

RADARSKO MERJENJE PADAVIN: UPORABA VERTIKALNIH PROFILOV ODBOJNOSTI

Marjan DIVJAK

Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, Ljubljana

SUMMARY

Radar measurements at long ranges lead to a systematic range-dependent underestimation of rainfall. The main reason for the underestimation lies in an inability to perform radar measurements close to the ground due to orography and radar beam geometry, combined with the average decrease of rainfall rates with height. By using a postulated vertical reflectivity profile, it was possible to reduce the underestimation of surface precipitation at all ranges. At 100 km, the percentage of rainfall measured increased from 40 % to 100%.

POVZETEK

Pri velikih razdaljah izmeri radar manj padavin kot dežemeri na tleh. Glavni razlogi za to so višina radarskega snopa nad zemeljsko površino, njegova širina in vertikalna nehomogenost padavin. S postuliranjem povprečnega vertikalnega profila odbojnosti se natančnost radarskih meritev izboljša pri vseh oddaljenostih. Pri razdalji 100 km se poveča delež izmerjene količine padavin od 40% na 100%.

1. UVOD

Mikrovalovni radar omogoča merjenje odbojnosti padavin z veliko prostorsko in časovno ločljivostjo. Uporabnost teh meritev za določanje količine padavin je bila zato predmet številnih raziskav. Pregled izsledkov so podali, na primer, Wilson in Brandes (1979), Doviak (1983) ter Joss in Waldvogel (1990).

Pri določanju natančnosti radarskih meritev je potrebno razlikovati med eksperimentalnimi in operativnimi meritvami. Eksperimentalne meritve potekajo pri kratkih razdaljah in primerno nizko nad zemeljsko površino. V takih pogojih merjenja so dosežene natančnosti dokaj velike. Harrold (1974) na primer poroča, da se radarsko izmerjene urne akumulacije padavin nad območji velikosti 50 km² razlikujejo od optimalno določenih za približno 20%. Podaljšanje časovnega intervala na 6 ur ali povečanje območja na 500 km² zmanjša razlikovanje na 13%. Pri operativnih meritvah, ki potekajo pri velikih razdaljah in nad razgibano površino, so dosežene natančnosti dosti manjše. Po Collierju (1983) ležijo razmerja med radarskimi meritvami R in talnimi meritvami G urnih akumulacij na

intervalu med 0.5 in 2.0 v 86% primerov. Z naraščajočo razdaljo se povprečna razmerja R/G manjšajo.

Odvisnost razmerij R/G od razdalje (in še česa) je mogoče ugotoviti statistično in dobljeni rezultat uporabiti za korekcijo radarskih meritev. Boljša pot je naslednja: ugotoviti je potrebno razloge za podcenitev in jih primerno upoštevati. Glavne razloge je med prvimi prepoznal Joss (1981): radar zaradi hribovitosti in zakrivljenosti zemeljske površine ne more meriti blizu tal, jakost padavin pa z višino v splošnem pojema. Kako upoštevati vertikalno nehomogenost padavin, je pokazal Koistinen (1992). V članku je razvit podoben način in prikazana njegova poenostavljena uporaba.

2. OSNOVE MERJENJA IN IZVORI NAPAK

Moč radarskega odmeva P od množice dežnih kapljic v radarskem snopu na razdalji med r in $r + h/2$, pri čemer je h dolžina radarskega pulza, je podana z enačbo

$$P = \frac{C}{r^2} Z, \quad (1)$$

kjer je C konstanta, vsebujoča radarske parametre, $Z = \sum D_i^6 / V$ pa odbojnost dežnih kapljic, določena z njihovimi premeri D_i in številčnostjo na prostorninsko enoto V .

Odbojnost padavin Z je povezana z jakostjo padavin I :

$$Z = aI^b. \quad (2)$$

Konstanti a in b sta odvisni od porazdelitve kapljic po velikosti. Enačbi (1) in (2) omogočata določevanje jakosti padavin iz izmerjenih moči in oddaljenosti radarskih odmevov. Veljata bolj ali manj natančno, odvisno od tega, kako dobro so izpolnjene določene merilne predpostavke. Pri eksperimentalnih meritvah v bližini radarja povzročajo največjo napako spreminjajoča se porazdelitev kapljic po velikosti. Pri operativnih meritvah prevladajo drugi vzroki napak, predvsem neenakomerna zapolnjenost merilne prostornine s padavinskimi delci in vertikalna nehomogenost padavin.

3. VERTIKALNI PROFILI ODBOJNOSTI

Enačba (1) velja le v primeru, če je odbojnost padavin porazdeljena po merilni prostornini enakomerno. Pri velikih razdaljah postane premer radarskega snopa velik in odbojnost po preseku snopa se lahko znatno razlikujejo. Omejimo se na primer, da je odbojnost v merilni prostornini neodvisna od razdalje r . Potem zapišemo enačbo (1) v splošnejši obliki

$$P = \frac{C}{r^2} \int Z f d\Omega. \quad (3)$$

$Z d\Omega$ smo označili element prostorskega kota v poljubni smeri od radarske antene, s f pa njen normirani dvosmerni diagram, $\int f d\Omega = 1$. Seštevanje odmevov poteka po prostorskem kotu, kjer je f znatno različen od nič, to je po radarskem snopu. Privzamemo, da snop ni nikjer blokiran. Merilna prostornina z neenakomerno porazdeljeno odbojnostjo Z povzroči enako močan odmev P kot ista prostornina z enakomerno porazdeljeno in ustrezno veliko odbojnostjo Z_e :

$$Z_e = \int Z f d\Omega \quad (4)$$

Kakšna je porazdelitev odbojnosti v merilni prostornini, katere odmev radar izmeri, iz same meritve jakosti odmeva ne moremo zvedeti. Z uporabo enačbe (1) lahko določimo le ekvivalentno odbojnost Z_e . Ta odbojnost je v splošnem različna od odbojnosti padavin v katerikoli točki merilne prostornine in seveda tudi od odbojnosti padavin Z_g pri tleh pod njo.

Izmerjena odbojnost Z_e in odbojnost pri tleh Z_g se torej v splošnem razlikujeta. Faktor razlikovanja definiramo kot

$$A = 10 \log(Z_e/Z_g). \quad (5)$$

Če torej na kakršenkoli način uspemo določiti faktor razlikovanja za izbrano merilno prostornino, je z meritvijo njene ekvivalentne odbojnosti določena tudi odbojnost pri tleh in z njo talna jakost padavin.

Faktor razlikovanja lahko določimo takole. Predpostavimo, da je v izbrani merilni prostornini in pod njo do tal odbojnost odvisna le od višine in da poznamo njen relativni profil $Z(z)/Z_g$. Ta profil ali postuliramo, ali izpeljemo iz modela padavinskih procesov, ali izmerimo z radarjem nad primernim območjem in predpostavimo njegovo reprezentativnost. Iz tako predpostavljenega profila izračunamo faktor razlikovanja z uporabo enačb (4) in (5). Pri tem lahko enačbo (4) poenostavimo na naslednji način.

V smeri maksimuma diagrama f , to je na osi radarskega snopa, definiramo pri razdalji r dve na os snopa pravokotni koordinatni osi, horizontalno os x in "vertikalno" os y . Izhodišče tako definirane koordinatnega sistema je na višini h nad zemeljsko površino. Vpeljemo brezdimenzijski spremenljivki $\alpha = x/r$ in $\beta = y/r$. Omejimo se na ozek snop, da velja $d\Omega \approx d\alpha d\beta$. Za nizke elevacijske kote snopa se integral (4) poenostavi v obliko

$$Z_e(h) = \int Z(h + r\beta) F(\beta) d\beta. \quad (6)$$

Integracija poteka po vertikalnem kotu β glede na os snopa. Količina $F(\beta) = \int f(\alpha, \beta) d\alpha$ je horizontalno integrirani diagram antene, odvisen od njene oblike. Za anteno v obliki rotacijskega paraboloida velja kot dober približek

$$f \propto e^{-\theta^2/\theta_1^2} = e^{-\alpha^2/\theta_1^2} e^{-\beta^2/\theta_1^2},$$

pri čemer je θ kot od osi snopa, θ_1 pa njegova karakteristična širina, povezana s širino snopa med 3 dB točkama, $\theta_1 = \theta_0/\sqrt{8 \ln 2}$.

4. UPORABNOST VERTIKALNIH PROFILOV ODBOJNOSTI

Uporabnost vertikalnih profilov odbojnosti smo preverili na podatkih o radarskih in talnih meritvah padavin v Sloveniji. Osnovno podatkovno bazo sestavlja približno 600 parov hkratnih radarskih in talnih meritev urnih akumulacij padavin nad osmimi dežemernimi postajami. Meritve so potekale poleti 1991 z radarjem na Lisci. Radarsko določene padavine so izračunane po enačbi (2) iz izmerjenih maksimalnih odbojnosti v vertikalnem stolpcu preseka 2×2 km nad vsako postajo.

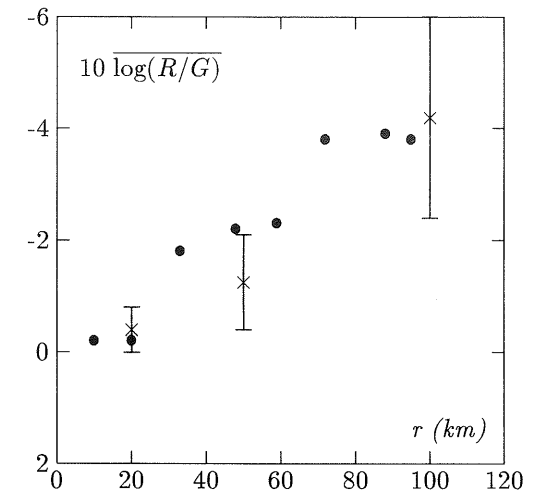
<i>N</i>	<i>Postaja</i>	<i>r</i> (km)	$10 \overline{\log R/G}$
1	Planina	10	-0.2
2	Celje	20	-0.2
3	R. Slatina	33	-1.8
4	Šmartno	48	-2.2
5	Maribor	59	-2.3
6	Polički Vrh	72	-3.8
7	Radenci	88	-3.9
8	M. Sobota	95	-3.8

Tabela 1: Radarske (*R*) in talne (*G*) meritve padavin

V tabeli 1 so podane povprečne razlike med radarskimi meritvami *R* in talnimi meritvami *G* urnih akumulacij. Podcenitev padavin pri velikih razdaljah je očitna. Pri razdalji 100 km znaša povprečni faktor $\log^{-1} \overline{\log R/G} \approx 0.4$. Radar izmeri le 40% padavin. Podroben opis meritev in rezultatov je podal Divjak (1992).

Opaženo podcenitev pojasnimo z vertikalnimi profili odbojnosti. Privzamemo naslednjo obliko profila: od tal do višine h_0 je odbojnost konstantna, nato pa z naraščajočo višino pojema z gradientom 10 dB/km. Razmejitevna višina h_0 je višina izoterme 0° C. Izbrana oblika profila je poenostavljena oblika profilov, ki jih je izmeril Koistinen (1992).

Višina h_0 se od dne do dne spreminja. Ker nam gre le za oceno, vzamemo njeno povprečje v obdobju meritev, $h_0 \approx 3$ km.



SLIKA 1: Izračunane (×) in izmerjene (●) podcenitve padavin

Pri radarskih podatkih RC Lisca je, žal, na razpolago le maksimalna odbojnost v vertikalnem stolpcu nad dežemerno postajo, ne pa tudi višina, na kateri je bila ta odbojnost izmerjena. Privzamemo, da je bila odbojnost izmerjena pri tistem elevacijskem kotu, ki se pri dani razdalji najbolj približa višini h_0 . Predpostavka je smiselna, ker se maksimalne odbojnosti večinoma pojavljajo prav na višini izoterme 0° C, kjer se padajoči ledeni delci talijo. Za razdalje 20, 50 in 100 km ležijo elevacijski koti RC Lisca, ki pridejo v poštev, na intervalih 5-6, 2-2.5 in 1-1.5 stopinj, upoštevajoč radarjevo nadmorsko višino 1 km in implementirane nabore kotov. Podcenitvene faktorje *A* pri naštetih oddaljenostih izračunamo iz enačb (5) in (6). Za širino radarskega snopa vzamemo vrednost $\theta_0 = 1^\circ$.

Pri različnih oddaljenostih izračunani faktorji *A* opisujejo ustrezne podcenitve odbojnosti. Podcenitve količine padavin pa opisujejo faktorji *A/b*, pri čemer je $b = 1.6$ eksponent v enačbi (2). Prikazani so na sliki 1 v obliki navpičnih intervalov. Polni krožci označujejo izmerjene podcenitve padavin, povzete iz tabele 1. Kljub uporabljenim poenostavitvam je opazno dobro ujemanje med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi. Rezultati pri velikih oddaljenostih so zelo občutljivi za nenatančnosti v elevacijskem kotu snopa.

Vertikalne profile odbojnosti lahko torej s pridom uporabimo pri radarskih meritvah padavin. Že z grobo ocenitvijo profila je možno popraviti podcenitve povprečnih

akumulacij pri vseh oddaljenostih. Pri 100 km se, na primer, poveča delež izmerjene količine padavin od 40% na 100%. Ali je mogoče z uporabo bolj podrobnih profilov zmanjšati tudi sipanje posameznih meritev okrog povprečnih vrednosti, pa bo potrebno še raziskati.

5. ZAKLJUČKI

Radar pri velikih razdaljah v povprečju podceni količino padavin. Zaradi hribovitosti in zakrivljenosti zemeljske površine namreč ne more meriti blizu tal, jakost padavin pa z višino v splošnem pojema. Z upoštevanjem povprečnega vertikalnega profila odbojnosti se razlike med radarskimi in talnimi meritvami urnih akumulacij pri vseh oddaljenostih zmanjšajo. Najočitneje se natančnost meritev izboljša pri velikih razdaljah. Pri razdalji 100 km se poveča delež izmerjene količine padavin od 40% na 100%.

LITERATURA

- Collier, C. G. et al. (1983): A weather radar correction procedure for real-time estimation of surface rainfall. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 109, pp. 589-608.
- Divjak, M. (1992): Operational Radar Measurement of Precipitation: The Accuracy of Point Estimates of Hourly Accumulations. *Preprints 2nd Conf. on Hyd. Appl. of Weather Radar*, Hannover, v tisku.
- Doviak, R. J. (1983): A survey of radar rain measurement techniques. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 22, pp. 832-849. Harrold, T. W. et al. (1974): The accuracy of radar-derived rainfall measurements in hilly terrain. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 100, pp. 331-350.
- Joss, J. and A. Waldvogel (1990): Precipitation measurement and hydrology. *Radar in meteorology*, Atlas, D. (Ed.), Boston, Amer. Meteor. Soc., pp. 577-618.
- Joss, J. and G. Galli (1981): Digital radar information in the Swiss Meteorological Institute. *Preprints 20th Conf. Radar Meteorology*, Boston, Amer. Meteor. Soc., pp. 194-199.
- Koistinen, J. (1992): Operational correction of radar precipitation errors due to the vertical reflectivity profile. *Preprints 2nd Conf. on Hyd. Appl. of Weather Radar*, Hannover, v tisku.
- Wilson, J. W. and E. A. Brandes (1979): Radar measurement of rainfall - a summary. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60, pp. 1048-1058.