

Radarske meritve padavin

Jakob Kralj

MENTOR: izr. prof. dr. Gregor Skok
SOMENTOR: Boštjan Melinc

Seminar, 3. letnik

Oddelek za fiziko, FMF, UL, 2025/2026

Povzetek

Vremenski radar omogoča prostorsko zvezno merjenje padavin z analizo elektromagnetnega signala, odbitega od hidrometeorjev v atmosferi. Seminar začnemo z opisom nastanka in rasti hidrometeorjev. Nato so predstavljene fizikalne osnove njihovega merjenja, tj. interakcija elektromagnetnega valovanja s kapljicami v okviru Miejeve teorije in Rayleighovega približka ter izpeljava razmerja $Z-R$, ki opisuje zvezo med radarsko odbojnostjo in intenziteto padavin. Obravnavane so napake radarskih meritev, ki jih povzročajo variabilnost razmerja $Z-R$, atenuacija, vpliv svetlega pasu ter geometrijske omejitve zaradi ukrivljenosti Zemlje in orografskega zastiranja snopa, skupaj z možnostmi za njihovo korekcijo. Predstavljene so tudi zmogljivosti sodobnih dvopolarimetričnih radarjev, ki omogočajo ločevanje različnih tipov hidrometeorjev in natančnejšo oceno intenzitete padavin.

1 Uvod

Padavine so eden ključnih elementov hidrološkega kroga in imajo neposreden vpliv na človeško družbo – od kmetijstva in upravljanja z vodnimi viri do varstva pred naravnimi nesrečami. Ekstremne padavinske razmere, kot so močne nevihte in nalivi, so lahko vzrok za poplave, zemeljske plazove in druge ujme, ki povzročijo znatno materialno škodo. Zanesljivo merjenje in napovedovanje padavin je zato ena od temeljnih nalog operativne meteorologije.

Klasični merilniki padavin merijo padavine zgolj v točki opazovanja. Za prostorsko zvezno sliko padavinskega polja so takšne meritve nezadostne, zlasti na področjih z redko mrežo postaj ali zahtevnim reliefom [1, str. 57]. Vremenski radar to omejitev preseže z daljinskim zaznavanjem: z analizo moči elektromagnetnega signala, odbitega od hidrometeorjev v atmosferi, je mogoče v realnem času rekonstruirati prostorsko porazdelitev padavin na območjih s premerom več sto kilometrov.

V tem seminarju obravnavamo fizikalne osnove radarskega merjenja padavin. Začnemo z opisom nastanka in rasti hidrometeorjev ter njihove velikostne porazdelitve, ki je ključna za razumevanje radarskega signala. Sledi obravnava interakcije elektromagnetnega valovanja s kapljicami – od Miejeve teorije do Rayleighovega približka – ter izpeljava radarskega odbojnostnega faktorja in zveze med odbojnostjo in intenziteto padavin. Zaključimo s pregledom napak radarskih meritev, ki so posledica različnih virov, npr. variabilnosti razmerja $Z-R$, atenuacije, vpliva svetlega pasu in geometrijskih omejitev, ki izhajajo iz ukrivljenosti Zemlje ali orografskega zastiranja snopa, in so v operativni praksi neizogibne.

2 Tvorba in rast hidrometeorjev

Atmosfera v največji meri sestavljajo optično prozorni plini. Vse opazljive atmosferske pojave imenujemo *meteorji* [2]. Glede na sestavo in način nastanka jih razdelimo v več skupin; za meteorologijo so posebnega pomena *hidrometeorji* – meteorji, sestavljeni iz vode v tekočem ali trdnem agregatnem stanju [3].

Hidrometeorji nastanejo s kondenzacijo, ko atmosfera postane prenasičena z vodno paro, kar se najpogosteje zgodi pri adiabatnem dviganju vlažnega zraka [4].

Kapljice se najprej tvorijo okrog kondenzacijskih jeder, kot so morska sol, prasni delci in produkti zgorevanja [4]. Njihovo rast nato v grobem ločimo na dva režima. Za rast majhnih kapljic (do premera $D \approx 20 \mu\text{m}$) je odgovorna difuzija molekul vodne pare iz okolice, ki se z njimi združujejo. Dominantni mehanizem za rast večjih kapljic je koalescenca, tj. medsebojno trčenje in zlivanje dveh kapljic. Za učinkovito koalescenco mora biti kapljica dovolj velika ($D \gtrsim 40 \mu\text{m}$), da se njena terminalna hitrost padanja signifikantno razlikuje od hitrosti manjših kapljic, ki jih ujame med padanjem. Prehod med obema režimoma še ni povsem razjasnjen. Premer padavinskih kapljic je običajno večji od $200 \mu\text{m}$. Če kapljica pri padanju doseže premer okrog 1 mm , postane nestabilna in jo aerodinamične sile deformirajo iz kroglaste oblike v sploščeni sferoid. Pri premeru nad 5 mm te sile običajno postanejo prevelike in kapljica ponovno razpade na več manjših kapljic [4].

2.1 Velikostna porazdelitev dežnih kapljic

Dokler je njihova rast posledica kondenzacije, je mogoče velikostno porazdelitev kapljic izpeljati analitično [5, str. 105]. Ker pa nadaljna rast od kondenzacijske do dežne kapljice pri tleh ni popolnoma znana, se za praktične namene uporabljajo empirično pridobljene porazdelitve. Opazovanja porazdelitev velikosti dežnih kapljic kažejo, da njihovo število z njihovim premerom pada. Marshall in Palmer sta zato predlagala eksponentno porazdelitev [5, str. 171]:

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D), \quad (1)$$

kjer je N številska gostota kapljic s premerom D , $N_0 = 8 \times 10^3 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ normalizacijska konstanta in $\Lambda = 4.1 R^{-0.21} \text{ mm}^{-1}$ parameter naklona, ki je odvisen od intenzitete padavin R podane v mm h^{-1} . V praksi porazdelitev (1) dobro opisuje povprečja večjih vzorcev v zmernih geografskih širinah [5, str. 172], a sistematično podcenjuje število majhnih ($D \lesssim 1 \text{ mm}$) in preceni število velikih kapljic [6].

Posplošitev Marshall-Palmerjeve porazdelitve je *Ulbrichova oz. gama porazdelitev* [7, str. 214]:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D), \quad (2)$$

z oblikovnim parametrom μ . Pri $\mu = 0$ se enačba (2) reducira na enačbo (1). Pozitivne vrednosti μ ustrezajo porazdelitvam s primanjkljajem velikih kapljic, negativne pa porazdelitvam z njihovim presežkom. V splošnem se uporabljajo vrednosti med $\mu = -3$ in $\mu = 8$ [7, str. 214].

3 Interakcija elektromagnetnega valovanja s kapljicami

3.1 Miejeva teorija sipanja in Rayleighov približek

Natančen opis interakcije ravnega elektromagnetnega vala s homogeno dielektrično kroglo podaja *Miejeva teorija*. V primeru monokromatskega ravninskega valovanja z valovno dolžino λ , ki vпада na kapljico premera D s kompleksnim lomnim količnikom $m = n - i\kappa$, je sipalni presek σ_b podan kot [8, str. 87]:

$$\sigma_b = \frac{\pi D^2}{4\alpha^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (a_n(\alpha) + b_n(\alpha)) \right|^2, \quad (3)$$

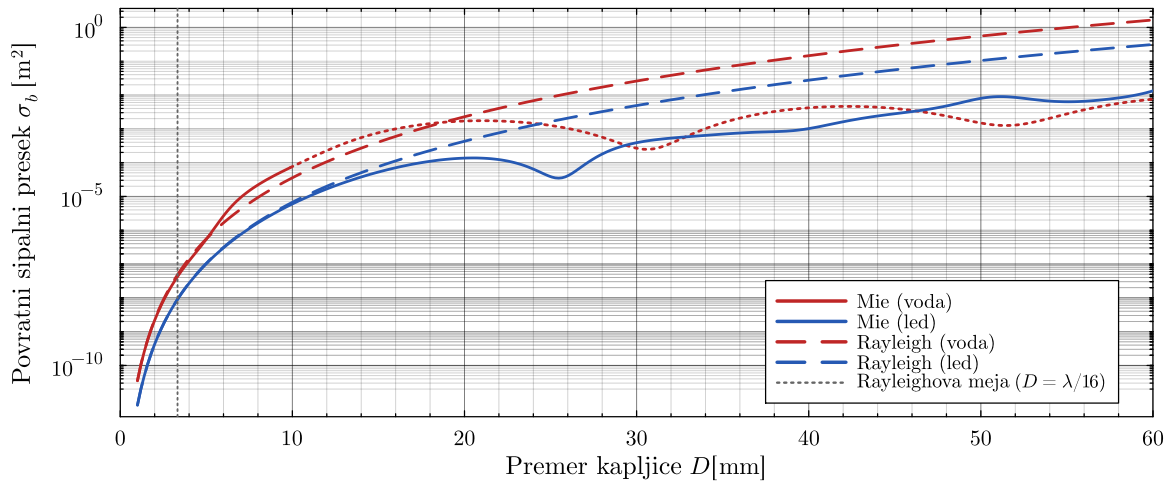
kjer je $\alpha = \pi D/\lambda$ t. i. električna velikost, $a_i(\alpha)$ in $b_i(\alpha)$ pa so *Miejevi koeficienti* podani z Riccati-Besslovimi funkcijami [9, str. 133]. Za $\alpha \ll 1$ (pogosto se uporablja meja $D \leq \lambda/16$ [7, str. 35]) lahko uporabimo Rayleighov približek, ki razvije Riccati-Besslove funkcije v Taylorjevo vrsto in obdrži le linearne člene [10, str. 23]:

$$\sigma_b = \frac{\lambda^2 \alpha^6}{\pi} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} |K_m|^2. \quad (4)$$

Lomni količnik je odvisen od temperature in valovne dolžine, pogosto uporabljene vrednosti za $\lambda \in (0.01 \text{ m}, 0.1 \text{ m})$ so $|K_m|^2 \in (0.91, 0.93)$ za vodo in $|K_m|^2 = 0.18$ za led [7, str. 36].

3.2 Veljavnost Rayleighovega približka

Vremenski radarji delujejo pri različnih valovnih dolžinah, navadno v območju od 1 cm do 10 cm. Dežne kapljice dosežejo velikost v premeru nekje do 10 mm [4, str. 231]. Pri radarjih, ki delujejo pri krajših valovnih dolžinah ($\lambda \approx 3$ cm, t. i. *X-pas*) in pri višjem parameteru α za večje dežne kapljice napaka Rayleighovega približka ni več zanemarljivo majhna, zato je potrebno numerično seštevanje Miejeve vrste (3) do konvergence. Pri radarjih, ki delujejo na srednjih valovnih dolžinah ($\lambda \approx 5$ cm; v tem območju delujeta oba vremenska radarja Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) [11]) je za padavine približek še sprejemljiv, za točo pa ne velja več. Rayleighov približek je zato kljub svoji omejenosti koristen: v Mijevem območju σ_b z D oscilira (slika 1), kar naredi izmerjeno reflektivnost težko interpretabilno.



Slika 1: Povratni sipalni presek za kapljice pri radarskih frekvencah. Primerjava σ_b iz Miejeve teorije in Rayleighovega približka za kapljice centimeterskih velikosti pri frekvenci radarja na Pasji Ravni, $\nu = 5633$ MHz [11]. Rayleighov približek dobro opiše sipalne preseke pri manjših velikostih, kjer merimo dežne kapljice in sneg, odpove pa pri presekih večjih zrnih toče (vodne kapljice okoli premera 1 cm razpadejo, zato je njihov sipalni presek od meje naprej risan pikčasto). Prav tako je na grafu vidna nemonotonost naraščanja sipalnega preseka pri večjih velikostih kapljic, kar otežuje interpretacijo signala. Risano na podlagi enačb (3) in (4).

4 Vremenski radar

4.1 Delovanje vremenskega radarja

Vremenski radar je aktiven daljinsko zaznavalni sistem, ki deluje v mikrovalovnem delu spektra pri valovnih dolžinah $\lambda \sim 1$ cm–10 cm. Valovna dolžina je izbrana glede na vrsto hidrometeorjev, ki nas zanimajo, ter stopnjo atenuacije (tj. šibitve) signala pri prehodu skozi padavine. Radarji delujejo v več standardiziranih frekvenčnih pasovih: pas S ($\lambda \approx 10$ cm, $\nu \approx 3$ GHz) se uporablja, kjer pogosto pričakujemo ekstremne vremenske razmere (npr. *Tornado Alley* v ZDA [12]), saj je atenuacija zanemarljiva tudi pri intenzivnih padavinah [10, str. 45], zahteva pa velike in težke antene (premer okoli 10 m [13]) in zaradi

tega drago konstrukcijo. Pas C ($\lambda \approx 5$ cm, $\nu \approx 6$ GHz) je kompromis med dosegom, atenuacijo in velikostjo antene ter je najpogostejše uporabljen v evropskih operativnih mrežah [14]; pas X ($\lambda \approx 3$ cm, $\nu \approx 10$ GHz) omogoča manjše in cenejše sisteme z visoko prostorsko ločljivostjo, a je pri intenzivnih padavinah atenuacija lahko znatna [15]. Oba slovenska radarja (Lisca in Pasja Ravan) delujeta v pasu C pri $\lambda \approx 5.3$ cm ($\nu \approx 5.6$ GHz) [11].

Radar oddaja elektromagnetno energijo v obliki kratkih pulzov trajanja $\tau \sim 1$ μ s, ki jih ustvari oddajnik EM valov. Zaporedni pulzi si sledijo s frekvenco ponavljanja (ang. *pulse repetition frequency*) $f_r \sim 100$ Hz–1000 Hz [7, str. 32]. Antena (tipično gre za parabolično ogledalo [16, str. 32]) usmerja pulze v ozek snop z zornim kotom $\theta_1 \sim 1^\circ$ in oddano močjo $P_t \sim 10$ kW–100 kW [10, str. 21]. V vmesnih intervalih med oddajanjem ista antena sprejema signal, ki se odbije od hidrometeorjev v atmosferi; minimalni zaznavni sprejeti signal je med 10^{-13} W in 10^{-14} W [16, str. 40].

Razdalja do tarče je določena iz časovnega zamika med oddanim in sprejetim pulzom

$$r = \frac{c \Delta t}{2},$$

kjer faktor 1/2 upošteva, da signal prepotuje pot do tarče in nazaj. Ker je sprejemnik med oddajanjem pulza zakrit, radar ne zazna signalov z razdalj manjših od $r_{\min} = c\tau \approx 150$ m. Poleg tega meritve niso veljavne, dokler radarski sunek ne doseže območja daljnega polja antene, odvisnega od premera antene in frekvenčnega območja, v katerem deluje radar (Na Pasji Ravni se to zgodi bo 650 m). Prav tako mora signal od najoddaljenejša tarče prispeti nazaj, preden radar odda naslednji pulz; to določa maksimalni doseg

$$r_{\max} = \frac{c}{2f_r},$$

ki za $f_r = 1000$ Hz znaša $r_{\max} \approx 150$ km. V praksi operativni radarji dosegajo 150 km–450 km in lahko pokrivajo območja površine 70 000 km²–600 000 km² [17].

Ob začetku meritve radar odda pulz dolžine τ v izbrano smer. Ko žarek vstopi v oblak, se prične sipanje na padavinskih delcih, sipani signal pa se vrača k radarju. Radar začne sipanje zaznavati, ko signal z roba oblaka prispe nazaj do radarske antene. Ob času $t_r = 1/f_r$ radar odda naslednji pulz v isto smer. Do takrat se je do radarja vrnil signal z razdalje maksimalnega dosega $r_{\max}$ [7, str. 64]. Ena radarska meritev predstavlja povprečje sprejetih signalov več (vsaj 32 priporočljivo 40 [18]) zaporednih pulzov [10, str. 49].

Kotna smer (azimut) do tarče je določena z orientacijo antene. Radar med delovanjem sistematično pregleda prostor: antena se zavrti za polni azimut ($\varphi \in [0, 360]$) pri konstantnem elevacijskem kotu θ_e , nato se slednji poveča in postopek se ponovi. Vremenska radarja na Lisci in Pasji Ravni merita pri 12 različnih elevacijskih kotih med 0.5° in 28.4° z ločljivostjo 1° v smeri azimuta [11]. Skupek meritev pri vseh elevacijah tvori poln prostorski zajem (volumska meritev), ki pri operativnih radarjih malo manj kot 5 min.

4.2 Radarska enačba

Radarskemu žarku sledimo od oddaje do sprejema. Če bi radar oddajal izotropno, bi se moč na razdalji od radarja r enakomerno razporedila po sferi površine $4\pi r^2$. Ker pa je

radarska antena usmerjena z ojačitvijo G , se gostota moči v smeri glavnega snopa ustrezno poveča [19]. Gostota moči, ki obseva posamezno kapljico, je tako

$$S_i = \frac{P_t G}{4\pi r^2},$$

kjer je P_t moč oddanega signala. Kapljica del vpadne moči siplje nazaj proti radarju. Sipana moč kapljice je

$$P_i = S_i \sigma_{b,i},$$

kjer je $\sigma_{b,i}$ povratni sipalni presek kapljice. Ker kapljica oddaja signal približno izotropno, je gostota moči, ki prispe nazaj do radarja na razdalji r ,

$$S_{r,i} \approx \frac{P_i}{4\pi r^2}.$$

Radar sprejema signal z efektivno površino A_e , ki za anteno z ojačanjem G znaša $A_e = G\lambda^2/4\pi$ [19]. Sprejeta moč od ene kapljice je tako

$$\begin{aligned} P_{r,i} &= S_{r,i} \cdot A_e = \underbrace{\frac{S_i \sigma_{b,i}}{4\pi r^2}}_{S_{r,i}} \cdot \underbrace{\frac{G\lambda^2}{4\pi}}_{A_e} \\ &= \underbrace{\frac{P_t G}{4\pi r^2}}_{S_i} \cdot \frac{\sigma_{b,i}}{4\pi r^2} \cdot \frac{G\lambda^2}{4\pi} = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \sigma_{b,i}. \end{aligned} \quad (5)$$

Radar ne meri ene same kapljice, ampak s snopom prestreže neko prostornino zraka. Za n kapljic v prostornini V je skupna sprejeta moč kar vsota sprejetih moči posameznih kapljic. Radar oddaja pulz s trajanjem τ , zato je vzdolžna razsežnost merskega volumna $\Delta r = c\tau/2$ (faktor $1/2$ upošteva potovanje tja in nazaj). Moč oddanega signala ni povsod v snopu enaka – najmočnejša je v smeri osi antene in z odmikom od osi slabi. Za krožno parabolično anteno uporabimo približek gaussovske oblike snopa s polovičnima kotoma θ_1 in ϕ_1 v horizontalni in vertikalni ravnini. Z upoštevanjem neenakomerne porazdelitve moči po snopu dobimo efektivni volumen [7, str. 74]

$$V = \frac{\pi}{8 \ln 2} r^2 \theta_1 \phi_1 \frac{c\tau}{2}. \quad (6)$$

Vsoto sipalnih presekov vseh kapljic znotraj volumna izrazimo z volumetričnim koeficientom povratnega sipanja η [7, str. 73]:

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{b,i} = \eta \cdot V, \quad \eta = \int_0^\infty \sigma_b(D) N(D) dD. \quad (7)$$

Z vstavljanjem izraza za posamezno kapljico (5), volumna (6) in koeficienta (7) dobimo *meteorološko radarsko enačbo* [20, str. 9]:

$$\langle P_r \rangle = \underbrace{\frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4}}_{\text{iz (5)}} \cdot \underbrace{\frac{\pi}{8 \ln 2} r^2 \theta_1 \phi_1 \frac{c\tau}{2}}_{\text{iz (6)}} \cdot \underbrace{\eta}_{\text{iz (7)}} = \frac{P_t G^2 \theta_1 \phi_1 c\tau}{512 \sqrt{2\pi} \ln 2} \cdot \frac{\lambda^2 \eta}{r^2}. \quad (8)$$

4.2.1 Faktor reflektivnosti Z

Volumetrični koeficient povratnega sipanja η je odvisen tako od sipalnega preseka $\sigma_b(D)$ kot tudi porazdelitve kapljic $N(D)$. Za sipalni presek upoštevamo Rayleighov približek (4) in ga vstavimo v (7), da dobimo [7, str. 82]:

$$\eta = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} \int_0^\infty D^6 N(D) dD \equiv \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} Z, \quad (9)$$

kjer smo vpeljali *faktor reflektivnosti*:

$$Z = \int_0^\infty D^6 N(D) dD. \quad (10)$$

Uveljavljena enota za Z je $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$. Z vstavljanjem (9) v (8) dobimo obliko radarske enačbe, ki neposredno poveže izmerjeno povratno moč z Z :

$$\langle P_r \rangle = C_r \frac{|K|^2 Z}{r^2}.$$

Zaradi krajšega zapisa smo uvedli radarsko konstanto, ki je definirana kot $C_r = \frac{P_t G^2 \theta_1 \phi_1 c \tau \pi^5}{512 \sqrt{2\pi} \ln 2 \cdot \lambda^2}$. Ker vrednosti Z pri atmosferskih pojavih obsegajo več redov velikosti (od $\sim 10^{-2}$ pri meglici do $\sim 10^6 \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ pri toči), se v praksi uporablja logaritmična enota:

$$Z_{\text{dBZ}} = 10 \log_{10} \left(\frac{Z}{1 \text{mm}^6 \text{m}^{-3}} \right). \quad (11)$$

Tipične vrednosti segajo od praktično 0 dBZ za oblake do 60 dBZ za intenzivne nevihte s točo [7, str. 82].

4.2.2 Razmerje $Z-R$

Radar meri odbojnost, ki nas običajno sama po sebi ne zanima, je pa za meteorologe uporabna, saj jo lahko povežemo z intenziteto padavin. Intenziteta padavin R [mm h^{-1}] je definirana kot tekoči tok volumna vode skozi horizontalno površino

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^\infty D^3 v_t(D) N(D) dD, \quad (12)$$

kjer je $v_t(D)$ terminalna hitrost kapljice premera D in faktor $\pi/6$ upošteva geometrijo krogle. Za terminalno hitrost se pogosto uporablja empirična zveza [21]

$$v_t(D) = \alpha_v D^{\beta_v}, \quad (13)$$

kjer sta za tekoče kapljice v atmosferi $\alpha_v \approx 3.78 \text{m s}^{-1} \text{mm}^{-\beta_v}$ in $\beta_v \approx 0.67$. Za Marshall-Palmerjevo porazdelitev (1) sta integrala v (10) in (12) analitično izračunljiva in iz njiju dobimo potenčno odvisnost

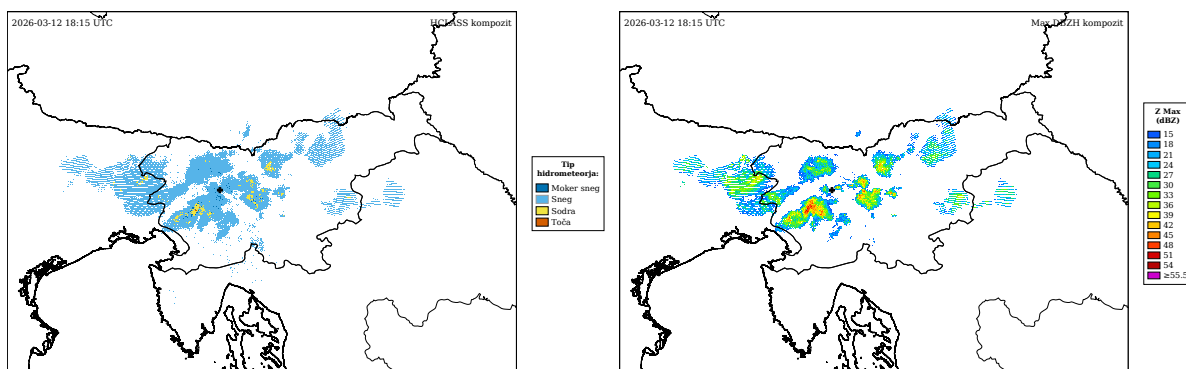
$$Z = a R^b, \quad b = \frac{7}{4 + \beta_v}. \quad (14)$$

Za $\beta_v = 0.67$ dobimo $b \approx 1.50$, kar je blizu empirično izmerjeni vrednosti $b = 1.6$. Konstanta a je odvisna od N_0 (enačba (4)) in vrednosti α_v , pogosto pa se uporablja vrednost

$a = 200$ [7, str. 226]. Izpeljano razmerje ima sicer omejeno uporabnost. Ker je izpeljano z uporabo Marshal-Palmerjeve porazdelitve za velikost kapljic (1), enolično preslika Z v R . V poglavju 2.1 pa smo zapisali, da je v praksi natančnejša gama porazdelitev (2), zato lahko neka vrednost odbojnosti v resnici ustreza različnim vrednostim R za različne kombinacije parametrov N_0 , λ in μ . To lahko v skrajnih pogojih vodi do tudi več kot 40-odstotne napake pri izračunani R (več o tem v poglavju 4.4).

4.3 Dvojna polarizacija

Pri radarskih meritvah samo iz reflektivnosti ne moremo določiti tipa padavin. Ker pa imajo različni tipi hidrometeorjev različne lomne količnike, to vpliva tudi na izračun intenzitete padavin. Horizontalno polarizirano valovanje se namreč od sploščene kapljice odbija z večjo amplitudo kot vertikalno polarizirano. Razlika izvira iz anizotropne polarizabilnosti kapljice, saj njena sploščena oblika omogoča lažjo dielektrično polarizacijo vzdolž daljše vodoravne osi. Zaradi šibkejšega notranjega nasprotnega polja se v vodoravni smeri inducira močnejši dipolni moment, kar vodi do večjega sipalnega preseka in s tem močnejšega povratnega signala [20]. Sodobni dvopolarimetrični radarji izkoriščajo to lastnost z oddajanjem in sprejemanjem signala v obeh polarizacijah. Pri prehodu skozi snop sploščenih kapljic se med horizontalno in vertikalno polariziranim valom ustvari fazna razlika, ker ima horizontalna polarizacija večji efektivni lomni količnik. To omogoča merjenje polarimetričnih spremenljivk in s tem ločevanje različnih tipov padavin v atmosferi, kot je prikazano na sliki 2.



Slika 2: Prikaz meritev različnih tipov padavin na vremenskem radarju na Pasji Ravni. Na karti je mogoče videti različne tipe padavin, ki so bili razločeni s pomočjo dvopolarizacijskega radarja na Pasji Ravni. Lokacija radarja je označena s križcem.

4.4 Napake radarske meritve padavin

Pogosto nas bolj kot trenutna intenziteta padavin zanima skupna količina padavin, ki je padla v nekem časovnem obdobju. Te meritve lahko iz radarskih podatkov dobimo tako, da integriramo preračunano intenziteto padavin po več zaporednih radarskih slikah. Odstopanja takšnih radarskih izračunov urne akumulacije od dežemernih meritev so precejšnja: ob močnih poletnih padavinah znašajo povprečno okoli $\sim 50\%$, pozimi pa napaka naraste celo do $\sim 100\%$ [10, str. 62]. Napake prihajajo iz več virov, ki se pojavljajo hkrati, zato jih v operativni praksi le delno korigiramo.

Osnovni vir negotovosti je variabilnost razmerja $Z-R$. Ker sta Z in R odvisna od različnih momentov porazdelitve $N(D)$ – reflektivnost od D^6 (11), intenziteta pa od $D^{3+\beta_v}$ (12) – enolična preslikava (14) ni povsem ustrezna. Konvektivne in stratiformne padavine ter sneg imajo sistematično različne porazdelitve kapljic, hkrati pa se zaradi vzgornjиков hitrost padanja kapljic tudi močno spreminja. Pri enotnih parametrih (a, b) je napaka v R zato lahko 40 ali več odstotna [10, str. 49].

Pred njegovo uporabo moramo vsak radar najprej kalibrirati. To storimo s primerjavo z drugimi instrumenti, npr. disdrometri ali talnimi padavinomeri, z notranjo kalibracijo [10, str. 46] in z kalibracijo z votlo kovinsko kroglo z znanim sipalnim presekom [22]. Žal pa tudi kalibracija ne more biti popolna, zato je radarska meritev obremenjena tudi s t. i. kalibracijsko napako, ki povzroči konstantni odmik v absolutni vrednosti Z -polja. Na primer, pri $b \approx 1.6$ napaka 1 dB v Z povzroči 16-odstotno napako v R . Dopustna napaka radarske kalibracije odbojnosti navadno znaša ± 1 dB [22, 23].

Atenuacija – šibenje pulza pri prehodu skozi padavine zaradi absorpcije in sipanja – povzroči eksponentno zmanjševanje sprejete moči z razdaljo in sistematično podcenitev reflektivnosti oddaljenih tarč. Atenuacija se s krajšimi valovnimi dolžinami večja, pri X-pasu pa lahko preseže 1 dB/km pri intenzivnih padavinah [16, str. 133]. Atenuacija se prav tako spreminja z vrsto padavin, kar dodatno otežuje odpravljanje napak. K njej lahko prispeva tudi dež, ki zmoči radarsko kupolo [7, str. 43].

V stratiformnih padavinah ustvari plast topljenja snežnih agregatov na izotermini 0°C t. i. *svetlo plast* (ang. *bright band*) z navidezno povišano reflektivnostjo, ker vodna obloga talečih hidrometeorjev bistveno poveča $|K|^2$ in ker so agregati pred razpadom mnogo večji od maksimalne velikosti kapljic pred razpadom. To povzroči precenitev intenzitete padavin, ko radarski žarek zadane to plast [10, str. 51], kar je prikazano na sliki 3.

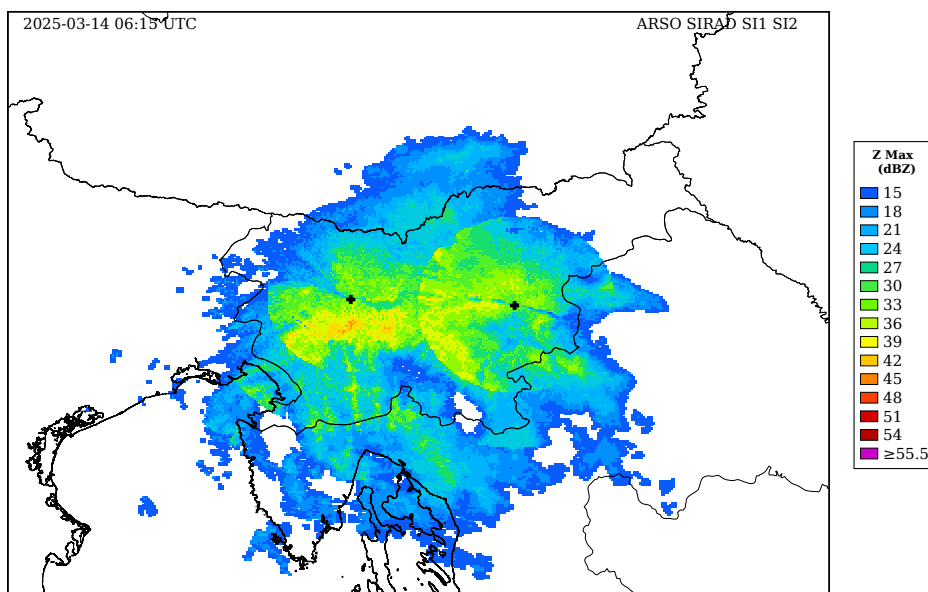
Radarski snop se z razdaljo prostorsko širi, zato merski volumen na večjih razdaljah lahko vsebuje vertikalno nehomogene hidrometeorje. Os snopa pri konstantnem elevacijskem kotu θ_e narašča po višini kot [7, str. 21]:

$$h(d) \approx h_0 + d \sin \theta_e + \frac{d^2}{2R_e},$$

kjer je d razdalja do radarja, h_0 višina antene in $R_e \approx 8500$ km efektivni polmer Zemlje ob upoštevanju standardnega refrakcijskega profila. Pri $r \gtrsim 100$ km za nizke θ_e os snopa preseže padavinsko plast, zato radar podceni površinske padavine.

Pri izračunu R_e se upošteva povprečni vertikalni gradient lomnega količnika n . Ta z višino pada, saj postaja zrak z višino vedno redkejši [7, str. 21]. Talni odmevi (*eng. ground clutter*) so prisotni v vseh razmerah, nastanejo tudi od stranskih snopov antene in jih pri ARSO vremenskih radarjih lahko opazimo vse do elevacije 11° [18]. Pri anomalnem lomu (*superrefrakciji*) pride do dodatnih lažnih odmevov, padec lomnega količnika n je z višino dovolj velik, da se snop ukrivi hitreje od ukrivljenosti Zemlje in se tako dodatno odbija od površja. V skrajnem primeru, ko je inverzija zelo izrazita in plitva, se snop ujame v atmosferski kanal in se znotraj te plasti širi na večje razdalje [7, str. 23]. Odboje površine korigiramo z natančnim digitalnim modelom reliefa in različnim Doplerjivimi filtri, nekatere nizkih padavin, ki nastanejo za orografskimi ovirami, pa z radarjem preprosto ne moremo zaznati (slika 4).

Dodaten vir težav lahko povzroča zelo heterogen stolpec zraka. Če imamo v spodnji plasti zelo suh zrak, v zgornji pa se formirajo padavine, se lahko zgodi, da bodo te na poti do tal v celoti izhlapele [26]. Ta zrak se pri večji oddaljenosti lahko nahaja pod



Slika 3: Krožni artefakti na radarski sliki kot posledica svetlega pasu. Na karti je kompozitna radarska slika obeh slovenskih meteoroloških radarjev, pri čemer gledamo maksimalno odbojnost. Slika je bila posneta v zgodnjem spomladanskem času, v času radarske slike v večini Slovenije pri tleh ni snežilo. Krožni artefakti na sliki so posledica svetlega pasu. Nižje elevacije so zadele padavine že v tekočem stanju, višje elevacije pa so zadele svetli pas.

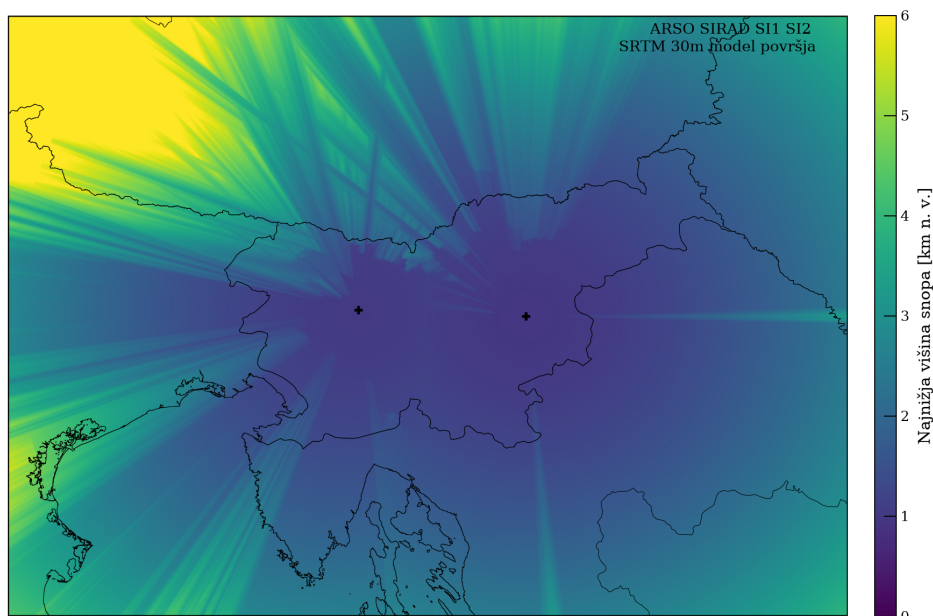
najnižjo elevacijo radarskega snopa - v tem primeru se bomo pri napovedi padavin pri tleh zagotovo zmotili.

Sodobni vremenski radarji v pasu C delujejo pri $\nu \approx 5.6$ GHz, kar sovпада s frekvenčnim območjem brezžičnih omrežij Wi-Fi standarda IEEE 802.11a/n/ac (5.15 GHz–5.85 GHz, pogosto znanimi tudi kot 5 GHz Wi-Fi). Interferenca Wi-Fi signalov lahko povzroči lažne odmeve ali izpad podatkov v posameznih radialih, zlasti v urbanih območjih in ravninskih območjih z veliko gostoto dostopnih točk [27]. Regulatorni okvir EU od leta 2005 zahteva, da Wi-Fi naprave v 5 GHz pasu implementirajo dinamično izbiro frekvenc (DFS), ki se ob zaznanju drugih oddajnikov avtomatsko prestavijo na del frekvenčnega spektra, ki je najmanj zaseden in tako izognejo oddajanju na frekvenci radarja [28]. Nepravilno konfigurirane dostopne točke še vedno povzročajo motnje, ki pa jih lahko pomaga odpraviti uporaba dvopolarizacijskega radarja [29].

5 Zaključek

Vremenski radar omogoča prostorsko zvezno sliko padavinskega polja, ki je z mrežo točkovnih merilnikov ni mogoče pridobiti. Fizikalno jedro radarskega merjenja padavin je razmerje $Z-R$, ki izhaja iz Rayleighove aproksimacije in predpostavljene velikostne porazdelitve kapljic. Kljub enostavnosti te zveze se v praksi izkaže, da enolična preslikava odbojnosti v intenziteto padavin ni mogoča – konvektivne in stratiformne padavine imajo sistematično različne porazdelitve kapljic, sneg pa zahteva povsem ločeno obravnavo.

Napake radarskih meritev so številne in se pojavljajo hkrati: variabilnost razmerja $Z-R$, atenuacija, svetli pas, geometrijske omejitve in elektromagnetne motnje. Nobene izmed



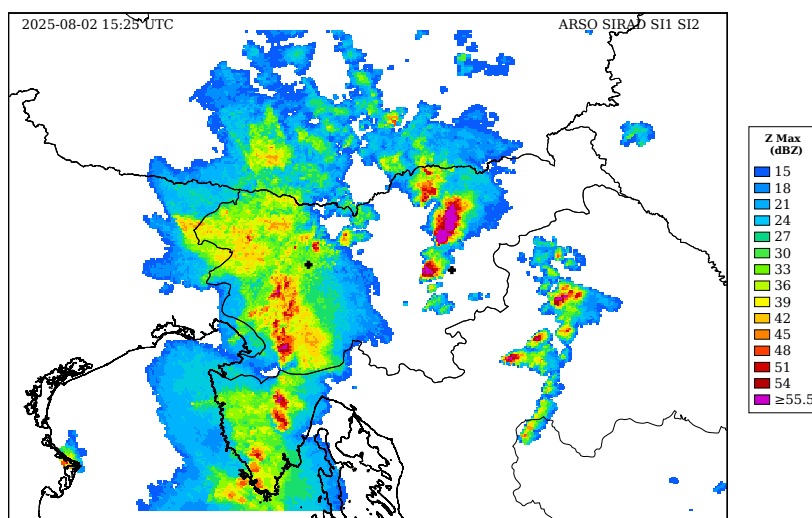
Slika 4: Zastrtost snopa zaradi reliefa. Na karti je prikazana minimalna nadmorska višina padavin, ki jo lahko zazna katerikoli izmed dveh ARSO radarjev pri upoštevanju zastiranja snopa zaradi orografskih ovir, ukrivljenosti Zemlje in loma v atmosferi. Na območjih, kjer je minimalna nadmorska višina zaznanih padavin visoka radar pogostje ne more zaznati padavin, še posebej pa pozimi, ko se te navadno nahajajo nižje v atmosferi [3, str. 8]. Kot model reliefa so bili uporabljeni podatki Nasine misije SRTM s 30-metrsko ločljivostjo [24], elevacije in širine snopa ARSO radarjev pa so povzete iz [25].

njih v operativni praksi ne moremo odpraviti v celoti, temveč jih le delno korigiramo – s primerjavo z dežmeri, dvopolarimetričnimi meritvami ali digitalnimi modeli reliefa. Kljub tem omejitvam radarske meritve ostajajo nepogrešljive, zlasti pri zaznavanju ekstremnih vremenskih pojavov, kot so supercelične nevihte (slika 5), kjer je pravočasni prostorski pregled padavin pogoj za pravočasno opozarjanje.

Sodobni dvopolarimetrični radarji so bistveno razširili diagnostične zmogljivosti. Omogočajo namreč ločevanje tipov hidrometeorjev, boljšo oceno intenzitete padavin in delno odpravo nekaterih sistematičnih napak. Kljub temu ostaja interpretacija radarskih podatkov zahtevna naloga, ki zahteva dobro razumevanje fizikalnih procesov v ozadju.

Zahvala

Zahvaljujem se Antonu Zgoncu in Vitu Švaglju iz Agencije Republike Slovenije za okolje za podatke iz dvopolarimetričnih volumskih radarskih meritev radarja na Pasji Ravni, odgovore na vsa moja vprašanja in kritičen pregled končnega seminarja.



Slika 5: Radarska meritev maksimalne odbojnosti supercelične nevihte. Na karti je kompozitna radarska slika obeh slovenskih meteoroloških radarjev. Prikazana je maksimalna odbojnost, tj. največja odbojnost, ki jo je zaznal katerikoli izmed radarjev pri katerikoli elevaciji nad posamezno točko Zemljinega površja. Na vzhodu države je mogoče videti močnejšo supercelično nevihto [30].

Literatura

- [1] Jože Rakovec in Tomaž. Vrhovec. *Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike*. Elektronska izd. Ljubljana: Fakulteta za matematiko in fiziko, 2024. ISBN: 978-961-6619-39-4.
- [2] Zdravko Petkovšek in sod., ur. *Meteorološki Terminološki Slovar*. Ljubljana: Slovenska akademija znanosti in umetnosti : Društvo meteorologov Slovenije, 1990. 125 **pagetotals**. ISBN: 978-86-7131-040-6.
- [3] Gregor Skok. *Uvod v meteorologijo*. Elektronska izd. Ljubljana: Fakulteta za matematiko in fiziko, 2020. ISBN: 978-961-6619-30-1.
- [4] John Michael Wallace in Peter Victor Hobbs. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. 2nd ed. International Geophysics Series volume 92. Amsterdam Paris: Academic press, 2006. ISBN: 978-0-12-732951-2.
- [5] R. R. Rogers in Man Kong Yau. *A Short Course in Cloud Physics*. Third edition. International Series in Natural Philosophy Volume 113. Burlington, Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 1996. 290 **pagetotals**. ISBN: 978-0-7506-3215-7 978-0-08-057094-5.
- [6] Peeramed Chodkaveekityada in Hajime Fukuchi. "Effect of Raindrop Size Distribution and Rain Rate Inhomogeneity on the Relationship between Attenuation and Depolarization: Effect of Raindrop Size Distribution". V: *International Journal of Satellite Communications and Networking* 36 (15. maj 2017). DOI: 10.1002/sat.1208.
- [7] R. J. Doviak in Dušan S. Zrnić. *Doppler Radar and Weather Observations*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1993. ISBN: 978-0-12-221422-6.

- [8] Peter Ray. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Boston, MA: American Meteorological Society, 2015. 793 **pagetotals**. ISBN: 978-1-935704-20-1.
- [9] Kuo-Nan Liou. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. International Geophysics Series v. 26. New York: Academic Press, 1980. ISBN: 978-0-12-451450-8.
- [10] Christopher G. Collier. *Applications of Weather Radar Systems: A Guide to Uses of Radar Data in Meteorology and Hydrology*. The Ellis Horwood Library of Space Science and Space Technology Series in Remote Sensing. Chichester: Ellis Horwood [u.a.], 1989. 294 **pagetotals**. ISBN: 978-0-470-21449-7 978-0-7458-0510-8.
- [11] Gregor Stržinar in Gregor Skok. "Comparison and Optimization of Radar-Based Hail Detection Algorithms in Slovenia". V: *Atmospheric Research* 203 (1. maj 2018), str. 275–285. ISSN: 0169-8095. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.01.005.
- [12] *Next Generation Weather Radar (NEXRAD)*. National Centers for Environmental Information (NCEI). URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/radar/next-generation-weather-radar> (pridobljeno 18. 5. 2026).
- [13] Phillip B. Chilson in sod. "Estimating Animal Densities in the Aerosphere Using Weather Radar: To Z or Not to Z?" V: *Ecosphere* 3.8 (2012), art72. ISSN: 2150-8925. DOI: 10.1890/ES12-00027.1.
- [14] Nils Gustafsson in sod. "Survey of Data Assimilation Methods for Convective-Scale Numerical Weather Prediction at Operational Centres". V: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144.713 (2018), str. 1218–1256. ISSN: 1477-870X. DOI: 10.1002/qj.3179.
- [15] Vivek N. Mahale, Jerald A. Brotzge in Howard B. Bluestein. "The Advantages of a Mixed-Band Radar Network for Severe Weather Operations: A Case Study of 13 May 2009". V: *Weather and Forecasting* 29.1 (1. feb. 2014), str. 78–98. ISSN: 1520-0434, 0882-8156. DOI: 10.1175/WAF-D-13-00024.1.
- [16] Ronald E. Rinehart. *Radar for Meteorologists: Or You, Too, Can Be a Radar Meteorologist, Part III*. 2. ed. Columbia, Mo: Rinehart Publications, 1991. 334 **pagetotals**. ISBN: 978-0-9608700-7-3.
- [17] EUMETNET OPERA. *EUMETNET OPERA Metadata Database*. 20. mar. 2026. URL: https://www.eumetnet.eu/wp-content/themes/aeron-child/observations-programme/current-activities/opera/database/OPERA_Database/index.html.
- [18] Zgonc Anton. *Vprašanja Povezana s Predstavitvijo "Vremenski Radarji v Sloveniji Nekoč, Zdaj in v Prihodnje"*. E-mail.
- [19] IEEE Antennas and Propagation Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers in IEEE-SA Standards Board, ur. *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 50 **pagetotals**. ISBN: 978-0-7381-8927-7.
- [20] Primož Ribarič. "Prvi poizkus določitve jakosti padavin iz radarskih meritev v dvojni polarizaciji v Sloveniji : diplomsko delo". thesis. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, 2016. URL: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=97501> (pridobljeno 4. 3. 2026).

- [21] David Atlas in Carlton W. Ulbrich. "Path- and Area-Integrated Rainfall Measurement by Microwave Attenuation in the 1–3 Cm Band". V: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 16.12 (1. dec. 1977), str. 1322–1331. ISSN: 1520-0450. DOI: 10.1175/1520-0450(1977)016<1322:PAAIRM>2.0.CO;2.
- [22] Fei Ye in sod. "Weather Radar Calibration Method Based on UAV-Suspended Metal Sphere". V: *Sensors (Basel, Switzerland)* 24.14 (16. jul. 2024), str. 4611. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s24144611. PMID: 39066009.
- [23] Marc Schneebeli in sod. "Calibration of Weather Radars with a Target Simulator". V: *Atmospheric Measurement Techniques* 18.19 (8. okt. 2025), str. 5157–5176. ISSN: 1867-8548. DOI: 10.5194/amt-18-5157-2025.
- [24] NASA JPL. *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 Arc Second*. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2013. DOI: 10.5067/MEASURES/SRTM/SRTMGL1.003.
- [25] Vito Švagelj. "Določanje radialne komponente vetra iz meritev Dopplerjevega radarja". thesis. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, 2020. URL: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=121908> (pridobljeno 11.1.2026).
- [26] Steven M. Martinaitis in sod. "A Real-Time Evaporation Correction Scheme for Radar-Derived Mosaicked Precipitation Estimations". V: *Journal of Hydrometeorology* 19.1 (1. jan. 2018), str. 87–111. ISSN: 1525-7541, 1525-755X. DOI: 10.1175/JHM-D-17-0093.1.
- [27] *Motenje Meteoroloških Radarjev*. URL: <https://arhiv.akos-rs.si/motenje-meteoroloskih-radarjev> (pridobljeno 18.3.2026).
- [28] *2005/513/EC: Commission Decision of 11 July 2005 on the Harmonised Use of Radio Spectrum in the 5 GHz Frequency Band for the Implementation of Wireless Access Systems Including Radio Local Area Networks (WAS/RLANs) (Notified under Document Number C(2005) 2467) (Text with EEA Relevance)*. 11. jul. 2005. URL: <http://data.europa.eu/eli/dec/2005/513/oj> (pridobljeno 25.3.2026).
- [29] Slovensko meteorološko društvo, director. *Vremenski Radarji v Sloveniji Nekoč, Zdaj in v Prihodnje*. 15. jun. 2024. URL: https://www.youtube.com/watch?v=0n1oHaIh_rQ (pridobljeno 27.2.2026).
- [30] Urad za meteorologijo, hidrologijo in oceanografijo. *Neurja 1. in 2. Avgusta 2025*. Agencija Republike Slovenije za okolje, 6. avg. 2025.