

# Pomen radarjev v sistemu obrambe pred točo

*Marjan Divjak*

Hidrometeorološki zavod Slovenije

## Uvod

Obramba pred točo v Sloveniji [leta 1988] temelji na predpostavki, da se bo zmanjšala kinetična energija iz nevihtnega oblaka izpadajočih zrn toče, če bo oblak posipan na pravem mestu, ob pravem času in s pravo količino zaledenitvenih jeder. Pravo mesto, čas in količina jeder so v splošem odvisni od tipa in razsežnosti oblaka ter od trenutnega poznavanja fizike padavin. V vsakem primeru pa je potrebno določiti vsaj lego, razsežnost in strukturo oblaka, po možnosti pa še območje s točo in notranje gibanje zraka, ter iz vsega tega odločiti, ali/kako bomo oblak posipali. Najprimernejše sredstvo za to je brez dvoma vremenski radar. V prispevku je prikazana primernost takega radarja za potrebe obrambe pred točo in podano je mnenje o njegovi optimalni izbiri za ozemlje velikosti okrog  $100 \times 100$  km. Omejili se bomo na standardne impulzne radarje z mehansko parabolično anteno in izpustili napredne sisteme s stisnjenimi impulzi in elektronsko krmiljenimi snopi, saj se v meteorologiji zaenkrat še ne uporabljajo.

## 1. Osnove radarskega merjenja oblakov

Osnovni deli vremenskega radarja so oddajnik, antena in sprejemnik. Oddajnik tvori zaporedje paketov elektromagnetnih valov – radarske impulze, antena pa jih usmerja v ozek prostorski kot – radarski snop. Izsevani paket potuje skozi atmosfero s svetlobno hitrostjo in če naleti na oviro (letalo, hrib, oblačne delce), se na njej sipa. Del valov se sipa nazaj, kjer jih z isto anteno zazna sprejemnik. Z lego antene je določena smer, v kateri leži ovira; s časom zakasnitve odmeva je določena oddaljenost ovire; z vrnjeno močjo je določena odbojnost ovire; s spremembo faze vračajočih se valov pa je določena radialna hitrost njenega gibanja.

Krmiljenje sodobnega radarja in obdelavo njegovih izmerkov opravlja računalnik. Radarska antena je lahko stalno usmerjena v izbrano smer ali pa se poljubno obrača; tipično se vrtili okrog navpične osi pri spreminjajočih se nagibnih kotih. Radarski izmerki iz vseh oddaljenosti iz trenutnih smeri se sproti shranjujejo v računalnikov pomnilnik, kjer se uvrščajo v tridimenzionalno polje – radarsko sliko atmosfere. Način obračanja antene, obdelava in prikaz zbranih podatkov pa so odvisni od namena radarskega opazovanja.

Merodajne značilnosti radarskega sevanja so njegova valovna dolžina  $\lambda$ , polarizacija, dolžina impulza  $\tau$ , moč v impulzu  $P_0$ , frekvenca impulzov  $1/T$  in kotna širina snopa  $\theta_0$ . Osnovne količine, ki jih radar izmeri v obsevani točki atmosfere s hidrometeorji, pa so njihova radarska odbojnost  $Z$  (definirana kot vsota šestih potenc premerov vseh "idealnih" sipalcev v volumski enoti, ki bi dali enak odmev kot aktualni sipalci), povprečna radialna hitrost  $v$  in

dispersija te hitrosti  $\sigma_v$ . Koherentni (Dopplerjevi) radarji merijo vse tri navedene količine, nekoherentni (konvencionalni) pa le prvo.

## 2. Določevanje lege in strukture oblaka

Lega in struktura nevihtnega oblaka sta podani s poljem njegove radarske odbojnosti. Čim ožji je radarski snop in čim krajši je radarski impulz, tem večja je prostorska ločljivost pri merjenju. Cena, ki jo je treba za to plačati, je daljši čas merjenja za isti izbrani prostor. Čim krajša je valovna dolžina radarskega valovanja enake gostote moči, tem drobnejše sipalce lahko radar zazna, vendar velja to le za tiste sipalce, ki so radarju najbližji. Zaradi sipanja je namreč kratkovalovni snop močno dušen pri prodiranju skozi oblak. Nasprotno pa dolgovalovni snop z enako gostoto moči sicer zaznava le večje sipalce, vendar je zato precej manj dušen. Vsekakor je Dopplerjev radar dosti boljši od konvencionalnega, ker učinkovito filtrira odmeve od stalnih ovir, predvsem hribov.

Med najprimernejše radarje za natančno določanje lege in strukture nevihtnih oblakov spada močan ( $P_0 = 1$  MW) dolgovalovni ( $\lambda = 10$  cm) radar z ozkim snopom ( $\theta = 1^\circ$ ). Velika moč je potrebna zato, ker se dolgi valovi slabo sipajo, odmev pa mora biti kljub vsemu dovoljšen, da ga sprejemnik še zazna. Ker je širina snopa sorazmerna z valovno dolžino sevanja in obratnosorazmerna s premerom antene, je za tak radar potrebna antena s premerom celih 8 m. Najprimernejše območje merjenja leži do razdalje 100 km, kjer postane snop širok že 2 km in prostorska ločljivost temu primerno slaba. V vsakem primeru mora radar delovati z dovolj nizko frekvenco, da ne motijo odmevi od predhodno izsevanih impulzov izza merilnega dosega. Ta doseg je obratno sorazmeren s frekvenco. Vrednost  $1/T = 500$  /s že zagotavlja doseg 300 km, kar je ponavadi dovolj.

Tehnične zahteve za postavitve in vzdrževanje dolgovalovnega radarja ozkega snopa so zelo visoke in temu primerni so seveda tudi stroški. Zlasti moti velikost antene in neprijetnosti, ki so s tem povezane. Manjša antena omili te težave, vendar povzroči naslednjo dilemo: ali ohraniti valovno dolžino in povečati širino snopa, ali pa ohraniti širino snopa in zmanjšati valovno dolžino. Rešitev dileme v splošnem ni lahka, vendar se zdi, da je bolje ohraniti veliko prostorsko ločljivost radarja in deloma žrtvovati njegovo prodornost kot pa obratno, zlasti še zato, ker se zaradi večjih odbojnosti hidrometeorjev pri manjših valovnih dolžinah moč radarja lahko ustrezno zmanjša. Mogoče najboljša kompromisna rešitev se zdi srednje močan ( $P = 250$  kW) srednjevalovni ( $\lambda = 5$  cm) radar ozkega snopa ( $\theta = 1^\circ$ ) in zato srednje velike antene ( $D = 4$  m).

## 3. Določevanje območij s točo

Sipalci v oblaku so različnih vrst: dežne kaplje, ledeni kristalčki in ledena zrna. Zaenkrat ni zanesljive metode, ki bi omogočala določiti vrsto sipalcev na poljubnem mestu v nevihtnem oblaku le iz radarskih izmerkov. Posebej velja to za detekcijo zrn toče. Vseeno pa je možno dobiti približno informacijo o njihovi prisotnosti. Dokaj preprosti in še kar zanesljivi so naslednji trije načini.

(i) Premeri vodnih kapljic ne morejo biti poljubno veliki, saj se večje kaplje začno kmalu razletavati. Ponavadi njihov premer ne preseže 8 mm. Prav tako je število kapljic na volumsko enoto navzgor omejeno: tistih s premeri

nad 1 mm, ki največ prispevajo k radarski odbojnosti, je le nekaj v kubičnem metru. Njihova radarska odbojnost je torej tudi navzgor omejena in ponavadi ne presega  $10^5 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ . Odbojnosti nad tem pragom torej pomenijo prisotnost večjih sipalcev – zrn toče. Nasprotno pa manjše odbojnosti ne pomenijo vedno, da toče ni.

(ii) Radarska odbojnost sipalcev je neodvisna od valovne dolžine radarskega valovanja le, če so sipalci majhni v primerjavi z njo. Za sipalce s premerom nad 2 cm postane odbojnost  $Z_{10}$  pri 10-centimetrskih valovih večja od odbojnosti  $Z_5$  pri 5-centimetrskih valovih. S skoraj istočasnim merjenjem istega mesta v oblaku z valovi različnih valovnih dolžin je mogoče izmeriti obe radarski odbojnosti ter iz njunega razlikovanja sklepati na prisotnost toče. Metoda je dokaj zanesljiva le za radarju najbližje sipalce; pri bolj oddaljenih postane namreč  $Z_5$  manjša od  $Z_{10}$  že zaradi večjega dušenja kratkih valov in ne le zaradi prisotnosti toče.

(iii) Večje kaplje so sploščene zaradi relativnega padanja glede na zrak; njihov horizontalni premer je večji od vertikalnega. Odbojnost  $Z_H$ , izmerjena s horizontalno polariziranim valovanjem, je zato večja od odbojnosti  $Z_V$ , izmerjene z vertikalno polariziranim. Nasprotno pa so zrna toče okrogla in obe odbojnosti se znatno ne razlikujeta. S skoraj istočasnim merjenjem z valovanji dveh različnih polarizacij je mogoče izmeriti obe odbojnosti in iz njunega razlikovanja sklepati na prisotnost toče.

Izmed naštetih metod je najboljša dvopolarizacijska metoda. Med najprimernejšimi radarji za določev območij s točo v nevihtnih oblakih je torej radar, ki spreminja polarizacijo izsevanega valovanja od impulza do impulza, druge lastnosti pa ima takšne, kot so primerne za merjenje ene same odbojnosti.

#### **4. Določevanje lege in jakosti zračnih tokov**

Lego in jakost vertikalnih zračnih tokov v nevihtnem oblaku je možno oceniti kar iz polja odbojnosti. Bolj natančno jih je možno določiti iz polja radialnih hitrosti sipalcev, hkrati pa odkriti tudi izrazitejše horizontalne vrtince. Popolno vektorsko polje hitrosti pa je v splošnem možno določiti le iz dveh ali več polj radialnih hitrosti, približno sočasno izmerjenih z različnih merilnih mest.

(i) Približno cilindrična območja z veliko radarsko odbojnostjo, ki se raztezajo do tal, kažejo izpadajoče hidrometeorje in precej dobro sovpadajo s spuščajočimi se zračnimi tokovi. Vzponski tokovi se nahajajo pred spuščajočimi se tokovi v smeri gibanja oblaka. Ponavadi so pomaknjeni rahlo v desno. Čim močnejša in razsežnejša so območja izpadanja hidrometeorjev, tem močnejši in razsežnejši so ustrezni zračni tokovi.

(ii) Radialne hitrosti sipalcev v horizontalnih presekih zgornje troposfere (na višini okrog 10 km) tvorijo ponekod značilne vzorce, ki so tipični za divergentno horizontalno raztekanja zraka, to pa je posledica vertikalnega dotoka zraka iz spodnjih plasti troposfere. Opaženi vzorci torej izdajajo lego vzponskih tokov. Iz velikost in jakosti vzorcev je možno sklepati na razsežnost in jakost vzponskih tokov. Če relief ni preveč izrazit, je možno podobne divergentne vzorce odkriti tudi v horizontalnih presekih spodnjih plasti troposfere (na višini 1 km). V tem primeru pa vzorci izdajajo lego spuščajočih se zračnih tokov. Poleg divergentnih vzorcev je včasih možno v

poljih radialnih hitrosti v spodnjih plasteh troposfere odkriti tudi vzorce vrtničnega gibanja zraka. Taki vzorci označujejo lego rotirajočih vzponskih zračnih tokov.

(iii) Z dvema radarjema izmerjeni radialni hitrosti sipalcev na istem mestu v oblaku omogočata, da določimo horizontalni vektor hitrosti izraka. V splošnem je treba pri tem upoštevati hitrost padanja sipalcev glede na zrak, ki pa je precej dobro določena kar z lokalno radarsko odbojnostjo. Polje vertikalnih hitrosti zraka je določeno s poljem horizontalnih vektorjev hitrosti ob upoštevanju anelastične aproksimacije za kontinuitetno enačbo zraka. Tri različna merilna mesta omogočajo neposredno določiti tridimenzionalni vektor hitrosti. Vendar pa je vertikalna komponenta hitrosti pogosto izmerjena nenatančno, ker poteka merjenje večinoma pri nizkih nagibnih kotih in vertikalna hitrost sipalcev le malo prispeva k izmerjenim radialnim hitrostim. Tako je v praksi tudi v primeru uporabe treh radarjev potrebno vertikalne hitrosti določati posredno.

Izmed naštetih metod za merjenje zračnih tokov v oblakih je najboljša metoda s tremi Dopplerjevimi radarji, skoraj prav tako dobra pa je tista z dvema. En sam Dopplerjev radar za to ni kaj dosti vreden, še precej slabši pa je seveda konvencionalni radar. Med najprimernejše Dopplerjeve radarje spadajo tisti z veliko močjo ( $P_0 = 1$  MW), dolgo valovno dolžino ( $\lambda = 10$  cm) in ozkim snopom ( $\theta = 1^\circ$ ). Delovati morajo z dovolj visoko frekvenco impulzov, da zmorejo meriti velike hitrosti. Maksimalna merljiva hitrost je namreč sorazmerna s frekvenco impulzov in z valovno dolžino. Vrednost  $1/T = 500$  /s omogoča meritve komaj do 12.5 m/s, kar je premalo. Potrebno je vsaj podvojiti frekvenco, vendar se s tem žal razpolovi merilni doseg radarja. Zato je najbolje, če deluje radar z dvema medsebojno zamaknjenima frekvencama v majhnem celoštevilčnem razmerju, saj lahko tako meri dva- do trikrat večje hitrosti, kot jih sicer.

Izbira med dolgovalovnim radarjem širokega snopa in srednjevalovnim radarjem ozkega snopa je za merjenje hitrosti še težja kot za merjenje odbojnosti. Mogoče najboljša kompromisna rešitev je tudi v tem primeru srednje močan ( $P_0 = 250$  kW) srednjevalovni ( $\lambda = 5$  cm) radar z ozkim snopom ( $\theta_0 = 1^\circ$ ) in zato s srednje veliko anteno ( $D = 4$  m). Ker pa je njegova valovna dolžina dvakrat krajša, je omejen na merjenje dvakrat manjših hitrosti. Zato bi moral vsekakor delovati z dvema visokima frekvencama impulzov. Merilni doseg pa bi bilo morda smiselno povečati še z uporabo primerne napredne tehnike, recimo z uporabo dveh vrst impulzov, od katerih je vsak drugi polariziran horizontalno oziroma vertikalno.

### **Uporaba radarjev pri obrambi pred točo**

Čeprav so današnji radarji zmožni dajati obilje podatkov o nevihtnih oblakih, pa pri obrambi pred točo niso polno izkoriščeni. Nikjer v svetu zaenkrat [leta 1988] v operativnih obrambah ne uporabljajo Dopplerjevih ali dvopolarizacijskih sistemov. Ponekod uporabljajo dvovalovne radarje, v veliki večini primerov, tudi pri nas, pa le enopolarizacijske in enovalovne konvencionalne radarje. Vendar pa vse dotlej, dokler osnovne fizikalne predpostavke za ekonomsko upravičeno obrambo pred točo ne bodo zadovoljivo izdelane in eksperimentalno potrjene, tudi boljša radarska opremljenost v operativnih obrambah nima veliko smisla. Nasprotno pa si

raziskovalnih projektov brez polne uporabe danes razpoložljivih radarskih zmogljivosti, zlasti Dopplerjevih in dvopolarizacijskih sistemov, skoraj ne moremo misliti.