

Meritve hitrosti gibanja zračnih mas

Samo Stanič*, Maruška Mole*, Miha Živec*

Povzetek

V prispevku predstavljamo novo metodo merjenja smeri in hitrosti gibanja zračnih mas, ki temelji na kombinaciji aktivnega (lidarski sistem) in pasivnega (kamera) daljinskega zaznavanja atmosfere. S pomočjo lidarja smo določili razdaljo do oblakov, ki so služili kot sledilci v zračnem toku. Sočasno z lidarskimi meritvami smo fotografirali del neba, v katerega je bil usmerjen lidar. Iz meritev oddaljenosti oblakov ter njihovega premikanja smo izračunali hitrost potovanja oblakov in s tem tudi spodnjo mejo hitrosti zračne mase, ki je oblake nosila. Metodo merjenja hitrosti gibanja zračnih mas smo preizkusili na štirih testnih primerih v februarju in marcu 2016. Meritve so potekale v Ajdovščini v različnih vremenskih pogojih. Poleg naprav za daljinsko zaznavanje (lidar in optične kamere) smo za primerjavo uporabili tudi prizemne meritve vetra v Ajdovščini ter podatke vertikalne sondaže atmosfere v Vidmu in Ljubljani. Rezultati meritev vetra z daljinskim zaznavanjem se v vseh štirih opazovanih primerih relativno dobro ujemajo z rezultati sondaž, do odstopanj pa prihaja zaradi krajevnega in časovnega neujemanja sondaž z daljinskim zaznavanjem.

Ključne besede: daljinsko zaznavanje, veter, atmosfera

Keywords: remote sensing, wind, atmosphere

Uvod

Atmosfera je plast plinov in aerosolov, ki obkroža Zemljo. V članku se bomo omejili na pojave v spodnji plasti, imenovani troposfera, v kateri poteka večina vremenskih procesov (Rakovec in Vrhovec, 2007). Troposfero delimo na prizemno plast (PBL) in prosto atmosfero, kjer je PBL tisto območje, v katerem še prihaja do interakcije med tlemi in zrakom. Ker se lastnosti atmosfere s časom spreminjajo, so meritve meteoroloških spremenljivk in opazovanje razvoja vremenskih procesov velikega pomena. Ugotavljanje stanja atmosfere z uporabo prizemnih točkovnih meritev je razen za najnižji del PBL večinoma nemogoče, saj nam ne omogoča vpogleda v vertikalno strukturo atmosfere. Meritve vertikalnih profilov meteoroloških spremenljivk so se tako izvajale z uporabo letal, najpogosteje pa z baloni z radiosondami. Težava takih meritev je njihova slaba časovna in prostorska ločljivost, saj se balon na določeni višini zadržuje le kratek čas, hkrati pa so tudi postaje, ki opravljajo take meritve, zelo daleč narazen. Velik napredek pri meritvah vertikalnih profilov je doprinesla uporaba naprav za daljinsko zaznavanje, ki tako s tal kot s satelitov spremljajo stanje atmosfere, kar omogoča zajem podatkov o vertikalnih profilih temperature in vlažnosti ter posledično zagotavlja boljše vhodne podatke za meteorološke modele.

Na daljavo lahko bodisi s pasivnim bodisi z aktivnim daljinskim zaznavanjem merimo tudi hitrost in smer vetra. Aktivne metode merijo lastnosti atmosfere na podlagi spremembe povratno sipanega lastnega signala, pasivne pa na podlagi spremembe signalov iz zunanjih izvorov. Naprave za daljinsko zaznavanje lahko kot signal uporabljajo zvok (SODAR) ali elektromagnetno valovanje (RADAR in LIDAR). Hitrosti gibanja zračnih mas z uporabo pasivnega daljinskega zaznavanja so določali že v 19. stoletju, kjer so za meritve hitrosti uporabljali kombinacijo dveh ali več meritev kotov do izbranih oblačnih

* Univerza v Novi Gorici, Center za raziskave atmosfere, Vipavska 11c, Ajdovščina

struktur s teodolitom z različnih lokacij, pa tudi s kombinacijo dveh meritev teodolitov in dveh fotografij (brez avtorja, 1896). Z iznajdbo lidarja so metodo nadgradili, saj so z uporabo zaporednih lidarskih meritev lahko sledili oblakom in drugim atmosferskim strukturam, ter tako pridobili informacijo o hitrosti in smeri gibanja le-teh (Hooper, 1985; Mayor, 2001). V zadnjem času so v uporabi predvsem Dopplerski lidarji, ki pa za določanje hitrosti in smeri vetra uporabljajo Dopplerjev zamik prejetega signala (Chanin et al., 1989; Liu et al., 2002).

Za določitev hitrosti in smeri vetra na višini oblačne plasti z boljšo časovno ločljivostjo od standardnih meteoroloških meritev smo uporabili kombinacijo aktivne (lidarski sistem) in pasivne (kamera) metode daljinskega zaznavanja. Za sledenje gibanja zračnih mas smo uporabili oblake, ki so jih te zračne mase nosile. Dinamiko gibanja smo določili iz časovnega zaporedja fotografij ter lidarske meritve razdalje od opazovalca do oblačne plasti.

Meritve in modeliranje stanja atmosfere

Predstavljena metoda meritve hitrosti in smeri gibanja zračnih mas temelji na uporabi aktivnega (lidar) in pasivnega (fotoaparat ali kamera) daljinskega zaznavanja stanja v atmosferi. S pomočjo lidarja smo izmerili višinske profile povratnega sipanja na delcih v atmosferi, ki smo jih uporabili za identifikacijo oblačnih plasti ter meritev njihovih razdalj od lidarskega sistema, zaporedne posnetke neba pa smo uporabili za določitev njihovega premikanja. Vse časovne oznake pri meritvah so v lokalnem času (LT). Dobljene rezultate smo primerjali s prizemnimi meritvami vetra na strehi zgradbe Univerze v Novi Gorici v Ajdovščini, ter z meritvami radiosondaž v Vidmu in v Ljubljani. Smer vetra smo primerjali tudi z napovedmi modela HYSPLIT.

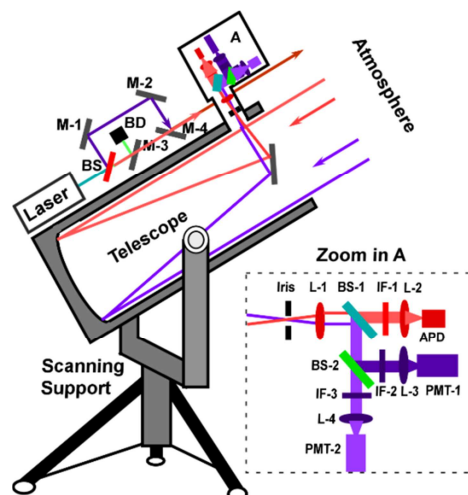
Lidar

Lidar je naprava, ki zaznava povratno sipanje kratkih pulzov laserske svetlobe na aerosolih in molekulah vzdolž izsevanega laserskega žarka (Kovalev in Eichinger, 2004). Sestavljen je iz oddajnika (pulzni laser) in sprejemnika svetlobe (teleskop), ki je povezan z detektorjem svetlobe, ojačevalnikom in računalniškim sistemom za beleženje podatkov. Prejeti signal lahko opišemo z lidarsko enačbo za sipanje:

$$P(r) = P_0 k \frac{c\tau_0}{2} A \frac{\beta(r)}{r^2} T^2(r), \quad (1)$$

kjer je P_0 moč signala, ki ga odda svetlobni izvor, k učinkovitost sistema, c hitrost svetlobe, τ_0 dolžina svetlobnega sunka, A efektivna površina sprejemnika, $\beta(r)$ koeficient povratnega sipanja in $T^2(r)$ oslabitev signala na poti od oddajnika do sprejemnika.

Meritve smo izvedli z mobilnim lidarjem Univerze v Novi Gorici (He et al., 2010), ki kot oddajnik uporablja Nd:YAG pulzni laser z valovno dolžino 1064 nm in frekvenco sunkov 10 Hz, za sprejemnik pa 300 mm Newtonski teleskop, povezan s plazovno fotodiodo. Višinski profili jakosti povratnega sipanja so povprečje meritev desetih zaporednih pulzov. Končna meritev ima časovno ločljivost 1 s, ločljivost pri določanju razdalje do določenega sipalca pa je 3,75 m.



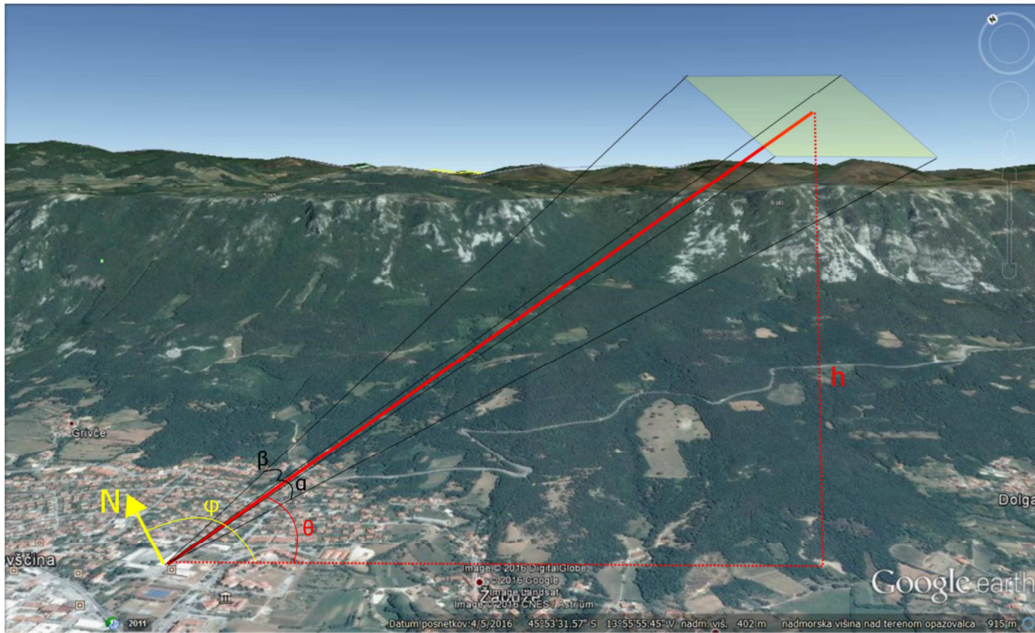
Slika 1: Shema mobilnega lidarskega sistema Univerze v Novi Gorici (He et al., 2010). Svetlobni sunek, ki ga odda laser, se v atmosferi povratno siplje na aerosolih in molekulah. Sipano svetlobo zberemo s teleskopom in jo vodimo skozi filtrski sistem na plazovno fotopomnoževalko. Signal, ki ga sistem zazna, opišemo z enačbo (1). Mobilni lidar UNG omogoča meritve z ultravijolično in infrardečo svetlobo, pri čemer je slednja zaradi manjše oslabitve boljše izbira za meritev oddaljenosti oblačnih plasti.

Optične kamere

Dinamiko gibanja oblakov smo določili iz časovnega zaporedja fotografij. Fotoaparati je bil med meritvami nepremično pritrjen in usmerjen v isti del neba kot lidar (Slika 2), tako da so vsi posnetki v zaporedju pokrivali isti kos neba. Enakomerni časovni interval zajemanja fotografij smo dosegli z avtomatskim proženjem. Frekvenca zajemanja fotografij je bila dovolj visoka, da smo lahko sledili izbranemu delu oblaka skozi več zaporednih fotografij. Za opazovanje neba smo uporabili dva različna optična sistema – zrcalno refleksni fotoaparati (Canon EOS 1000D) in CCD kamero (Mignon IPC-20C). Podrobne lastnosti obeh sistemov so predstavljene v Tabeli 1.

Tabela 1: Glavne lastnosti fotoaparata in kamere, ki sta bila uporabljena pri meritvah gibanja zračnih mas.

Tip optičnega sistema	Canon EOS 1000D	Mignon IPC-20C
Ločljivost posnetka	3888 × 2592	640 × 480
Horizontalni kot zaslonke (β)	48 °	36,4 °
Vertikalni kot zaslonke (α)	30,9 °	27,4 °
Horizontalna kotna ločljivost	0,012 °/ piko	0,057 °/ piko
Vertikalna kotna ločljivost	0,012 °/ piko	0,057 °/ piko
Časovna ločljivost	15 s	60 s



Slika 2: Stranski pogled na izvedbo eksperimenta. Debela rdeča črta predstavlja pravokotnico na vidno polje kamere skozi središče vidnega polja, rumeno območje pa vidno polje kamere. θ je elevacijski kot kamere, α in β pa sta vertikalni in horizontalni kot, ki ga pokrije odprta zaslonka. Rumena puščica je usmerjena proti severu, φ je azimutni kot optične osi kamere glede na sever.

Model HYSPLIT

Trajektorije zračnih mas je mogoče modelirati s pomočjo numeričnih modelov. Za primerjavo izmerjenih vrednosti z modelskimi napovedmi smo se zaradi enostavne uporabe odločili za model HYSPLIT (Stein et al, 2015), ki med drugim omogoča izračun povratnih trajektorij, in ga uporabili za primerjavo smeri vetra na višini baze oblakov nad Ajdovščino.

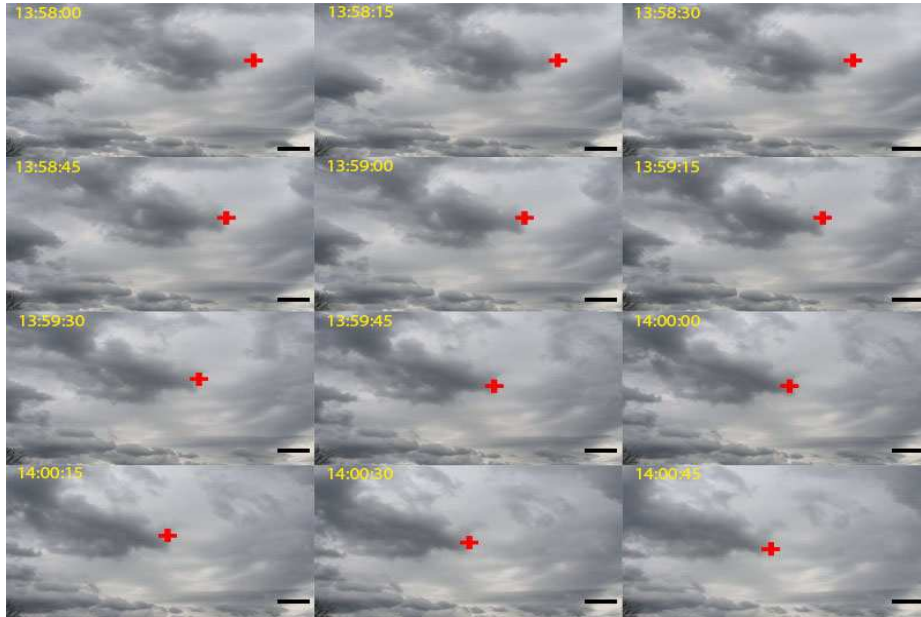
Radiosondaža

Vertikalne profile meteoroloških spremenljivk običajno merimo z uporabo radiosond. V študiji smo za primerjavo z meritvami vetra z daljinskim zaznavanjem uporabili podatke radiosond iz Ljubljane in iz Vidma, ki so prosto dostopni na spletni povezavi <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

Izračun hitrosti in smeri vetra

Izračun smeri in spodnje meje hitrosti vetra temelji na predpostavkah, da se višina opazovane oblačne plasti med nekaj minutno meritvijo ne spreminja ter da se takrat zračne mase v tej plasti gibljejo s konstantno hitrostjo. Za potrebe izračuna definiramo tri koordinatne sisteme: sistem S , ki sovpada z lokacijo merilnega sistema (njegova abscisna os kaže proti vzhodu, ordinatna os pa proti severu), sistem fotografije S_s , ki ima izhodišče v središču vidnega polja kamere (njegova abscisna os kaže proti desni, ordinatna os pa navzdol v ravnini fotografije), ter sistem oblačne plasti S' z istim koordinatnim izhodiščem

kot S_s , pri čemer njegova abscisna os sovpada z abscisno (horizontalno) osjo sistema fotografije, ordinatna os pa kaže v smeri horizontalne projekcije optične osi kamere (Slika 4). Sistem S' je torej zasukan glede na S okoli skupne navpičnice za azimutni kot φ optične osi kamere (Slika 2).



Slika 3: Zaporedje fotografij, uporabljenih pri izračunu hitrosti dne 19. 2. 2016. Posnete so bile s fotoaparatom Canon EOS1000D s konstantnim časovnim intervalom 15 s. V zgornjem levem kotu je čas posnetka, rdeč križec pa označuje strukturo, ki smo ji sledili. Črna črta v spodnjem desnem kotu je prostorsko merilo in predstavlja zorni kot 5° .

Za izračun smeri in spodnje meje hitrosti vetra na fotografijah najprej izberemo del oblaka, ki se pojavlja na več zaporednih fotografijah, ga označimo in oznaki sledimo skozi zaporedje fotografij (Slika 3). V testni študiji smo oblačno strukturo izbrali in označili ročno. Lego oznake v sistemu fotografije S_s izračunamo kot

$$x_{i,s}(t) = \frac{2n_i(t) - N_i}{N_i} R \tan\left(\frac{\psi_i}{2}\right),$$

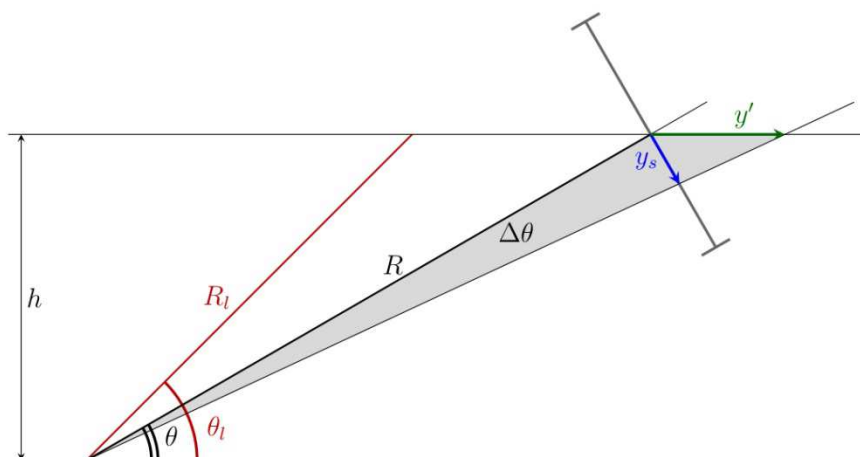
kjer je za izbrano smer ločljivost fotografije (celotno število točk) N_i , n_i koordinata oznake v točkah v tej smeri, R razdalja od kamere do baze oblakov v središču vidnega polja kamere ter ψ_i zorni kot kamere. Za smer osi x_s je to horizontalni zorni kot β , za smer osi y_s pa vertikalni zorni kot α , ki sta za vsak tip uporabljene kamere podana v Tabeli 1. Razdaljo med merilnim sistemom R in bazo oblakov izmerimo z lidarjem. V primeru, da optični osi lidarja in kamere nista popolnoma poravnani, pri različnih elevacijah optične osi kamere θ in lidarja θ_l razdaljo do oblačne plasti v sredini fotografije (Slika 4) iz lidarske meritve izrazimo kot

$$R = \frac{\sin(\theta_l)}{\sin(\theta)} R_l.$$

Iz izmerjenih leg oznake v sistemu fotografije S_s nato izračunamo lego označenega dela oblaka v koordinatnem sistemu oblačne plasti S' . Odmiki v smeri osi x' so enaki horizontalnim odmikom na fotografiji, $x' = x_s$, odmike v smeri osi y' pa izrazimo z odmiki v smeri osi y_s (Slika 4) kot

$$y' = R \frac{\sin(\Delta\theta)}{\sin(\theta - \Delta\theta)}, \quad (2)$$

kjer je $\tan(\Delta\theta) = \frac{y_s}{R}$.



Slika 4: Prečni pogled na tipično postavitev meritve hitrosti oblačnih mas. Oblačna plast je na višini h in se giblje v horizontalni ravnini. Razdalja do oblakov vzdolž optične osi lidarja z elevacijo θ_l je R_l , vzdolž optične osi kamere z elevacijo θ pa R . y_s je projekcija horizontalnega odmika v smeri osi y' v koordinatni sistem fotografije

V sistemu S' iz povprečne vrednosti premikov med zaporednimi legami v znanih časovnih intervalih izračunamo obe komponenti vektorja hitrosti oznake, napako pa ocenimo s standardnim odklonom. Velikost vektorja

$$v' = \sqrt{v'_x{}^2 + v'_y{}^2} \quad (2)$$

je enaka hitrosti vetra. Ker je smer vetra po dogovoru smer, iz katere veter piha, jo s komponentami vektorja hitrosti oznake izrazimo kot

$$\gamma' = \arctan\left(\frac{v'_x}{v'_y}\right) + 180^\circ. \quad (3)$$

Da bi lahko rezultate meritev z daljinskim zaznavanjem primerjali z meritvami radiosondaž in napovedmi modela HYSPLIT, moramo vektor hitrosti oznake zapisati v koordinatnem sistemu merilnega sistema S . Hitrost vetra se pri tem ne spremeni, $v = v'$, pri smeri vetra pa upoštevamo še azimutni kot kamere, $\gamma = \gamma' + \varphi$.

Rezultati

Meritve smeri in hitrosti gibanja zračnih mas s kombinacijo aktivnega in pasivnega daljinskega zaznavanja smo izvedli v Ajdovščini v februarju in marcu 2016 na štirih

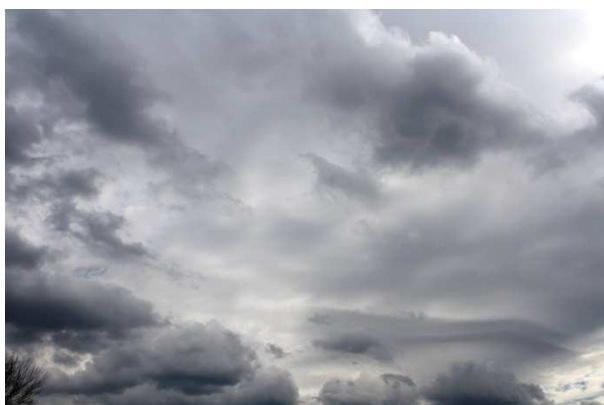
testnih primerih pod različnimi vremenskimi pogoji. Eksperimentalne podrobnosti, vključno s časom začetka in konca optičnih meritev in lidarskimi rezultati so predstavljene v Tabeli 2. Časovna in kotna ločljivost optične meritve sta odvisni od tipa uporabljenega optičnega sistema in sta podani v Tabeli 1.

Tabela 2: Opis osnovnih parametrov optičnih meritev in lidarskih meritev za štiri testne primere gibanja zračnih mas, ki smo jih opazovali februarja in marca 2016 v Ajdovščini.

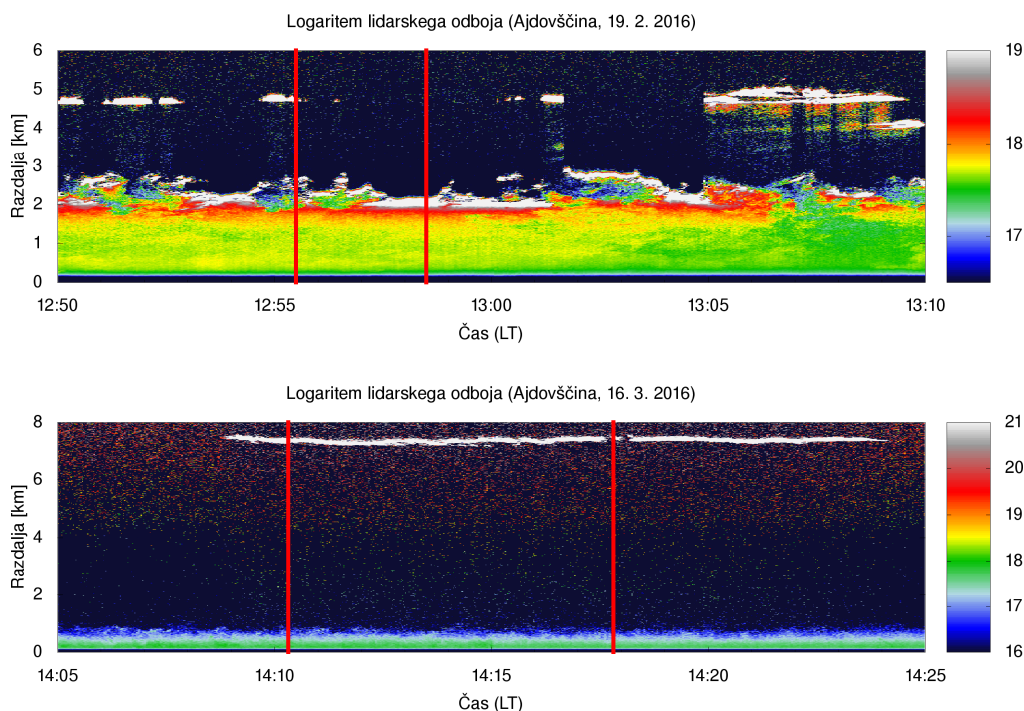
Oddaljenost in višina baze oblakov sta izračunani iz lidarskih podatkov. φ in φ_l sta azimutna kota, θ in θ_l pa elevacijska kota kamere in lidarja.

	Primer 1	Primer 2	Primer 3	Primer 4
Datum in čas	19. 2. 2016 12:55 – 12:58	16. 3. 2016 14:10 – 14:18	17. 3. 2016 7:00 – 7:10	30. 3. 2016 10:06 – 10:12
φ_l [°]	142	144	144	144
θ_l [°]	30	30	20	30
φ [°]	142	144	144	144
θ [°]	30	9	9	9
Razdalja R_l [m]	2199 ± 154	7109 ± 8	6523 ± 48	3612 ± 10
Višina [m]	1100	3555	2231	1806
Ločljivost	3888 × 2592	640 × 480	640 × 480	640 × 480

V Primeru 1 z dne 19. 2. 2016 med 12:49 in 13:19 (Slika 5 levo) je bilo vreme oblačno. Med meritvijo sta bili prisotni dve plasti oblakov, nižji krpasti oblaki na višini 1100 m ter višji strnjeni oblaki z bazo na višini 2250 m (Slika 6 zgoraj). Nižji krpasti oblaki so precej hitro spreminjali obliko, kar je bil vzrok za veliko nedoločenost razdalje do baze nižjih oblakov (14 %). V Primeru 2 z dne 16. 3. 2016 med 13:00 in 15:00 LT (Slika 5 desno) je bilo delno oblačno vreme, v Ajdovščini pa je pihala burja. Baza oblakov je bila stabilna (Slika 6 spodaj), med meritvijo je bil odklon razdalje do baze le okoli 0,1 %. Primera 3 in 4 sta podobna Primeru 2. Rezultati meritev za vse štiri primere so predstavljeni v Tabelah 3 in 4.



Slika 5: Pokritost neba nad Ajdovščino 19. 2. 2016 ob 12:55 LT (levo) in 16. 3. 2016 ob 14:10 LT (desno). Na levi sliki je vidnih nekaj krpastih oblakov (Pannusov) na višini približno 1100 m pod glavno bazo oblakov na višini 2250 m, medtem ko na desni prevladujejo srednji oblaki, ki pripadajo rodu Altocumulusov.



Slika 6: Lidarski meritvi povratnega sipanja na aerosolih v ozračju iz dne 19. 2. 2016 (zgoraj) in 16. 3. 2016 (spodaj). Razdaljo merimo od položaja lidarskega sistema. V obeh primerih je časovni interval za izračun hitrosti in smeri vetra označen z navpičnima rdečima črtama. V zgornjem primeru se oblačna plast, ki smo jo uporabili za izračun vetra, nahaja na razdalji med 2 in 3 km, vidno je tudi spreminjanje oddaljenosti baze znotraj izbranega obdobja. V nasprotju s primerom iz 19. 2. je baza oblakov v spodnjem primeru bolj konstantna in se nahaja približno 7,5 km od merilnega sistema.

Primerjava rezultatov z drugimi meritvami vetra in z modelom HYSPLIT

Rezultate meritev z daljinskim zaznavanjem smo primerjali s podatki radijske sondaže v Vidmu in v Ljubljani (Tabela 3), pri čemer smo izbrali meritve, ki so bile našim časovno najboljše. Opazili smo dobro ujemanje, pri čemer lahko razlike pojasnimo s časovnim in prostorskim zamikom med meritvami z daljinskim zaznavanjem in meritvami z radiosondami.

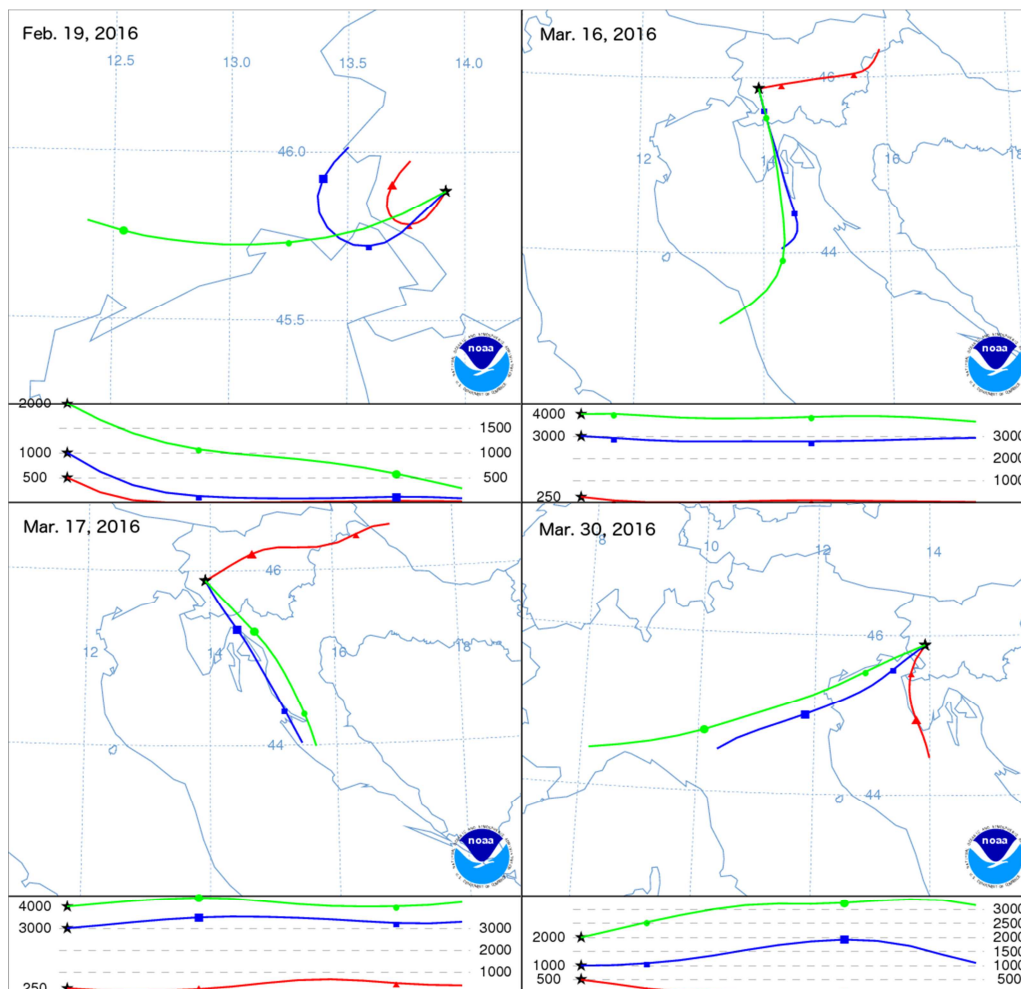
Tabela 3: Primerjava rezultatov, pridobljenih iz meritev z daljinskim zaznavanjem in meritev radijske sondaže v Ljubljani in Vidmu. Pri sondaži smo izbrali meritve, ki so bile našim po času in po višini najboljše.

Datum	Daljinsko zaznavanje		Ljubljana		Videm	
	Hitrost	Smer	Hitrost	Smer	Hitrost	Smer
	m/s	°	m/s	°	m/s	°
19. 2.	4,4 ± 0,8	258 ± 13	5,1	265	2,6	144
16. 3.	8,6 ± 2,1	191 ± 15	7,2	120	9,8	150
17. 3.	6,2 ± 1,7	182 ± 14	8,2	135	5,1	160
30. 3.	15,8 ± 1,7	243 ± 18	11,8	245	11,8	235

Ob primerjavi rezultatov, pridobljenih z daljinskim zaznavanjem in rezultatov meritev z ultrazvočnim anemometrom v Ajdovščini, nameščenim 10 m nad tlemi (Tabela 4), je prišlo do večjih odstopanj. Razlike so opazne tako v hitrosti vetra kot v njegovi smeri. Razlika v smeri je še posebej opazna v Primerih 2 in 3, ko je pri tleh pihala burja. Čeprav so bile hitrosti vetra 10 m nad tlemi in na višini baze oblakov primerljive, so se smeri vetra razlikovale za okoli 130°. Opaženo spremembo smeri z višino dne 16. 3. 2016 potrjuje tudi pojav oblakov ob Kelvin-Helmholtzovem valovanju, ki je posledica strižnih vetrov (Mole et al., 2016), z njo pa se skladajo tudi napovedi povratnih trajektorij modela HYSPLIT za Ajdovščino (Slika 7).

Tabela 4: Primerjava hitrosti in smeri vetra, izmerjenih z daljinskim zaznavanjem, s povprečnimi vrednostmi meritve anemometra v Ajdovščini v istih časovnih intervalih.

Datum	Čas LT	Daljinsko zaznavanje			Anemometer	
		Višina	Hitrost	Smer	Hitrost	Smer
		m	m/s	°	m/s	°
19. 2.	12:55-12:58	1070±77	4,4 ± 0,8	258 ± 13	0,9±0,6	218±85
16. 3.	14:10-14:18	3720±4	8,6 ± 2,1	191 ± 15	9,5±2,6	56±18
17. 3.	7:00-7:10	3370±16	6,2 ± 1,7	182 ± 14	8,2±2,5	49±19
30. 3.	10:00-10:06	2020±5	15,8 ± 1,7	243 ± 18	0,3±0,1	89±42



Slika 7: Povratne trajektorije modela HYSPLIT za zračne mase nad Ajdovščino v dneh 19. 2., 16. 3., 17. 3. in 30. 3. 2016. V času burje (16.-17. 3.) so zračne mase pritekale pri tleh iz severne, severovzhodne strani (rdeče trajektorije), višje v troposferi pa iz jugovzhodne strani (modre in zelene trajektorije).

Zaključek

Razvili smo metodo za merjenje smeri in spodnje meje hitrosti premikanja zračnih mas na višini baze oblakov s kombinacijo aktivnega in pasivnega daljinskega zaznavanja premikanja oblakov. Metodo smo v februarju in marcu 2016 v Ajdovščini preizkusili na štirih testnih primerih v različnih vremenskih pogojih, kjer je bilo razvidno, da se oblaki premikajo. Meritve z daljinskim zaznavanjem se dobro ujemajo z meritvami radijske sondaže v Vidmu in Ljubljani, pri čemer neujemanja pripisujemo krajevni in časovni zamiku med njimi. Izmerjeni odklon smeri vetra v višjih plasteh glede na veter pri tleh med pojavom burje potrjuje opažen nastanek oblakov ob Kelvin-Helmholtzovem valovanju, ki je bilo posledica strižnih vetrov. V vseh testnih primerih se izmerjena smer vetra na višini oblačne plasti dobro ujema z napovedjo poteka povratnih trajektorij modela HYSPLIT.

Metoda nam omogoča meritev smeri in spodnje meje hitrosti vetra z dobro krajevno in časovno ločljivostjo, njena glavna omejitev pa je, da smo vezani na višino najnižje oblačne plasti. Uporabnost metode je nadalje odvisna od stopnje oblačnosti in tipa oblakov, saj

neposredno vplivata na napako pri določanju razdalje do oblakov ter na možnost sledenja posameznih struktur. Izboljšali bi jo lahko z avtomatskim prepoznavanjem vzorcev, kar bi zmanjšalo napako meritve zaradi ročne določitve oznak, ter z optimizacijo dolžine časovnih intervalov med zaporednimi posnetki.

Literatura

- Brez avtorja (1896), Measurement of cloud heights and velocities, *Popular Astronomy*, vol. 4, pp.141-143.
- Chanin, M. L., Garnier, A., Hauchecorne, A., Porteneuve, J. (1989), A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere, *Geophysical Research Letters*, vol. 16, št. 11, <http://dx.doi.org/10.1029/GL016i011p01273>.
- He, T., Gao, F., Stanič, S., Veberič, D., Bergant, K., Dolžan, A., Song, X-Q. (2010), Scanning mobile lidar for aerosol tracking and biological aerosol identification, *Proc. SPIE*, 7832, 7832U 2010, <http://dx.doi.org/10.1117/12.868387>.
- Hooper, W. P., Eloranta, E. W. (1985), Lidar Measurements of Wind in the Planetary Boundary Layer: The Method, Accuracy and Results from Joint Measurements with Radiosonde and Kytoon, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 25, July 1986, 990 - 1001.
- Kovalev, V.A., Eichinger, W.E. (2004). *Elastic Lidar: Theory, Practice and Analysis Methods*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Liu Z-H., Wu, D., Liu, J-T., Zhang, K-L., Chen, W-B., Song, X-Q., Hair, J. W., She, C-Y. (2002), Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter, *Appl. Opt.* 41, 7079-7086.
- Mayor, S. D., Eloranta, E. W. (2001), Two-Dimensional Vector Wind Fields from Volume Imaging Lidar Data. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 40, August 2001, 1331 - 1346.
- Mole, M., Wang L., Stanič S., Bergant K., Eichinger W., Ocaña F., Strajnar B., Škraba P., Vučković M., Willis W. (2016), Lidar measurements of Bora wind effects on aerosol loading, *J.Quant. Spect.* (In Press), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.05.020>.
- Rakovec, J., Vrhovec, T. (2007), *Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike*. DMFA - založništvo, Ljubljana.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. (2015), NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.