac{I_G}{I_B}$$

mindig pozitív értékeket vett föl.

Vörös-kék arány (*Red-Blue Ratio* – RBR)

A vörös-kék különbséghez hasonlóan, az RBR-algoritmus a vörös ( $I_R$ ) és kék ( $I_B$ ) intenzitásokat használja. E módszer akkor tekint tisztának egy adott képpontot, ha

$$\frac{I_R}{I_B} < c_{rbr},$$

ahol  $c_{rbr}$  egy optimalizálandó paraméter. A tiszta égbolt tipikusan kék, ezért az  $I_R/I_B$  arány kicsi, míg a felhők fehérek/szürkék, így azok jelenlétében ez az arány nagyobb.

$k$  legközelebbi szomszéd (*k-Nearest Neighbors* –  $k$ NN)

A főnti egy vagy két szabad paraméterrel rendelkező algoritmusok közös gyengesége, hogy csak korlátozott optimalizálást tesznek lehetővé. Ennek kiküszöbölésére a  $k$ NN-algoritmust használtuk, ami felügyelt tanításra is alkalmas. A tanítás során készítettünk egy  $256 \times 256 \times 256$ -os tömböt, amelynek minden elemét 0 kezdőértékkel töltöttük fel. A tanító-készlet minden egyes képpontját megfeleltettük a tömb egy-egy elemének az  $I_R$ ,  $I_G$  és  $I_B$  intenzitásérték alapján, és az elem számlálóját eggyel növeltük, ha az adott képpont felhős volt, illetve eggyel csökkentettük, ha az a tiszta égbolthoz tartozott. Végül a tesztkészlet minden egyes képpontját megfeleltettük

a tömb egy-egy elemének, és kiválasztottuk az elem  $k$  legközelebbi szomszédját, amelynek értéke nem 0 volt. A tömbben a távolságokat a háromdimenziós euklideszi geometria alapján számoltuk. A képpontot felhősnek tekintettük, ha a  $k$  szomszédos elem közül több pozitív volt, mint negatív, egyébként pedig tiszta égboltnak vettük. Lényegében e módszerrel azt határoztuk meg, hogy egy adott RGB-színű képpont mekkora valószínűséggel tartozik inkább felhőhöz, mint tiszta égbolthoz.

Fehérségdetektor átlagos intenzitással (*Whiteness Detector with Average Intensity* – WDAI)

Az általunk kifejlesztett WDAI-algoritmus a WD fehérségdetektor egy változata, ahol a  $c_i(I)$  küszöbérték nem állandó, hanem a vizsgált képpont környezetének mediánszűrt intenzitásától függ.

Először mindhárom – R, G, B – spektrális tartományban meghatároztuk a mediánszűrt intenzitást egy  $135 \times 135$  képpont méretű ablakkal, amelynek  $40,5^\circ$ -os átmérőjét optimalizálással kaptuk.

Ezután meghatároztuk a mediánszűrt spektrális átlagintenzitást:

$$I = \frac{I_R + I_G + I_B}{3}.$$

Végül ennek segítségével kiszámítottuk a

$$c_i(I) = a_i I + b_i,$$

küszöbértéket, ahol  $a_i$  és  $b_i$  optimalizálandó paraméterek.

A WDAI-algoritmus esetén mind a teljes intenzitást, mind a polarizálatlan intenzitást kipróbáltuk, ahol az utóbbi kismértékben alacsonyabb hibát adott. Egy adott képpont polarizálatlan intenzitása

$$I_{up} = I(1 - p),$$

ahol  $I$  a képpont intenzitása,  $p$  pedig annak polarizációfoka.

Fehérségdetektor naptávolsággal (*Whiteness Detector with Solar Distance* – WDSD)

A szintén általunk fejlesztett WDSD-algoritmus ugyancsak a WD fehérségdetektor egy változata, ahol a  $c_d(d)$  paraméter a vizsgált képpont és a Nap középpontja közötti  $d$  euklideszi távolság függvénye. A küszöbértéket a

$$c_d(d) = a_d d + b_d$$

összefüggés határozza meg, ahol  $a_d$  és  $b_d$  optimalizálandó paraméterek. Mivel a Nap közelében az égbolt fényesebb, a naptávolságtól függő küszöbérték bevezetésével a WD-algoritmus javítható. Kipróbáltuk ugyanezt az algoritmust szögtávolsággal és Manhattan-távolsággal is, de az egyszerű euklideszi távolság használata adta a legjobb eredményt.

## Hibrid küszöb algoritmus (*Hybrid Thresholding Algorithm* – HTA)

A hibrid küszöb algoritmus (HTA) az

$$\frac{I_B/I_R - 1}{I_B/I_R + 1}$$

arányt használja, és az osztályozást rögzített vagy minimum kereszt-entrópiaküszöbvel végzi el. A szóban forgó arány hisztogramjának uni- vagy bimodalitása dönti el, hogy melyik küszöbértéket kell használni. Az uni- vagy bimodalitást a hisztogram szórása különbözteti meg. Egy felhőket és tiszta égboltot is tartalmazó kép  $(I_B/I_R - 1)/(I_B/I_R + 1)$  arányhisztogramja általában bimodális nagy szórással, míg egy tiszta égboltot vagy teljesen felhős égboltot tartalmazó kép hisztogramja unimodális kisebb szórással. Így az algoritmus a hisztogram szórása alapján választ a rögzített és a minimum kereszt-entrópiaküszöb használata között.

A HTA-algoritmust [11] alapján valósítottuk meg. Ugyanakkor, míg [11]-ben a horizontközeli és a Napközeli területeket kimaszkolták, addig mi minden égbolterületet felhasználtunk. A rögzített küszöbnek a

$$c_{FIX} = \frac{1/c_{rbr} - 1}{1/c_{rbr} + 1}$$

értéket használtuk, ahol  $c_{rbr}$  az RBR-algoritmus optimális küszöbértéke. Az optimalizálandó paraméter a  $c_{SD}$  szórási küszöbérték volt, amelynek értéke különíti el a használandó küszöb módszert. Ha az  $(I_B/I_R - 1)/(I_B/I_R + 1)$  arányhisztogram szórása kisebb, mint  $c_{SD}$ , a rögzített küszöbértéket használtuk, máskülönben a minimum kereszt-entrópiaküszöböt.

## Zöld polarizációfok-különbség (*Degree of Polarization Difference in the Green Spectral Range* – pDG)

A pDG-algoritmus az égbolt képpontjait felhősnek tekinti, ha azokra fennáll, hogy

$$p_m - p_B < c_{pDG},$$

ahol  $p_m$  a mért lineáris polarizációfok a zöld spektrális tartományban,  $p_B$  a [12]-ben leírt égboltmodell alapján számolt polarizációfok a mérésel azonos napállás esetén,  $c_{pDG}$  pedig egy optimalizálandó paraméter. Ellenkező esetben a képpontot tisztának tekinti.

## Zöld polarizációfok-arány (*Degree of Polarization Ratio in the Green Spectral Range* – pRG)

A pRG algoritmus az égbolt képpontjait felhősnek tekinti, ha

$$\frac{p_m}{p_B} < c_{pRG},$$

ahol  $p_m$  és  $p_B$  ugyanazt jelentik, mint a pDG esetén, míg  $c_{pRG}$  egy optimalizálandó paraméter. Máskülönben a képpontot tisztának tekinti.

## Neurális hálózat (*Neural Network* – NN)

Rengeteg információt hordoznak a polarizációs mérések, amelyek figyelembe vehetők egy optimális felhődetekciós algoritmussal, amelynek hibája a lehető legkisebb. Vannak helyi optikai információk, mint például a vörös tartományban mért intenzitás vagy a kék tartományban mért polarizációfok. Ezekon kívül vannak globális optikai információk is, mint például a zöld tartományban mért átlagos intenzitás vagy a kék tartománybeli polarizációfok varianciája a teljes égboltra nézve. Vannak nem optikai jellegű információk is, mint például a Nap horizont fölötti szögmagassága vagy a vizsgált képpont és a Nap közötti azimutszög. Ezen információk némelyike egyszerűen figyelembe vehető, míg mások algoritmusba való beemelése kihívást jelent. A nehézséget annak meghatározása jelenti, hogy egy emberi megfigyelő miként dönti el az égbolt egy adott pontjáról, hogy felhős vagy tiszta. Elképzelhető, hogy adott tulajdonságú fényt egyes esetekben felhőnek, máskor pedig tiszta égboltnak tartunk.

E problémák némelyikének orvoslására többretegű perceptron alapú neurális hálózatot szoktak használni, ami alkalmas felügyelt tanulásra, de a bemeneti paramétereket csak helyi optikai és nempolarimetrikus információkra korlátozza. A cél a sebesség és a pontosság közti egyensúly megtalálása. A mi neurális hálózatunk

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

szigmoid aktivációs függvényvel bír. Elkerülendő annak lehetőségét, hogy potenciálisan hasznos információt hagyunk ki a bemeneti paraméterek közül, amit a neurális hálózat fel tudott volna használni, úgy döntöttünk, hogy olyan sok bemeneti paramétert használunk, amennyit csak tudunk. Nem tartozott céljaink közé, hogy végül meghatározzuk, mely paramétereket használta fel ténylegesen az algoritmus.

Neurális hálózataink szerkezetét az egyes rétegekben található neuronok számával jellemezhetjük. Ha például egy hálózatot az  $i-j-k-1$  számsorral jellemezzük, akkor e hálózatnak  $i$  bemeneti neuronja van,  $j$  neuronja van az első belső rétegben,  $k$  neuronja a második belső rétegben és 1 neuronja a kimeneti rétegben. A bemeneti réteg és valamennyi belső réteg tartalmazott plusz egy neuront, ami nem csatlakozott egyetlen neuronhoz sem az előző rétegből, és amelynek mindig 1 volt a kimenete. A kimeneti rétegnek egyetlen neuronja volt, amelynek célértéke tiszta égbolt esetén 0 volt, felhő esetén pedig 1. A kiértékelés során a vizsgált képpontot tisztának tekintettük, ha a kimeneti neuron értéke  $< 0,5$ , egyébként pedig felhősnek. Tanító algoritmusunk az úgynevezett *back-propagation* algoritmus volt 0,001-es tanulási rátával, hogy elkerüljük a súlyok oszcillációját. Minden neuronréteg teljes egészében kapcsolódott az előzőhöz. A bemeneti paramétereket a 2. táblázat foglalja össze. Az  $I$  intenzitás és a  $p$  lineáris polarizációfok átlagát és varian-

ciáját az adott képpont körüli 3×3-as ablakban számoltuk. Az egyszerű intenzitás neurális hálózatot (*simple intensity neural network* – SINN) és az egyszerű polarizációfok neurális hálózatot (*simple degree of polarization neural network* – SpNN) a 7–3–1 rétegszerkezet jellemezte. A nem-polarimetrikus neurális hálózat (*non-polarimetric neural network* – NNN) rétegszerkezete 15–16–16–16–1 volt, míg a polarimetrikus neurális hálózaté (*polarimetric neural network* – PNN) 27–28–14–1.

A kísérleti eredmények bemutatására, elemzésére és a belőlük levonható következtetések ismertetésére a következő lapszámban kerül sor.

#### Irodalom

- Horváth G. (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences* (2nd ed.) Springer Series in Vision Research, vol. 2 (series editors: S. P. Collin, J. N. Marshall) Springer: Heidelberg, Berlin, New York, 2014.
- Horváth G., Varjú D.: *Polarized Light in Animal Vision – Polarization Patterns in Nature*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York, 2004.
- Coulson K. L.: *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, USA, 1988.
- Deschamps P. Y., Bréon F. M., Leroy M., Podaire A., Bricaud A., Buriez J. C., Seze G.: The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 32 (1994) 598–615.
- Fougnie B., Bracco G., Lafrance B., Ruffel C., Hagolle O., Tinel C.: PARASOL in-flight calibration and performance. *Appl. Opt.* 46 (2007) 5435–5451.
- Bréon F. M., Doutriaux-Boucher M.: A comparison of cloud droplet radii measured from space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 43 (2005) 1796–1805.
- Cairns B., Carlson B. E., Laci A. A., Russell E. E.: An analysis of ground-based polarimetric sky radiance measurements. *Proc. SPIE* 3121 (1997) 382–393.
- Barta A., Horváth G., Horváth Á., Egri Á., Blahó M., Barta P., Bumke K., Macke A.: Testing a polarimetric cloud imager aboard research vessel Polarstern: Comparison of color-based and polarimetric cloud detection algorithms. *App. Opt.* 54 (2015) 1065–1077 + címkép
- Gál J., Horváth G., Meyer-Rochow V. B., Wehner R.: Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle. *Proc. Roy. Soc. A* 457 (2001) 1385–1399.

2. táblázat

**A négy neurális hálózat (NN) alapú felhődetekciós algoritmus bemeneti paramétere**

bemeneti paraméter	neurális hálózat			
	PNN	NNN	SINN	SpNN
az egész képre átlagolt $I$ a vörös (650 nm) tartományban	×	×		
az egész képre átlagolt $I$ a zöld (550 nm) tartományban	×	×		
az egész képre átlagolt $I$ a kék (450 nm) tartományban	×	×		
$I$ egész képre számított varianciája a vörösben	×	×		
$I$ egész képre számított varianciája a zöldben	×	×		
$I$ egész képre számított varianciája a kékben	×	×		
az egész képre átlagolt $p$ a vörösben	×			
az egész képre átlagolt $p$ a zöldben	×			
az egész képre átlagolt $p$ a kékben	×			
$p$ egész képre számított varianciája a vörösben	×			
$p$ egész képre számított varianciája a zöldben	×			
$p$ egész képre számított varianciája a kékben	×			
a Nap horizont fölötti elevációs szöge	×	×	×	×
átlagos $I$ a vizsgált képpontra a vörösben	×	×	×	
átlagos $I$ a vizsgált képpontra a zöldben	×	×	×	
átlagos $I$ a vizsgált képpontra a kékben	×	×	×	
$I$ varianciája a vizsgált képpontra a vörösben	×	×		
$I$ varianciája a vizsgált képpontra a zöldben	×	×		
$I$ varianciája a vizsgált képpontra a kékben	×	×		
átlagos $p$ a vizsgált képpontra a vörösben	×			×
átlagos $p$ a vizsgált képpontra a zöldben	×			×
átlagos $p$ a vizsgált képpontra a kékben	×			×
$p$ varianciája a vizsgált képpontra a vörösben	×			
$p$ varianciája a vizsgált képpontra a zöldben	×			
$p$ varianciája a vizsgált képpontra a kékben	×			
a vizsgált képpont horizont fölötti elevációs szöge	×	×	×	×
a vizsgált képpont és a Nap azimuttszög-távolsága	×	×	×	×

$I$ : intenzitás,  $p$ : lineáris polarizációfok. Az egyes paraméterek használatát a PNN, NNN, SINN és SpNN algoritmusokban × jelzi. Egy vizsgált képpont esetén az  $I$  és  $p$  átlagát és varianciáját az adott képpont körüli 3×3-as ablakban számoltuk.

- Ohmura A., Dutton E. G., Forgan B., Fröhlich C., Gilgen H., Hegner H., Heimo A., König-Langlo G., McArthur B., Müller G., Philipona R., Pinker R., Whitlock C. H., Dehne K., Wild M.: Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): new precision radiometry for climate research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79 (1998) 2115–2136.
- Li Q., Lu W., Yang J.: A hybrid thresholding algorithm for cloud detection on ground-based color images. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 28 (2011) 1286–1296.
- Berry M. V., Dennis M. R., Lee R. L. Jr.: Polarization singularities in the clear sky. *New J. Phys.* 6 (2004) 162.

