

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za matematiko in fiziko  
Oddelek za fiziko

Marjan Divjak

**RADARSKO MERJENJE PADAVIN  
V NEOPTIMALNIH RAZMERAH**

Magistrsko delo

Ljubljana, 1996

## **Naslov**

Radarsko merjenje padavin v neoptimalnih razmerah  
Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, FMF, Ljubljana

## **Avtor**

Marjan Divjak  
Hidrometeorološki zavod Slovenije, Ljubljana

## **Mentor**

Prof. dr. Jože Rakovec  
Univerza v Ljubljani, FMF, Ljubljana

## **Komisija**

Prof. dr. Jože Rakovec, predsednik  
Prof. dr. Andrej Hočevar, član  
Prof. dr. Slobodan Žumer, član

## **Katalog**

ŠD Md  
DK 551.501.81(043.2)  
KG Radar/padavine/merjenje/natančnost/napake/korekcije  
AV Divjak, Marjan  
SA Rakovec, Jože, mentor  
KZ 1000 Ljubljana, Jadranska 19  
ZA Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko,  
Oddelek za fiziko  
LI 1996  
IN Radarsko merjenje padavin v neoptimalnih razmerah  
TD Magistrsko delo  
OP viii+66 str., 3 tab., 38 sl., 43 ref.  
IJ SL  
JI SL  
AI Magistrsko delo najprej predstavi teorijo radarskega merjenja padavin. Sledijo opis sočasnega merjenja padavin z vremenskim radarjem in s talnimi ombrometri, analiza izmerkrov ter določitev radarskih napak. Nazadnje je prikazanih in preizkušenih pet metod za povečanje radarske natančnosti pri merjenju v neoptimalnih razmerah.

Magistrsko delo sem opravljal na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani, na Hidrometeorološkem zavodu Slovenije in na Eksperimentalnem centru za hidrologijo in meteorologijo v Teolu pri Padovi. Prof. dr. Jože Rakovec mi je dal čas in priložnost za raziskave ter mi pomagal z nasveti. Dr. Paolo Giarretta in dr. Marco Monai sta mi omogočila uporabo ombrografskih in radarskih podatkov. Raziskave so finančno podprli Hidrometeorološki zavod Slovenije, fundacija Tempus in Komisija evropskih skupnosti v okviru evropskega projekta COST-75. Vsem se zahvaljujem.

## Povzetek

Magistrsko delo najprej predstavi teorijo radarskega merjenja padavin. Sledijo opis sočasnega merjenja padavin z vremenskim radarjem in s talno mrežo 80 ombrometrov, analiza preko 6000 ur izmerkov ter določitev radarskih napak. Nazadnje je prikazanih in preizkušenih pet metod za povečanje natančnosti pri merjenju v neoptimalnih razmerah. Ugotovljeno je naslednje.

Logaritemsko razmerje med radarskim in ombrometrskim izmerkom padavin – radarska napaka – je sistematično odvisno predvsem od lege radarskega snopa glede na pas taljenja padavin in od premera snopa. Povprečne urne lokalne napake znašajo pri meritvah pod pasom taljenja 0 dB, v pasu taljenja med 0 in 3 dB, nad njim pa med 0 in –6 dB. Disperzije lokalnih napak ležijo na intervalu med 3 in 5 dB. Meritve v goratem območju so manj natančne od meritev v ravnini. Opažene napake so dobro pojasnjene z izmerjenimi vertikalnimi profili odbojnosti.

Ob uporabi korekcijskih metod se povprečne radarske napake občutno zmanjšajo. Disperzije lokalnih napak se znatno ne spremenijo. Kot najprimernejša se izkaže vertikalna ekstrapolacija padavinskih polj s parametriziranimi profili odbojnosti. Lokalne urne preceinitve padavin v pasu taljenja se zmanjšajo na 1 dB, podceinitve nad njim pa na –1 dB. Metoda je fizikalno utemeljena, preprosta za implementacijo ter primerna za sprotno operativno uporabo.

## Abstract

Master thesis recapitulates the theory of radar rainfall measurement. Subsequently, field measurements with a conventional weather radar and 80 ground-based raingauges are described, more than 6000 data hours are analyzed, and systematic radar errors are identified. Finally, five accuracy-improving techniques devised for non-optimal measuring conditions are evaluated. The following is found.

The logarithmic radar-to-gauge rainfall ratio, *i. e.*, radar error, depends mainly on the radar beam height relative to the precipitation melting layer and on the beam diameter. Hourly local errors exhibit mean values around 0 dB, from 0 to 3 dB, and from 0 to –6 dB, when measuring below the melting layer, in the layer or above it, respectively. Local standard deviations span the interval from 3 to 5 dB. Measurements over the flat terrain are more accurate than those over the mountains. All errors are well explained by the measured vertical reflectivity profiles.

The use of correction techniques diminishes mean radar errors to a great extent. Local standard deviations are not reduced significantly. The most appropriate method turns out to be the vertical extrapolation of precipitation fields by parameterized profiles of reflectivity. Local mean hourly overestimations in the melting layer are reduced to 1 dB, and underestimations above it are corrected to –1 dB. The method is physically sound, simple to implement and well suited for operational applications in real time.

# Vsebina

Glavne oznake .....	vii
Tabele in slike .....	viii
Uvod .....	1
<b>I. Padavinski procesi .....</b>	<b>3</b>
1. Stratifikacija atmosfere .....	3
2. Nastanek in vrste oblakov .....	4
3. Razvoj padavin .....	5
4. Padavine pri tleh .....	7
<b>II. Vremenski radar .....</b>	<b>9</b>
5. Princip in shema radarja .....	9
6. Sevanje in detekcija mikrovalov .....	10
7. Lom mikrovalov v atmosferi .....	12
8. Absorpcija, sipanje in odboj mikrovalov .....	15
9. Moč odmevov in odbojnost padavin .....	17
10. Fluktuacije radarskih odmevov .....	20
<b>III. Radarsko merjenje padavin .....</b>	<b>22</b>
11. Vrsta padavin .....	22
12. Jakost padavin .....	23
13. Talna količina padavin .....	24
14. Optimalni in neoptimalni pogoji merjenja .....	25
<b>IV. Merilna oprema in meritve .....</b>	<b>26</b>
15. Radiosondni sistem .....	26
16. Talna mreža ombrometrov .....	27
17. Radarski sistem .....	29
18. Osnovni nabor podatkov .....	31
<b>V. Analiza radarskih izmerkov .....</b>	<b>33</b>
19. Horizontalna struktura odbojnosti .....	33
20. Vertikalni profili odbojnosti .....	34
21. Radarske ocene talnih padavin .....	37
22. Optimalni merilni pogoji .....	38
23. Neoptimalni merilni pogoji .....	39
24. Padavine na ravnini in v gorah .....	42

<b>VI. Izboljšanje radarske natančnosti</b> .....	44
25. Kalibracijski in verifikacijski izmerki .....	44
26. Ombrometrski faktorji .....	44
27. Umeritvena tabela .....	46
28. Linearna regresija .....	48
29. Nevronska mreža .....	49
30. Vertikalna ekstrapolacija odbojnosti .....	52
31. Ekstrapolacija odbojnosti v gorah .....	55
32. Medsebojna primerjava merilnih metod .....	56
Zaključki .....	58
Dodatek .....	60
A. Logaritemska razmerja količin .....	60
B. Ombrometrske postaje .....	62
Literatura .....	64

## Glavne oznake

$A$	radarska napaka
$A_0$	efektivna ploščina antene
$a$	radij antenske odprtine
$c$	hitrost svetlobe v vakuumu
$D$	premer radarskega snopa; premer padavinskega delca
$f$	smerni diagram antene
$G_0$	osno ojačenje antene
$h$	višina
$I$	svetilnost; jakost padavin
$j$	gostota toka mikrovalovnega sevanja
$k$	koeficient dušenja mikrovalov; valovni vektor
$n$	lomni količnik snovi; številska gostota padavinskih delcev
$P_r$	moč radarskega odmeva
$P_0$	vršna moč radarskega impulza
$Q$	količina padavin
$Q_G$	količina padavin, izmerjena z ombrometrom
$Q_R$	količina padavin, izmerjena z radarjem
$R$	radij Zemlje
$r$	žarkovna razdalja od radarja
$s$	talna razdalja od radarja
$T$	temperatura; časovni interval med radarskimi impulzi
$t$	čas
$v$	hitrost padanja padavinskega delca
$V$	prostornina
$Z$	radarska odbojnost padavin
$Z_e$	ekvivalentna radarska odbojnost
$\alpha$	azimutni kot antene
$\beta$	elevacijski kot antene; elevacijski kot sevanja
$\epsilon$	dielektričnost snovi
$\eta$	prostorska odbojnost padavin
$\theta$	geografska širina; polarni kot sevanja
$\theta_0$	širina radarskega snopa
$\kappa$	absorpcijski koeficient snovi
$\lambda$	valovna dolžina mikrovalov
$\sigma$	odbojni presek padavinskega delca
$\tau$	trajanje radarskega impulza
$\phi$	geografska dolžina
$\Omega$	prostorski kot

# Tabele in slike

## *Tabele*

- 17.1 Tehnične značilnosti merilnega radarja
- 18.1 Vzorec dni s padavinami
- 32.1 Učinkovitost merilnih metod

## *Slike*

- 3.1 Vertikalni presek skozi padavinski oblak
- 4.1 Porazdelitev dežnih kapljic po velikosti
- 4.2 Hitrosti padanja dežnih kapljic
- 5.1 Shema konvencionalnega radarja
- 6.1 Sevalni diagram krožne odprtine
- 7.1–2 Radarski žarek v atmosferi
- 15.1–2 Temperaturni profil nad merilnim območjem
- 16.1 Mreža ombrometrskih postaj
- 19.1–2 Horizontalna struktura padavin
- 20.1–3 Vertikalni profili odbojnosti
- 22.1–2 Radarske napake v optimalnih razmerah
- 23.1–2 Radarske napake v neoptimalnih razmerah
- 23.3–4 Radarske napake v odvisnosti od razdalje
- 23.5 Radarske napake v odvisnosti od višine in premera snopa
- 24.1–2 Radarske napake nad ravnino in nad gorami
- 26.1–2 Korekcija napak z ombrometrskimi faktorji
- 27.1–2 Korekcija napak z umeritveno tabelo
- 28.1–2 Korekcija napak z linearno regresijo
- 29.1–2 Nevronska mreža
- 29.3–4 Korekcija napak z nevronske mrežo
- 30.1–2 Shematični profil odbojnosti
- 30.3–4 Korekcija napak z vertikalno ekstrapolacijo odbojnosti



# Uvod

Princip radarja je znan: impulzi elektromagnetnega valovanja, izsevani v ozek prostorski kot, se na morebitnih ovirah sipajo v vse smeri, deloma tudi nazaj proti izvoru; z zakasnitvijo odmevov je določena oddaljenost ovir, z jakostjo odmevov pa njihove odbojne lastnosti. Vremenski radarji merijo odmeve od prostorsko porazdeljenih padavinskih delcev. Iz jakosti odmevov je mogoče oceniti jakost padavin, če poznamo agregatno stanje delcev, njihovo velikostno porazdelitev in hitrosti padanja [7].

Pri radarskih meritvah padavin je dosežena natančnost odvisna od tega, kako dobro so izpolnjeni določeni merilni pogoji. Če se omejimo na meritve stratiformnih padavin pod višino izoterme  $0^{\circ}\text{C}$  in v bližini radarja, kjer je premer radarskega snopa majhen (pod 1 km), se radarski in talni izmerki padavin razlikujejo med seboj tipično za  $\pm 10\text{--}40\%$ , odvisno od pogostosti radarskih meritev ter od akumulacijskega časa in površine [23]. Glavni vzrok za napake je variabilnost velikostnega spektra dežnih kapljic [13].

Pri bolj neugodnih pogojih merjenja se pojavijo velike napake, tako slučajne kot sistematične. V plasti taljenja ledenih padavinskih delcev pod izotermo  $0^{\circ}\text{C}$  so padavine sistematično precenjene tudi za faktor 5 in več. Pri merilnih višinah nekaj km nad plastjo taljenja pa se pojavijo sistematične podcinitve do in preko faktorja 5. V obeh primerih narastejo slučajne napake na faktor 2–4 [6] [24]. Glavni vzrok za tako velike napake je vertikalna nehomogenost padavinskih polj, povezana z nezmožnostjo radarja, da bi meril tik nad tlemi zaradi ukrivljenosti zemeljske površine in hribovitosti [13].

Napake radarskih meritev lahko zmanjšamo na več načinov. Če ničesar ne vemo ali nočemo vedeti o tem, kaj jih povzroča, ostane le "vpliv" kraja in časa. Za posamezne talne lokacije določimo razmerja med talnimi in radarskimi izmerki – umeritvene faktorje, upoštevajoč letne, sezonske, dnevne, urne ali celo še krajše lokalne meritve; nato predpostavimo, da so ugotovljeni faktorji reprezentativni po okolica in nove radarske meritve z njimi popravljamo [35] [17].

Bolj smiselno, čeprav ne nujno tudi bolj uspešno, je primerjati radarske in talne izmerke pri izbranih pogojih merjenja ter poiskati tiste parametre (razdalja, višina, višina izoterme  $0^{\circ}\text{C}$  itd.), ki na natančnost res vplivajo. Množico izmerkov v ta namen primerno stratificiramo ter za vsako podmnožico določimo njen umeritveni faktor. Dobljene faktorje nato uporabljamo za korekcijo novih radarskih izmerkov v podobnih merilnih pogojih. Večdimenzionalno tabelo umeritvenih faktorjev lahko tudi nadomestimo z umerjeno nevronske mrežo. Med učenjem dovajamo mreži na vhod radarske izmerke in parametre meritve, na izhod pa talne izmerke; pri tem se mrežne uteži prilagodijo tako, da je razlikovanje med obojimi minimalno. Umerjena mreža služi za korekcijo novih radarskih meritev [16].

Ko poznamo spremenljivke, ki vplivajo na natančnost radarskih meritev, lahko poskusimo njihov vpliv zajeti v funkcijsko odvisnost. Privzamemo tako ali

drugačno obliko odvisnosti, ki lahko vsebuje še nedefinirane parametre. Morebitne parametre določimo eksperimentalno tako, da minimizirajo razlikovanje med radarskimi in talnimi meritvami. Najpreprostejša funkcijska odvisnost je linearna; privzamemo jo po navadi takrat, kadar ne poznamo ničesar boljšega [24] [18]. Bolj smiselne odvisnosti sledijo iz teorije radarskega merjenja padavin [12] [30].

Cilj magistrskega dela je določitev napak, ki se pojavljajo pri radarskem merjenju padavin v neoptimalnih razmerah, in razvoj ter preizkus metod za sprotno korekcijo izmerkov. V ta namen so najprej predstavljene značilnosti padavinskih sistemov v atmosferi in zapisane ključne enačbe za radarsko merjenje padavin. Sledi opis merilne opreme in meritev, nato pa prikaz izmerkov ter določitev sistematičnih napak. V nadaljevanju je razvitih pet korekcijskih metod. Nazadnje je učinkovitost metod še eksperimentalno preverjena.

Ključne enačbe za radarsko merjenje padavin so znane iz literature [9]. Lahko jih predstavimo na dva načina: s preprostim prepisom iz vira ali z izpeljavo, če je možna, iz primernih izhodiščnih enačb. Prvi način ne daje pravega vpogleda v natančnost in območje veljavnosti enačb in zato ni primeren za doseg zastavljenega cilja. Pri drugem načinu pa se pojavi vprašanje, katere izhodiščne enačbe izbrati. Očitno so lahko tudi same izpeljane iz še bolj osnovnih enačb; kako daleč nazaj v verigi izpeljav je torej smiselno iti? Prav do osnovnih enačb, ki jih poznamo danes, gotovo ne, saj je večina poti že prehojene v ustrezni literaturi. V magistrskem delu so zato kot izhodiščne izbrane tiste enačbe, ki jih najdemo v standardnih učbenikih eksperimentalne [4] in teoretične fizike [2]. Tamkajšnjih izpeljav magistrsko delo ne ponavlja. Enačbe iz teh učbenikov so nadalje privzete kot potencialno znane in zato tudi niso opremljene z navedbo vira. Nasprotno pa specialistično znanje iz meteorologije in radarske merilne tehnike ni predpostavljeno; kar ga je potrebnega za razumevanje, je zbranega v uvodnih poglavjih.

Metode za izboljšavo radarske natančnosti so deloma povzete iz literature in deloma originalne. Upam, da bodo koristne novosti v kvantificiranju merilnih pogojev, v uporabi umeritvenih tabel in v parametrizaciji vertikalnih profilov odbojnosti. Najvažnejši doprinos magistrskega dela pa je medsebojna primerjava petih korekcijskih metod, uporabljenih na istih podatkih, in s tem povezan odgovor na vprašanje, katera metoda je najbolj primerna za radarsko merjenje padavin v neoptimalnih razmerah.

Če hočemo radar učinkovito uporabiti za merjenje padavin, moramo vsaj okvirno poznati lastnosti atmosfere in padavinskih oblakov. Razdelki uvodnega poglavja prikazujejo osnovna dejstva s tega področja prav na kratko, večinoma kvalitativno in ponekod poenostavljeno. Poglavje je namenjeno tistim tehnično izobraženim strokovnjakom, ki jih zanima radarsko merjenje padavin, nimajo pa ožje meteorološke izobrazbe. Ker so prikazana dejstva meteorologom dobro znana, niso – razen izjemoma – opremljena s posebnimi referencami. Kot splošne reference lahko služijo učbeniki [1], [3] in [5].

## 1. Stratifikacija atmosfere

Plinasti ovoj Zemlje, atmosfera, je zmes suhega zraka in vodne pare. Do višine nekaj deset kilometrov je sestava suhega zraka konstantna: masni delež dušika znaša 76%, kisika 23% in ostalih plinov 1%. Koncentracija vodne pare je spremenljiva. Njena največja vrednost je določena z nasičenjem pri dani temperaturi in v srednjih zemljepisnih širinah dosega poleti  $10 \text{ g/m}^3$ . Pritisk zraka pri morskii gladini znaša okrog 1000 mb in se večinoma spreminja le za nekaj odstotkov. Z višino pojema približno eksponentno; na polovico se zmanjša pri 5.5 km.

Na zunanje plasti atmosfere vpada sončna svetloba z največjo intenzivnostjo pri valovni dolžini  $0.5 \mu\text{m}$ . Čista atmosfera absorbira približno petino vpadajoče svetlobe. Vidno svetlobo skoraj v celoti prepušča. Prepuščena svetloba segreva zemeljsko površino, ki toplotno seva pri svoji temperaturi; najizdatnejše je sevanje pri valovni dolžini  $10 \mu\text{m}$ . Za zemeljsko sevanje je atmosfera dokaj nepropustna, predvsem zaradi vodne pare in ogljikovega dioksida. Atmosfera se zato najbolj segreva posredno od zemeljskega površja in le v manjši meri neposredno z absorpcijo sončnega sevanja. Ohlaja pa se predvsem s svojim toplotnim sevanjem.

Zaradi prostorsko in časovno spremenljivega segrevanja je atmosfera neprestano v toplotnem neravnovesju: njena temperatura se spreminja s krajem in časom. Lokalne pregretosti lahko povzročijo nastanek konvekcijskih tokov. Ti se razvijejo, če temperatura z višino dovolj hitro pojema. Dvigajoči se zrak se namreč razteza, ker se prilagaja okolišnjemu pritisku, in se zato adiabatno ohlaja. Dvig mu je preprečen, če se ohlaja hitreje od okolice. Nenasičen zrak se ohlaja s stopnjo  $-10 \text{ K/km}$ , nasičen pa počasneje, saj se pri dvigu sprošča latentna toplota zaradi kondenzacije vodne pare. Stopnja ohlajanja se takrat giblje med  $-3$  in  $-10 \text{ K/km}$ , odvisno od količine nasičene pare. Atmosfera je v izbrani točki torej vertikalno stabilna za majhne premike, če je njen temperaturni gradient večji od lokalne stopnje ohlajanja.

Konvektivno mešanje atmosfere sega v srednjih zemljepisnih širinah od tal do višine približno 12 km. Nad ekvatorjem je konvektivna plast visoka okrog 16 km

in nad polom 8 km. V tej plasti, troposferi, pada temperatura z višino v povprečju linearno z gradientom  $-6$  K/km, nad njo pa je približno konstantna. Temperatura na vrhu troposfere znaša okrog  $-50^{\circ}\text{C}$ . Temperaturni profil kaže sistematične letne in dnevne spremembe. Poleti je troposfera globlja in temperature so višje kot pozimi. Ponoči se prizemne temperature znižajo in podnevi zvišajo. Razloga za navedene spremembe sta seveda letno kroženje Zemlje okoli Sonca in njeno dnevno vrtenje okrog polarne osi.

Različno segrevanje ekvatorialnih in polarnih predelov, povezano z vrtenjem Zemlje, vzdržuje v troposferi nenehna horizontalna gibanja, vetrove. V ekvatorialnih in polarnih predelih prevladujejo vetrovi z vzhoda, v srednjih predelih pa z zahoda. Zaradi trenja s površino so vetrovi pri tleh šibkejši. Njihova hitrost v troposferi ima velikostno stopnjo 10 m/s.

V troposferi je zbrane nad  $3/4$  mase celotne atmosfere in v njej se dogajajo vsi padavinski procesi. Razmer nad troposfero, v stratosferi, za potrebe radarskega merjenja padavin ni potrebno poznati.

## 2. Nastanek in vrste oblakov

Če se temperatura vlažnega zraka iz kakršnegakoli razloga zniža pod temperaturo rosišča vodne pare, ki jo zrak vsebuje, se presežek pare kondenzira na delcih nečistoč v drobne kapljice. Nastane oblak. Tipični premer oblačnih kapljic znaša  $10\ \mu\text{m}$ , njihova številna gostota pa  $100/\text{cm}^3$ . Nad morjem nastaja manj kapljic na prostorninsko enoto kot nad kontinenti, so pa v povprečju večje. Povsod v atmosferi je dovolj delcev nečistoč, ki delujejo kot kondenzacijska jedra, zato nikjer ne pride do prenasíčenja vodne pare.

Zrak v atmosferi se lahko ohladi na dva osnovna načina: z oddajanjem toplote v okolico (predvsem s sevanjem) in z adiabatnim raztezanjem pri konvektivnem ali prisilnem dvigu.

Zrak, ki v časovni enoti oddaja več toplote, kot jo prejema, se ohlaja. To se dogaja ponoči, ko zamre sončno obsevanje, pa tudi pri dotoku toplejšega zraka nad hladnejša tla, recimo pozimi z morja nad kopno. Ohlajanje je najmočnejše v najnižjih plasteh. Ko se temperatura zniža do temperature rosišča, se začne kondenzacija. Sproščena toplota sicer zrak segreje, vendar ne dovolj, da bi postala prizemna plast atmosfere vertikalno nestabilna. Megla, ki se razvije, je horizontalno homogena, stratiformna. Sega od tal do višine nekaj sto metrov. Vertikalne hitrosti v njej so zanemarljive. Masa kondenzirane vode na prostorninsko enoto, vodnost, ima velikostno stopnjo  $0.1\ \text{g}/\text{m}^3$ .

Do konvektivnega dviga pride zaradi dnevnega segrevanja ali zaradi dotoka hladnejšega zraka nad toplejša tla, recimo poleti z morja nad kopno. Pri tem postane spodnja plast atmosfere hidrostatično labilna in razvijejo se konvektivni tokovi. Dvigajoči se zrak se pri dvigu ohlaja in je sprva nenasičen. Ko doseže temperaturo rosišča, se začne kondenzacija. Sproščena latentna toplota deluje kot generator nadaljnjega dviganja. Oblaki, ki se razvijejo, so kopaste oblike in rišejo po nebu obrise konvektivnih tokov. Baze imajo na višini 1–2 km nad tlemi. Do

kakšne višine zrastejo, je odvisno od temperaturne stratifikacije atmosfere in od jakosti ter smeri vetrov. V ugodnih razmerah sežejo do vrha troposfere (saj je ta z njimi pravzaprav določena). Horizontalne razsežnosti oblakov in vertikalne hitrosti v njih so sorazmerne z doseženimi višinami. Za plitve oblake sta karakteristični vrednosti 1 km in 1 m/s, za globoke pa 10 km in 10 m/s. V izjemnih primerih narastejo vertikalne hitrosti na 50 m/s. Vodnost v konvektivnih oblakih se giblje med 1 in 5 g/m<sup>3</sup>.

Zrak se prisilno dviga pri toku preko reliefa in na meji med dvema zračnima masama, to je na topli in hladni fronti. Dvigajoča se plast zraka se adiabatno razteza in ohlaja. Kondenzacija se lahko prične v njenem zgornjem ali spodnjem delu. V prvem primeru se v plasti vzpostavi stabilni temperaturni gradient in razvijejo se stratiformni oblaki. V drugem primeru postane plast vertikalno nestabilna in razvijejo se konvektivni oblaki. Ponavadi sta obe vrsti oblakov pomešani. Stratiformni oblaki na frontah imajo horizontalne razsežnosti okrog 1000 km in globino preko večine troposfere. Vertikalna gibanja v njih so šibka, velikostne stopnje 1 dm/s. Orografski stratiformni oblaki so manjših horizontalnih razsežnosti, vertikalne hitrosti v njih pa dosegajo vrednosti 1 m/s. Karakteristična vodnost stratiformnih oblakov znaša 0.1 g/m<sup>3</sup>.

### 3. Razvoj padavin

Oblačne kapljice so drobne, imajo zanemarljive hitrosti padanja glede na zrak in sledijo njegovemu gibanju. Večji padavinski delci, katerih hitrosti so dovolj velike, da lahko padejo na tla, nastanejo le v nekaterih oblakih, kjer so izpolnjeni določeni pogoji. Obstajata dva glavna načina nastanka.

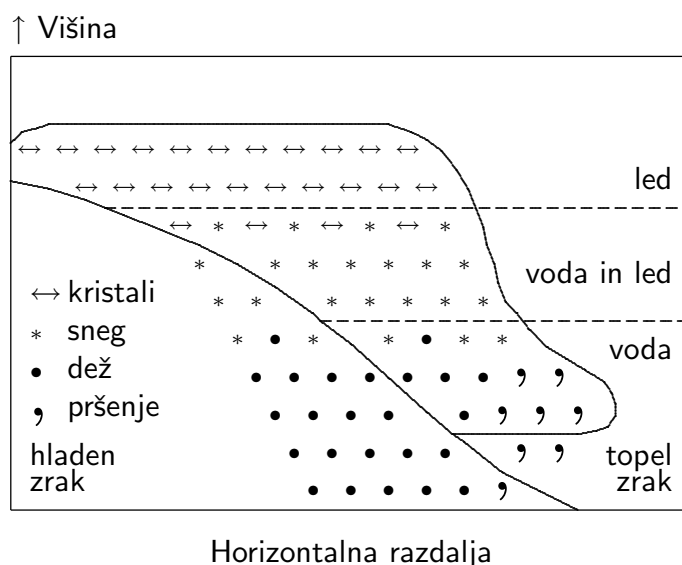
V oblakih, kjer se temperatura ne zniža pod  $-20^{\circ}\text{C}$ , oblačne kapljice skorajda ne zmrzujejo, ampak se le podhladijo. Ker so različnih velikosti, je nasičeni parni tlak nad njimi različen. Nad bolj drobnimi kapljicami je nekaj večji. Gradient v polju vodne pare povzroča njeno difuzijo: velike kapljice rastejo na račun drobnih. Večje kapljice padajo hitreje, trkajo ob drobne in si jih prisvajajo. Do dimenzij, potrebnih za izpad iz oblaka, zrastejo le, če je bil začetni velikostni spekter oblačnih kapljic dovolj širok, in če sta debelina oblaka ter njegova vodnost dovolj veliki. Pogoji so izpolnjeni predvsem v nižjih zemljepisnih širinah nad morjem.

Če se temperatura v oblaku zniža pod  $-20^{\circ}\text{C}$ , začno podhlajene kapljice zmrzovati. Hitrost zmrzovanja narašča z nižanjem temperature. Pri  $-40^{\circ}\text{C}$  obstajajo le še ledeni delci. Pri dani temperaturi je nasičeni parni tlak nad ledom manjši kot nad vodo, zato se v območju, kjer skupaj obstajajo podhlajene kapljice in ledeni kristali, začne difuzijska rast kristalov. Razlika med tlakoma je največja pri temperaturi  $-12^{\circ}\text{C}$ . Kristali rastejo in med padanjem trkajo s podhlajenimi kapljicami, ki nanje primrzujejo. Ko dosežejo ledeni delci dovolj velike dimenzije in s tem hitrosti padanja, izpadejo iz oblaka. Pri padanju v območju s temperaturami nad  $0^{\circ}\text{C}$  se deloma ali povsem stalijo. Pod bazo oblaka tudi bolj ali manj izhlapevajo. Padavine torej nastanejo, če je oblak dovolj globok in če se temperatura v njegovi zgornji plasti zniža pod približno  $-20^{\circ}\text{C}$ . Oba pogoja sta izpolnjena predvsem v

srednjih in visokih zemljepisnih širinah nad kontinenti.

Razvoj padavin v stratiformnih in konvektivnih oblakih je v osnovi enak. Razlika obstaja le v jakosti vertikalnih tokov, v katerih rastejo padavinski delci. Ker so v konvektivnih oblakih ti tokovi zelo močni, lahko v njih lebdiyo tudi večji padavinski delci, kapljice s premerom do 5 mm (večje se hitro razletijo) in zrna toče s premerom do 5 cm. Slika 3.1 prikazuje vertikalni presek skozi padavinski oblak. Zaradi konkretnosti je predstavljen frontalni stratiformni oblak. Model je mutatis mutandis uporaben tudi za ostale primere.

Spekter padavinskih delcev v oblakih je raznolik. V zgornjih plasteh lebdiyo ledeni kristali, zvečine v obliki iglic in ploščic; na srednjih višinah koeksistira mešanica kristalov in podhlajenih kapljic; v pasu taljenja je najti bolj ali manj staljene kristale in njih konglomerate, na tla pa padajo dežne kapljice. V konvektivnih tokovih lahko na vseh višinah obstajajo zrna toče, ki so bodisi suha bodisi pokrita s tanko plastjo vode. Pozimi so v oblakih predvsem ledeni kristali in njih konglomerati, snežinke.



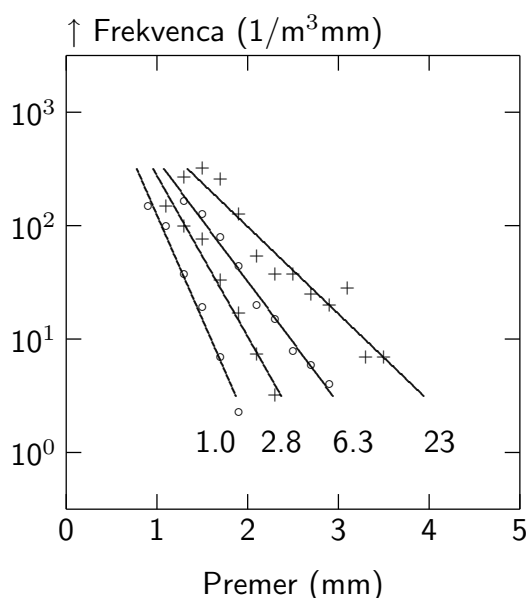
Slika 3.1. Vertikalni presek skozi padavinski oblak. Stratiformni oblak na frontalni površini.

Izhlapevanje padavin pod bazo oblaka in njihov padec na tla spremenita stabilnost prizemne plasti atmosfere in vplivata na nadaljnji razvoj oblaka. Vpliv padavin na razvoj stratiformnih oblakov je majhen. Pri konvektivnih oblakih je drugače. Če ni vetrovnega striženja, pogasi konvektivna celica sama sebi toplotni izvor na tleh. Vendar pa hladni spuščajoči se zrak, ki spremlja padavine, prisilno dviguje okolišnji zrak in proži nove celice. Življenje posamezne celice traja tako le okrog 30 minut, obnavljajoči se skupek celic pa obstaja lahko tudi več ur. Primerno vetrovno striženje pogosto loči področja vzponskih in spuščajočih se tokov ter s tem nekajkrat podaljša življenjsko dobo posameznim celicam.

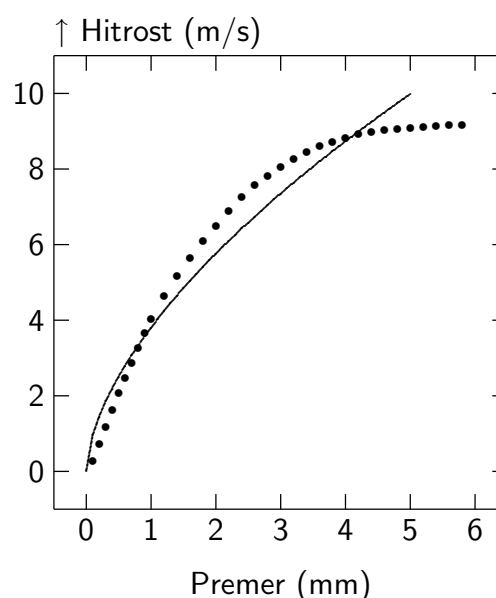
## 4. Padavine pri tleh

Tri glavne vrste padavin na tleh so dež, sneg in toča. Jakost padavin na nekem mestu je definirana s prostornino vode, ki pade v časovni enoti na horizontalno ploskovno enoto. Tipične jakosti sneženja znašajo 0.1 mm/h, stratiformnega dežja 1 mm/h in konvektivnega dežja ter toče 10 mm/h. Izjemno močne konvektivne padavine dosežejo jakost 100 mm/h.

Velika večina padavin pade na Zemljo v obliki dežja. Drobne kapljice so okrogle, večje pa občutno sploščene v smeri padanja. Sploščenost narašča z maso kapljice. Njihovo velikost opišemo zato z ekvivalentnim premerom, ki bi ga imele v nedeformirani obliki. Pridevnik bomo v nadaljevanju večinoma izpuščali. Kapljice s premerom pod 1 mm so okrogle, tiste s premerom 5 mm pa so sploščene že v razmerju 2:3. Slika 4.1 prikazuje velikostni spekter dežnih kapljic v različno močnih padavinah. Uporabljeni so podatki Marshalla in Palmerja [41].



Slika 4.1. Porazdelitev dežnih kapljic po premeru. Stratiformne padavine različnih jakosti v mm/h. Podatki Marshalla in Palmerja. Polne črte prikazujejo eksponentne funkcije z najboljšim prileganjem.



Slika 4.2. Hitrosti padanja dežnih kapljic. Mirujoč zrak, normalni pogoji. Podatki Gunna in Kinzerja. Polna črta označuje potenčno funkcijo z najboljšim prileganjem.

Kapljice so porazdeljene po premeru  $D$  približno eksponentno, kar sta prva ugotovila prav omenjena avtorja:

$$\frac{dn}{dD} = \left( \frac{dn}{dD} \right)_0 \exp(-D/D_0). \quad (4.1)$$

Vrh spektra  $(dn/dD)_0$  je v prvem približku konstanten in znaša okrog  $10^4/\text{m}^3\text{mm}$ . Širina spektra  $D_0$  narašča z jakostjo padavin. Oba parametra se v splošnem spreminjata s časom in krajem. Med drugim sta odvisna od tipa padavinskih oblakov, od spektra kondenzacijskih jeder in od povprečnih temperatur v oblaku.

Hitrost padanja dežnih kapljic je določena z njihovo težo, vzgonom in uporom. Za drobne kapljice velja linearni zakon upora in za večje kvadratni. Koefficient upora je odvisen od oblike kapljice. Na sliki 4.2 so prikazane izmerjene hitrosti padanja za različno velike kapljice v mirnem zraku na morski gladini. Uporabljeni so podatki Gunna in Kinzerja [38]. Hitrosti padanja je možno kar dobro aproksimirati s potenčno funkcijo

$$v(D) = a D^b. \quad (4.2)$$

Za padanje v zraku pri normalnih pogojih imata konstanti vrednost  $b = 0.6$  in  $a = 4.4 \text{ m/s mm}^b$ . Pri teh vrednostih se potenčna funkcija na intervalu premerov od 0.5 do 5.0 mm najtesneje prilega podatkom. Če bi bile kapljice okrogle in če bi zanje pri vseh velikostih veljal kvadratni zakon upora, bi pričakovali  $b = 1/2$ . Hitrosti padanja so nadalje omejene in ne presežejo 10 m/s. V redkejšem zraku se ustrezno povečajo.

Talne padavine v obliki snega tvorijo le majhen delež skupne količine padavin na Zemlji. Pomembne so predvsem v višjih zemljepisnih širinah. Tudi porazdelitev snežink po premeru je približno eksponentna, le oba parametra porazdelitve sta bolj spremenljiva kot pri kapljicah [37]. Hitrost padanja snežink je v prvem približku konstantna in ima velikostno stopnjo 1 m/s.

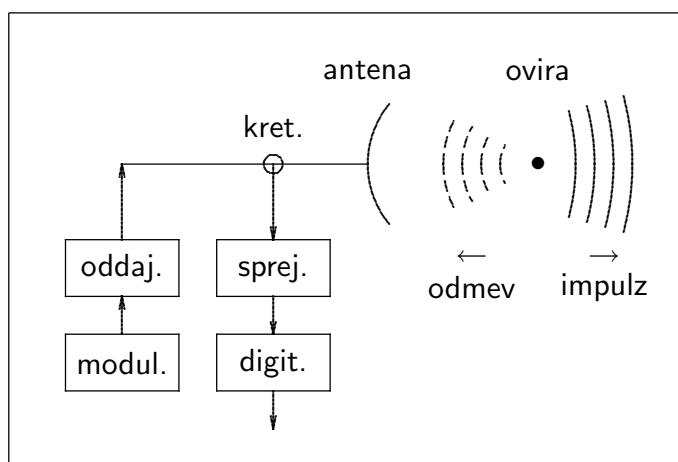
Toča na tleh je redek pojav, čeprav jo dolgo pomnimo. Zrna so okrogla in porazdeljena po velikosti približno eksponentno [42]. Zrastejo do premera 1–5 cm, v izjemnih primerih do 10 cm. Hitrosti padanja so dobro določene s kvadratnim zakonom upora.



Radar je sistem za detekcijo in lociranje teles z izsevanimi in odbitimi elektromagnetnimi valovi. Ime je akronim za "radio detection and ranging". Prve radarje so razvili Angleži med drugo svetovno vojno za potrebe letalstva. Zdaj jih uporabljamo povsod, kjer bi radi razširili zmogljivosti človeških čutil pri opazovanju okolja. Tekoče poglavje podrobno opisuje radar kot merilnik padavin. Začenja tam, kjer se končujejo standardni učbeniki eksperimentalne [4] in teoretične [2] fizike; tamkajšnji rezultati so privzeti kot znani in zato niso opremljeni z referencami. Enačbe, izpeljane v poglavju, niso nove; najdemo jih v večini monografij s področja radarske merilne tehnike, na primer v [11] ali [9].

## 5. Princip in shema radarja

Radarski sistem je sestavljen iz treh osnovnih delov: oddajnika, antene in sprejemnika. Shematično je prikazan na sliki 5.1.



Slika 5.1. Shema konvencionalnega radarja.

Oddajnik je votlinski resonator s tipično linearno razsežnostjo 1 dm. V njem niha stoječe elektromagnetno valovanje, mikrovalovi. Nihanje ni stalno, temveč proženo v kratkih časovnih intervalih, ki so med seboj ločeni z daljšimi presledki. Elektromagnetne valovne poteze – radarski impulzi – odtekajo v valovod, vpadajo na anteno in se od nje odbijajo v ozek prostorski kot. Izsevani impulzi tvorijo radarski snop. Med generiranjem posameznega impulza zapira posebna kretnica dostop do sprejemnika, po izsevanju pa dostop odpre. Če izsevani impulz na svoji poti naleti na oviro (letalo, hrib, oblak), se na njej sipa. Del energije, ki se sipa

nazaj, vpade na anteno kot odmev in po valovodu doseže sprejemnik. S položajem antene je določena smer, v kateri je ovira, s časom zakasnitve odmeva za izsevanjem impulza pa njena oddaljenost. Z analizo moči, frekvence in polarizacije odmeva se da določiti marsikatero lastnost ovire. Omejili se bomo na konvencionalni radar, ki meri le moč odmevov.

Radarski impulz se giblje v atmosferi približno enakomerno in z enako hitrostjo  $c$  kot v praznem prostoru. Dolžina njegove poti  $r$  do ovire je zato kar sorazmerna s časom zakasnitve  $t$ :

$$r = ct/2. \quad (5.1)$$

Radarji se med seboj razlikujejo po značilnostih snopa. Za opazovanje atmosfere so tipične naslednje vrednosti [10]: valovna dolžina 10 cm, širina snopa  $1^\circ$ , dolžina impulza  $1 \mu\text{s}$ , interval med dvema zaporednima impulzoma 1 ms, moč v impulzu 100 kW. Razlogi za navedene vrednosti bodo razvidni iz nadaljevanja.

Usmerjanje in sevanje antene ter shranjevanje in prikaz izmerjenih in digitaliziranih odmevov izvaja računalnik, ki je preko ustreznega vmesnika povezan z radarjem. Merjenje poteka ponavadi tako, da se antena vrti okrog vertikalne osi in po vsakem obratu spremeni nagib, elevacijo, glede na horizontalno ravnino. Radarski odmevi se sproti shranjujejo v računalnikov pomnilnik, kjer se uvrščajo v tridimenzionalno polje odmevov – radarsko sliko atmosfere. Kotna hitrost antene znaša blizu 3 obrate v minuti, elevacije antene ležijo med  $0$  in  $30^\circ$ , celotna meritev pa traja okrog 5 minut [10].

## 6. Sevanje in detekcija mikrovalov

Valovanje, ki iz valovoda vpada na anteno, se od nje odbija v prostor. Izsevana moč na enoto prostorskega kota – svetilnost  $I$  – v izbrani smeri glede na anteno je odvisna od dovajane moči  $P_0$  in od oblike ter razsežnosti antene. V določeni smeri, ósi antene, je svetilnost maksimalna,  $I_0$ . Omejimo se na antene z osnosimetričnim sevanjem. Takšno anteno opišemo z njenim osnim ojačenjem glede na izotropno sevanje

$$G_0 = \frac{I_0}{P_0/4\pi} \quad (6.1)$$

in s sevalnim diagramom

$$f_t(\theta) = \frac{I(\theta)}{I_0}. \quad (6.2)$$

S  $\theta$  je označen polarni kot glede na os antene. Sevalni diagram je na grobo opisan kar s kotom med osjo antene in smerjo, kjer se svetilnost zmanjša na polovico. Dvakratnik tega kota,  $\theta_0$ , kvantificira širino kota, v katerega seva antena.

Sevanje antene je možno izračunati ali izmeriti. Večina vremenskih radarjev ima anteno v obliki rotacijskega paraboloida z odprtim valovodom v gorišču. Če

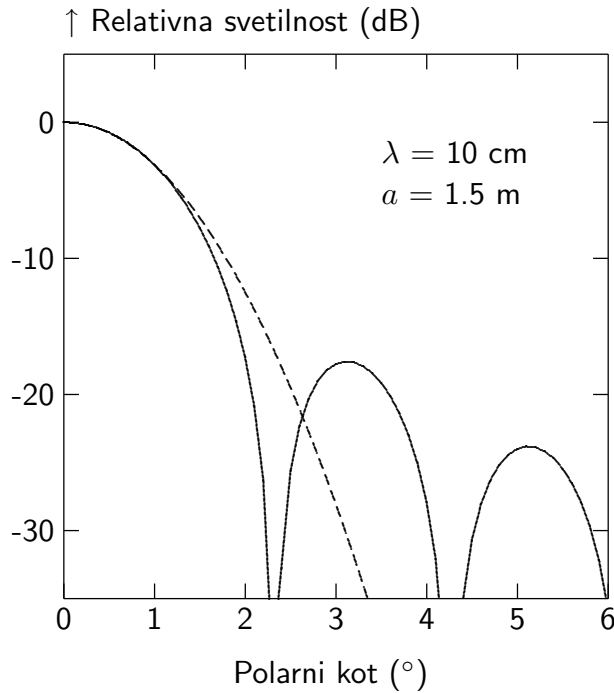
je takšna antena primerno osvetljena, je njeno sevalno polje podano z oddaljeno uklonsko sliko ravnega valovanja na krožni odprtini:

$$f_t(\theta) = \left( \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right)^2. \quad (6.3)$$

Radij antenske odprtine je označen z  $a$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  je valovni vektor valovanja z valovno dolžino  $\lambda$  in  $J_1$  je Besselova funkcija prvega reda. Sevalni diagram je prikazan na sliki 6.1. Širina glavnega maksimuma na polovični višini znaša

$$\theta_0 \doteq 1.0 \frac{\lambda}{2a}. \quad (6.4)$$

Antena s premerom 3 m torej seva valovanje z valovno dolžino 10 cm večinoma znotraj kota  $2^\circ$ . Pri enakomerni osvetlitvi odprtine je prvi stranski maksimum za 17.5 dB nižji od glavnega. Če je osvetlitev odprtine radialno neenakomerna, se spremenita širina glavnega maksimuma in njegova višina glede na stranske maksimume. S primerno osvetlitvijo je možno slednje znižati, a se pri tem širina glavnega maksimuma poveča [11].



Slika 6.1: Sevalni diagram krožne odprtine (polna črta) in normalna krivulja kot približek (prekinjena črta).

Sprejemne karakteristike antene so podobne sevalnim. Če vzporedno z osjo antene vpada nanjo gostota toka  $j$ , odbija antena v valovod moč

$$P_r = jA_0. \quad (6.5)$$

Z enačbo je definirana efektivna sprejemna površina antene  $A_0$ . Zaradi raznih izgub je ta površina manjša kot fizična površina odprtine. Občutljivost antene za sprejem istega toka  $j$  iz različnih smeri je podana s sprejemnim diagramom antene

$$f_r(\theta) = \frac{P_r(\theta)}{P_r(0)}. \quad (6.6)$$

Sprejemni diagram antene je enak sevalnemu [8] in skupaj ju poimenujemo smerni diagram  $f$ :

$$f_t = f_r \equiv f. \quad (6.7)$$

Tudi osno ojačenje antene in njena efektivna površina sta med seboj povezana; za poljubno anteno velja [8]

$$\frac{G_0}{A_0} = \frac{4\pi}{\lambda^2}. \quad (6.8)$$

Kako veliko anteno naj ima vremenski radar? Širina radarskega snopa je sorazmerna z valovno dolžino in obratnosorazmerna s premerom antene. Ožji snop omogoča večjo kotno ločljivost pri merjenju ovir, vendar traja zato merjenje celotne atmosfere dalj časa. Občutljivost antene narašča z drugo potenco premera, cena pa približno s tretjo potenco. Tako je velikost antene v praksi določena s kompromisom med potrebno valovno dolžino, občutljivostjo, kotno ločljivostjo, časom merjenja in ceno.

## 7. Lom mikrovalov v atmosferi

Pri radarskem merjenju je lega ovire v prostoru določena z azimutnim in elevacijskim kotom antene ter z razdaljo od radarja. Iz teh treh koordinat je potrebno določiti, kako visoko nad tlemi je ovira in kako daleč od radarja, merjeno po glavnem zemeljskem krogu, je njena talna projekcija. Privzamemo, da je radar na morski gladini. Upoštevanje nadmorske višine je preprosto.

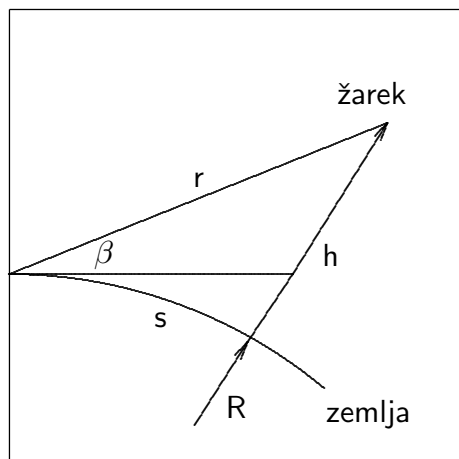
V prvem približku je lomni kvocient v atmosferi konstanten in radarski snop se zato nič ne lomi. Radarski žarek v takšni nelomeči atmosferi je prikazan na sliki 7.1. Z uporabo kosinusnega izreka določimo odvisnost višine  $h$  od žarkovne razdalje  $r$  in elevacijskega kota  $\beta$ :

$$h \doteq \frac{r^2}{2R} + r \sin \beta. \quad (7.1)$$

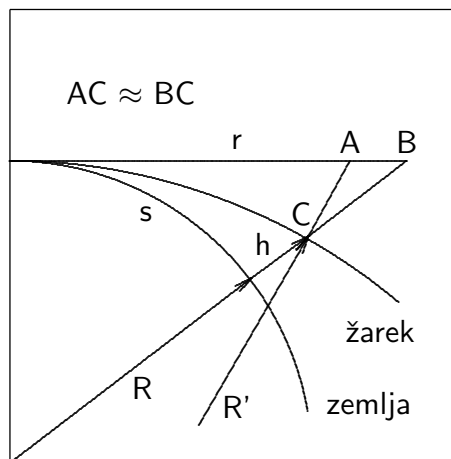
Z  $R$  je označen radij Zemlje. Horizontalno izsevani žarek je zaradi ukrivljenosti zemeljske površine dvignjen nad površjem pri razdalji 200 km že za 3 km. Merjenja padavin pri tleh na velikih oddaljenostih torej niso več možna. Sinusni izrek nadalje pokaže, da znaša oddaljenost  $s$  do talne projekcije ovire

$$s \doteq r \cos \beta. \quad (7.2)$$

Pri horizontalnem žarku sta žarkovna in talna razdalja približno enaki.



Slika 7.1. Radarski žarek v nelomeči atmosferi.



Slika 7.2. Radarski žarek v lomeči atmosferi.

Lomni količnik  $n$  atmosfere seveda ni povsod enak. Kot je znano, je pri neferomagnetni snovi povezan z dielektričnostjo  $\epsilon$  takole:  $n^2 = \epsilon$ . Dielektričnost je odvisna od številske gostote  $N/V$  in električne polarizabilnosti  $\alpha$  molekul v snovi; za plin velja  $\epsilon = 1 + N\alpha/\epsilon_0 V$ . Lomni količnik je torej v atmosferi opisan z enico in dvema členoma, od katerih je prvi sorazmeren z gostoto suhega zraka, drugi pa z gostoto vodne pare. Sorazmernostna koeficienta vsebujeta polarizabilnost molekul. Molekule dušika in kisika, ki sestavljajo suh zrak, so nepolarne in njihova polarizabilnost je neodvisna od temperature. Molekule vodne pare so polarne in njihova polarizabilnost je obratno sorazmerna s temperaturo. Nadalje je gostota plina sorazmerna z njegovim pritiskom in obratnosorazmerna s temperaturo. Ob upoštevanju, da je delni pritisk vodne pare  $e$  mnogo manjši od celotnega pritiska  $p$ , temperaturi  $T$  pare in suhega zraka pa enaki, velja zato

$$n = 1 + a \frac{p}{T} + b \frac{e}{T^2}. \quad (7.3)$$

Oba koeficienta je potrebno določiti eksperimentalno. Merjenja [11] kažejo, da znaša  $a = 7.8 \times 10^{-5} \text{ K/mb}$  in  $b = 3.7 \times 10^{-1} \text{ K}^2/\text{mb}$ . V tipični atmosferi se torej lomni količnik razlikuje od 1 največ za tisočinko. S tem je naknadno opravičen prejšnji približek, da je hitrost radarskih impulzov v atmosferi enaka kot v praznem prostoru: pri določanju oddaljenosti ovire po enačbi (5.1) se pri razdalji 100 km zmotimo manj kot za 0.1 km.

Lomni količnik se z višino spreminja. Ukrivljenost radarskega žarka v izbrani točki je enaka relativnemu gradientu lomnega količnika v smeri pravokotno na žarek. Pri približno horizontalnem žarku lahko namesto pravokotnega uporabimo

kar vertikalni gradient. Ker je lomni količnik zelo blizu 1, nadomestimo njegov relativni gradient z absolutnim. Krivinski radij  $R'$  žarka je potem podan z enačbo

$$\frac{1}{R'} \approx \frac{\partial n}{\partial h}. \quad (7.4)$$

Če se spreminja lomni količnik z višino linearno, je približno horizontalni žarek povsod enako ukrivljen in ima zato obliko krožnega loka. Za suho izotermno atmosfero je polje lomnega količnika preprosto določiti. Z diferenciranjem enačbe (7.3) in z upoštevanjem hidrostatične ter plinske enačbe se pokaže, da je vertikalni gradient lomnega količnika sorazmeren s pritiskom, torej da pojema lomni količnik z višino eksponentno. V ne predebeli prizemni plasti je pa pojemanje z višino približno linearno in pri tipičnih vrednostih temperature in pritiska blizu številске vrednosti  $1/4R$  [11].

Na sliki 7.2 je prikazan radarski žarek v lomeči atmosferi. Višina horizontalnega ravnega žarka nad Zemljo z radijem  $R$  je enaka  $r^2/2R$ . Višina istega žarka nad navzdol ukrivljenim žarkom s krivinskim radijem  $R'$  je približno enaka  $r^2/2R'$ . Višina ukrivljenega žarka nad tlemi je razlika obeh višin in zato podana kar z enačbo (7.1), če namesto pravega radija Zemlje vpeljemo njen ekvivalentni radij  $R^*$ :

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R'}. \quad (7.5)$$

Z upoštevanjem tipične vrednosti za ukrivljenost  $1/R' \sim 1/4R$  znaša ekvivalentni radij Zemlje približno  $4/3$  pravega radija. Ukrivljeni horizontalni žarek je torej nad zemeljsko površino dvignjen le za  $3/4$  toliko kot ravni žarek. Pri razdalji 200 km znaša razlika med obema žarkoma skoraj 1 km.

Temperatura in vlaga v spodnji plasti atmosfere se včasih znatno spreminjata z višino in približek o linearnem profilu lomnega količnika postane slab. To se ponavadi zgodi v nočnih prizemnih inverzijah temperature. Za takšne primere je potrebno določiti pot radarskih impulzov v poljubno stratificirani atmosferi na naslednji način.

V radialno simetričnem polju lomnega količnika  $n(h)$  je vzdolž žarka količina  $n(h)(R+h)\cos\beta$  konstantna;  $\beta$  je elevacijski kot med žarkom in horizontalno ploskvijo  $h = \text{const}$ . Za kratek odsek  $dr$  žarka velja  $dr = dh/\sin\beta$ . Sinus izrazimo s kosinusom iz količine, ki je konstantna, in integriramo po višini:

$$r(h) = \int_0^h \frac{(1+h/R)n dh}{\sqrt{n^2(1+h/R)^2 - n_0^2 \cos^2\beta_0}}. \quad (7.6)$$

Konstanti  $n_0$  in  $\beta_0$  označujeta lomni količnik atmosfere na nadmorski višini radarja in začetni elevacijski kot žarka na tej višini. Odvisnost višine žarka  $h$  od njegove dolžine  $r$  je podana implicitno; pri znanem vertikalnem profilu lomnega količnika jo lahko tabeliramo za različne začetne elevacijske kote  $\beta_0$ .

Podobno izpeljemo tudi odvisnost med višino žarka  $h$  in dolžino njegove talne projekcije  $s$ :

$$s(h) = \int_0^h \frac{n_0 \cos\beta_0 dh}{(1+h/R)\sqrt{n^2(1+h/R)^2 - n_0^2 \cos^2\beta_0}}. \quad (7.7)$$

Odvisnost je spet implicitna in jo lahko tabeliramo. Enačbi (7.6) in (7.7) se v mejnem primeru  $n = 1$  poenostavita v enačbi (7.1) in (7.2).

## 8. Absorpcija, sipanje in odboj mikrovalov

Mikrovalovi, ki vpadajo na molekule zraka ali na padavinske delce, se deloma absorbirajo in deloma sipljejo. Absorbirana moč, sipana moč in smerna porazdelitev sipane moči so odvisne od valovne dolžine in polarizacije valovanja, od velikosti in oblike delca ter od njegovih snovnih lastnosti.

Absorbirana in sipana moč  $P_a$  in  $P_s$  sta sorazmerni z gostoto vpadajočega toka  $j$ :

$$P_a = \sigma_a j, \quad (8.1)$$

$$P_s = \sigma_s j. \quad (8.2)$$

Z enačbama sta definirana absorpcijski in sipalni presek delca,  $\sigma_a$  in  $\sigma_s$ .

Zaradi absorpcije in sipanja se iz radarskega impulza izloča energija. Sprememba gostote toka  $j$  na kratki razdalji  $dr$  znaša

$$dj/j = -kdr, \quad (8.3)$$

$$k = \int \sigma_a \frac{dn}{d\sigma_a} d\sigma_a + \int \sigma_s \frac{dn}{d\sigma_s} d\sigma_s. \quad (8.4)$$

Koeficient dušenja  $k$  označuje vsoto absorpcijskih in sipalnih presekov v prostorninski enoti. Na daljši poti se spremembe seštevajo.

Molekula v zraku, na katero vpadajo mikrovalovi, čuti homogeno in nihajoče električno polje. V nepolarnih molekulah se zato influira električni dipol, v polarnih pa se permanentni dipol usmeri v smeri polja. Obakrat niha dipol s frekvenco zunanega polja in seva. Amplituda nihanja je odvisna od frekvence polja in zelo naraste v bližini resonančnih frekvenc sipalcev. V območju radarskih frekvenc ni takih resonanc; dušenje je zato majhno in znaša približno 1 dB na 100 km [11].

Padavinski delci vplivajo na širjenje mikrovalov podobno kot molekule v plinu. Del vpadajoče energije se pretvori v termično gibanje molekul, del pa influira molekularne električne dipole. Padavinski delci so lahko različno veliki glede na valovno dolžino radarskega sevanja. V drobnih okroglih delcih je električno polje homogeno in molekularni dipoli nihajo sinhrono. Absorpcijski in sipalni presek takega delca s premerom  $D$  sta podana z enačbami

$$\sigma_a = \pi^2 \operatorname{Im}(-K) \frac{D^3}{\lambda}, \quad (8.5)$$

$$\sigma_s = \frac{2\pi^5}{3} |K|^2 \frac{D^6}{\lambda^4}, \quad (8.6)$$

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}. \quad (8.7)$$

Z  $m$  je označen kompleksni lomni količnik, sestavljen iz realnega lomnega količnika  $n$  in realnega absorpcijskega koeficienta  $\kappa$ :  $m = n - i\lambda\kappa/4\pi$ . Pri valovni dolžini 10 cm in pri temperaturi 0°C znašata kompleksni komponenti 9.0 in 1.5 za vodo ter 1.8 in 0.0 za led [9]. Konstanta  $|K|^2$  ima tako vrednost 0.93 za vodo in 0.18 za led. Dežne kapljice torej sipajo mikrovalove petkrat bolj kot ledena zrna iste velikosti. Sorazmernost sipalnega preseka s šesto potenco premera pride od tod, da je influirani dipolni moment sorazmeren s prostornino kapljice, moč, ki jo seva, pa sorazmerna z njegovim kvadratom.

Lomni količnik vode je odvisen od frekvence zunanega polja. Pri frekvencah mikrovalov je konstanten, pri optičnih pa se zmanjša, saj se molekularni dipoli ne morejo dovolj hitro obračati. V ledu so dipoli med seboj sklopljeni in lomni količnik je zato ustrezno manjši.

Porazdelitev sipane moči po smereh v splošnem ni izotropna. Pri radarskem merjenju je pomembna nazaj sipana moč na enoto prostorskega kota, torej svetilnost  $I_b$  delca v nasprotni smeri vpadajočega valovanja  $j$ . S to svetilnostjo je definiran odbojni presek delca  $\sigma$ :

$$I_b 4\pi = \sigma j. \quad (8.8)$$

Če sipa sipalec izotropno, je njegov odbojni presek enak sipalnemu. Kotna porazdelitev sipane svetlobe je pri majhnih sipalcih približno taka, kakršno je sevalno polje nihajočega dipola. Svetilnost v nasprotni smeri vpadajočega valovanja je zato 3/2-krat večja kot povprečna svetilnost. Za toliko je torej tudi odbojni presek večji od sipalnega:

$$\sigma = \frac{3}{2} \sigma_s. \quad (8.9)$$

Zapisane enačbe za preseke veljajo le za drobne okrogle delce. Kot prvi približek so uporabne tudi za drobne delce drugačnih oblik, če pod premerom  $D$  razumemo premer, ki bi ga ti delci imeli v kroglasti obliki. Čim večja je dielektričnost sipalca, tem bolj se pozna vpliv njegove oblike. Snežinke, ki imajo zaradi luknjičavosti nizko efektivno dielektričnost, lahko kar dobro obravnavamo kot okrogle. Sipalni presek podolgovatih ali ploščatih delcev je nadalje odvisen od orientacije njihovih osi glede na polarizacijsko ravnino valovanja. Razmerje med največjim in najmanjšim presekom je iste stopnje velikosti kot razmerje med ustreznima premeroma.

Če so dimenzije delcev primerljive z valovno dolžino valovanja, dipoli v delcu ne nihajo več sinhrono in pojavijo se medsebojne destruktivne interference. Velik delec ima lahko zato manjši odbojni presek kot manjši delec. Delci, mnogo večji od valovne dolžine, pa imajo sipalni presek kar enak geometrijskemu.

Kakšna valovna dolžina je primerna za vremenski radar? Odbojni presek delca je sorazmeren s šesto potenco njegovega premera in obratnosorazmeren s četrto potenco valovne dolžine mikrovalov. Čim krajši so radarski valovi, tem močnejši so odboji, vendar je zato večje tudi dušenje. Izbira primerne valovne dolžine za merjenje je torej nujen kompromis med nasprotujočima si zahtevama po močnem odmevu in majhnem dušenju. Seveda pa naj bi bila valovna dolžina v vsakem primeru dosti večja od premera padavinskih delcev.



## 9. Moč odmevov in odbojnost padavin

Radarski sistem meri od ovir odbito moč. Kakšna je povezava med močjo odmeva in odbojnimi preseki ovir?

Iz oddajnika naj doteka v anteno moč  $P_0$ . Svetilnost antene vzdolž osi znaša  $G_0 P_0 / 4\pi$ . Če zanemarimo dušenje v atmosferi, pojema gostota toka mikrovalov  $j$  s kvadratom oddaljenosti. Pri vpadu na oviro se nazaj odbije  $\sigma j / 4\pi$  moči v enoto prostorskega kota. Gostota odbitega toka tudi pojema s kvadratom oddaljenosti. Antena sprejme in usmeri v sprejemnik moč  $P_r = j A_0$ , torej velja

$$P_r = \frac{P_0 G_0 A_0 \sigma}{16 \pi^2 r^4}. \quad (9.1)$$

Enačba opisuje odboj od ene ovire v osi snopa. Padavinski delci v atmosferi pa so prostorsko porazdeljeni in zanje je potrebno enačbo razširiti. V prvem približku privzamemo, da seva antena le znotraj kota  $\theta_0$  in to izotropno. Zaradi končne dolžine impulza  $c\tau$  se v poljubnem trenutku hkrati vračajo odmevi iz dolžinskega intervala  $c\tau/2$ , torej iz prostornine  $\pi(r\theta_0)^2 c\tau/2$  – radarske merilne prostornine. Vsi ti odmevi interferirajo konstruktivno ali destruktivno, kakor so pač že medsebojno razporejeni padavinski delci takrat, ko jih preleti radarski impulz. Moči odmevov se od impulza do impulza spreminjajo, če se delci medtem dovolj pre-razporedijo. Pri povprečenju moči preko več zaporednih impulzov se fluktuacije približno izravnavajo; povprečna moč odmeva je tedaj enaka vsoti moči, ki bi jih odbijali med seboj neinterferirajoči sipalci. Vsoto odbojnih presekov na prostorninsko enoto, prostorninsko odbojnost, označimo z  $\eta$  in predpostavimo, da je konstantna po vsej merilni prostornini. Enačba (9.1) se potem zapiše v obliki

$$\bar{P}_r = \frac{P_0 G_0 A_0 \theta_0^2 c\tau \eta}{128 \pi r^2}. \quad (9.2)$$

Jakost odmeva je torej sorazmerna s prostorninsko odbojnostjo ovir in obratnosorazmerna s kvadratom njihove oddaljenosti od radarja. Sorazmernostna konstanta vsebuje radarske parametre. Za močne odmeve so potrebni velika moč sevanja, dolgi impulzi in razsežna antena.

Mogoče je, da so uporabljene poenostavitve preveč grobe. Sevanje antene znotraj snopa ni izotropno, dušenje v atmosferi ni zanemarljivo in porazdelitev delcev po merilnih prostorninah ni homogena. Natančnejša oblika radarske enačbe naj bi vse to vključevala. Izpeljemo jo takole.

Svetilnost antene v izbrani smeri pojema zaradi dušenja, zato se gostota toka v tej smeri zmanjšuje sorazmerno z  $\exp(-\int k dr)/r^2$ . Porazdelitev sipalcev v prostorninski enoti po odbojnem preseku,  $dn/d\sigma$ , je v različnih točkah atmosfere različna. Ob času  $t$  zazna radar odmeve iz vseh smeri naenkrat. Pri tem se hkrati vračajo tudi odmevi iz različnih razdalj: z razdalje  $r$  se vrnejo odmevi tiste moči, ki je bila izsevana ob času  $t - 2r/c$ . Prispevki vseh odmevov se seštevajo. Z integracijo odbojev iz vseh prostorskih kotov  $d\Omega$  in razdalj ter ob upoštevanju smernega

diagrama antene, dvostranske absorpcije in povezave antenskih parametrov  $G_0$  in  $A_0$  dobimo iskano enačbo

$$\bar{P}_r(t) = \frac{G_0^2 \lambda^2 \exp(-2 \int_0^r k dr)}{64 \pi^3} \int f^2 d\Omega \int \frac{P_0(t - 2r/c)}{r^2} dr \int \sigma \frac{dn}{d\sigma} d\sigma. \quad (9.3)$$

To je splošna oblika radarske enačbe za (nekoherentno) sipanje elektromagnetnega valovanja na množici prostorsko porazdeljenih ovir. Lahko jo poenostavimo, če privzamemo naslednje omejitve glede karakteristik radarskega sevanja in ovir.

1. Zaporedno izsevani radarski impulzi se širijo v prostor s svetlobno hitrostjo kot krogelne lupine debeline  $c\tau$ . Med širjenjem se iz vsakega impulza nenehno izloča energija in se vrača k anteni. Če so zaporedni impulzi med seboj dovolj oddaljeni, so energijsko znatni le odmevi zadnjega impulza. Gostota energije v impulzu namreč hitro pojema z razdaljo. Tako lahko zapišemo  $\int P_0 dr / r^2 \approx P_0 c\tau / 2r^2$ .

2. Stranski sevalni maksimumi so pri primerno osvetljenih antenah zanemarljivi v primerjavi z glavnim. Smerni diagram antene lahko zato aproksimiramo z normalno krivuljo  $f(\theta) \approx \exp(-4 \ln 2 \theta^2 / \theta_0^2)$ .

3. Če so radarski impulzi dovolj kratki in snop dovolj ozek, lahko privzamemo, da je porazdelitev ovir po odbojnem preseku približno konstantna po vseh merilnih prostorninah.

4. V primeru, da so sipalni in absorpcijski preseki ovir dovolj majhni, je energijski tok, ki se siplje iz snopa, zanemarljiv v primerjavi s prepuščenim tokom. Sipalni in absorpcijski preseki drobnih ovir se manjšajo z naraščanjem valovne dolžine; dovolj dolgi valovi so torej zanemarljivo dušeni in lahko predpostavimo  $k = 0$ .

Ob upoštevanju navedenih poenostavitev zavzame splošna radarska enačba (9.3) naslednjo obliko:

$$\bar{P}_r = \frac{G_0^2 \theta_0^2 \lambda^2 P_0 c\tau \eta}{1024 \pi^2 \ln 2 r^2}. \quad (9.4)$$

Z meritvijo moči odmevov ob času  $t$  po izsevanju vsakega impulza je torej enolično določena volumska odbojnost ovir v smeri antene pri razdalji  $r = ct/2$ . Enačba (9.4) se razlikuje od enačbe (9.2) za dodatni faktor  $1/2 \ln 2 \approx 0.7$ .

Če je valovna dolžina radarskega sevanja veliko večja od padavinskih delcev, so njihovi odbojni preseki podani z enačbama (8.6) in (8.9). Predpostavimo še, da so vsi padavinski delci v merilni prostornini v enakem agregatnem stanju. Potem se radarska enačba poenostavi v standardno obliko

$$\bar{P}_r = C |K|^2 \frac{Z}{r^2}, \quad (9.5)$$

$$C = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \frac{G_0^2 \theta_0^2 P_0 c\tau}{\lambda^2}, \quad (9.6)$$

$$Z = \int D^6 \frac{dn}{dD} dD. \quad (9.7)$$

Prvi je zapisano enačbo izpeljal Probert-Jones [32].  $Z dn/dD$  je označena porazdelitev delcev v prostorninski enoti po ekvivalentnem premeru. Količino  $Z$

imenujemo radarsko odbojnost padavin. Pridevnik bomo v nadaljevanju izpuščali.  $Z$  merjenjem odbite moči  $\bar{P}_r$  pri razdalji  $r$  je tamkajšnja odbojnost  $Z$  enolično določena, če seveda poznamo agregatno stanje padavin. Radarska konstanta  $C$  je namreč znana funkcija radarskih parametrov. V uporabljenem približku je odbojnost  $Z$  neodvisna od valovne dolžine radarskega valovanja in zato primernejša za uporabo od prostorninske odbojnosti  $\eta$ .

Tipična radarska konstanta znaša  $10^{-9} \text{ W km}^2/\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$  [9]. Najmanjša moč, ki jo sodobni radarji zaznajo, je zaradi termičnega šuma v sprejemniku omejena na  $10^{-14} \text{ W}$  [9]. Radar lahko torej zazna eno samo kapljico premera 1 mm v celotni merilni prostornini na oddaljenosti 20 km.

Radarska enačba (9.5) je zgolj aproksimacija. Veljavna je le, če je dušenje snopa zanemarljivo, zapolnjenost snopa enakomerna, delci pa vsi v istem agregatnem stanju, okrogli in mnogo manjši od valovne dolžine radarskega sevanja. V splošnem ni tako, zato postuliramo

$$\bar{P}_r = C |K_w|^2 \frac{Z_e}{r^2} \quad (9.8)$$

in s tem definiramo ekvivalentno odbojnost  $Z_e$  za poljubno oviro, tudi za letalo ali hrib. Konstanta  $K_w$  se nanaša na vodo. Vremenski radarji vedno merijo ekvivalentne odbojnosti po enačbi (9.8).

Kadar so izpolnjene zgoraj omenjene predpostavke, velja med odbojnostjo in ekvivalentno odbojnostjo padavin povezava

$$Z_e = \frac{|K|^2}{|K_w|^2} Z. \quad (9.9)$$

Izmerjena ekvivalentna odbojnost je odvisna od agregatnega stanja padavin. Mnogi dežnih kapljic in ledenih delcev, ki imata enaki porazdelitvi po velikosti, imata različni ekvivalentni odbojnosti: tista za led je petkrat nižja. V nadaljevanju bomo pridevnik ekvivalentni večinoma izpuščali.

Odbojnosti oblakov zavzemajo širok interval vrednosti, zato jih ponavadi podajamo v logaritemski obliki  $10 \log(Z_e/1 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3})$ . Normirani logaritem odbojnosti, logaritemska odbojnost, ima enoto  $1 \equiv \text{dBZ}$ <sup>1</sup>. Pridevnik logaritemski bomo v nadaljevanju večinoma izpuščali; nanj bo opozarjala enota dBZ. Konvektivni oblak na začetku razvoja, ko v njem še ni padavinskih delcev, ima odbojnost 0 dBZ, močno razvit nevihtni oblak z velikimi zrni toče pa preko 60 dBZ.

Kdor je že meril z radarjem, ve, da so v pasu taljenja padavin radarski odmevi močnejši kot nad njim ali pod njim. Razlog je naslednji. Nad izotermo  $0^\circ\text{C}$  imajo padavinski delci večinoma obliko ledenih konglomeratov bolj ali manj ploščate oblike. Ko se ledeni delci med padanjem začno taliti, se obdajo s plastjo vode, zato se jim poveča dielektričnost, s tem pa tudi odbojni preseki. Po popolni stalitvi se konglomerati preoblikujejo v kapljice. Te imajo manjše premere in hitreje padajo, zato se tik pod plastjo taljenja zmanjša njihovo število na prostorninsko enoto.

<sup>1</sup> Logaritemska razmerja količin so opisana v dodatku A.

Oboje, zmanjšanje ekvivalentnih premerov in zmanjšanje številske gostote sipalcev, pa povzroči tudi zmanjšanje jakosti odbojev. V stratiformnih padavinah so ledeni konglomerati precej ploščati in padajo počasi, v konvektivnih pa so skoraj kroglasti in padajo hitro. Od tod tudi razlika v jakosti in širini maksimumov odbojnosti.

## 10. Fluktuacije radarskih odmevov

Padavinski delci v izbrani točki oblaka se medsebojno gibljejo zaradi različnih hitrosti padanja in zaradi turbulentnega gibanja zraka. Ob preletu enega impulza, to je približno v času  $1 \mu\text{s}$ , delci ne spremenijo znatno medsebojne lege. Med dvema zaporednima impulzoma se pa že uspejo bolj ali manj preurediti. Moč zaporednih odmevov zato fluktuirajo. Koliko impulzov je potrebnih in koliko naj bodo medsebojno zakasneni, da bo njihovo povprečje dovolj dobro? In kakšna je porazdelitev odmevov po moči?

Če si dva zaporedna impulza sledita prehitro, se padavinski delci v vmesnem času premaknejo le za majhen del valovne dolžine. Odmeva od takih impulzov nista statistično neodvisna; interference so pri obeh podobne in se ne izravnavajo. Statistična neodvisnost je zagotovljena le pri dovolj redkih impulzih. Le pri njih se interference v povprečju izravnavajo in njihovo povprečje lahko utemeljeno uporabimo za izračun odbojnosti po radarski enačbi. Kot statistično neodvisne ocenimo impulze, ki si sledijo v takem času  $T$ , da se medtem padavinski delci premaknejo za četrtno valovne dolžine  $\lambda$ :

$$T \sim \frac{\lambda}{4\sigma_v}. \quad (10.1)$$

S  $\sigma_v$  je označena disperzija hitrosti v smeri radarskega žarka. Pri tipični disperziji  $1 \text{ m/s}$  in valovni dolžini  $10 \text{ cm}$  ima iskani čas stopnjo velikosti  $10^{-2} \text{ s}$ . Konvencionalni vremenski radarji zato sevajo po nekaj sto impulzov na sekundo. Bolj podrobno se v analizo statistične neodvisnosti ne bomo spuščali.

Valovanje, ki se odbije od množice padavinskih delcev, je superpozicija delnih odbitih valovanj. Hitrosti delcev so majhne, zato je sprememba frekvence valovanja pri odboju zanemarljiva. Odmev je torej superpozicija harmoničnih valovanj enakih frekvenc a različnih amplitud in faznih zamikov, torej tudi harmonično valovanje določene amplitude in faznega zamika. Amplituda in fazni zamik sestavljenega odmeva se od impulza do impulza spreminjata, in to nepredvidljivo: sta torej slučajni spremenljivki. Tudi kompleksna amplituda odmeva, ki obe količini vsebuje, je slučajna spremenljivka. Enaka je vsoti velikega števila posameznih kompleksnih amplitud, ki so slučajne in med seboj neodvisne, zato je porazdeljena normalno. Moč odmeva je sorazmerna s kvadratom absolutne vrednosti kompleksne amplitude, zato je porazdeljena eksponentno. Delež odmevov  $dN/N$  z močjo na intervalu  $P \pm dP/2$  znaša torej

$$\frac{dN/N}{dP} = \frac{1}{\bar{P}} \exp(-P/\bar{P}). \quad (10.2)$$

Pri eksponentni porazdelitvi je disperzija enaka povprečni vrednosti:  $\sigma_P = \bar{P}$ . Povprečna moč  $\bar{P}$ , izračunana iz vzorca  $N$  statistično neodvisnih impulzov, se od pravega povprečja  $\tilde{P}$  razlikuje za  $\sigma_P/\sqrt{N}$ , zato velja

$$\tilde{P} = \bar{P} \left( 1 \pm 1/\sqrt{N} \right). \quad (10.3)$$

Relativna napaka, ki jo pri merjenju moči zagrešimo, znaša torej  $1/\sqrt{N}$ . Ker je odbojnost sorazmerna s povprečno močjo, je tudi sama določena z enako relativno natančnostjo. Čim natančneje jo hočemo izmeriti, tem več impulzov moramo uporabiti. Ker pa razmiki med impulzi ne smejo biti prekratki, da zagotovimo njihovo statistično neodvisnost, lahko postane čas merjenja precej dolg. Ponavadi se omejimo na nekaj deset impulzov iz vsake merilne prostornine v atmosferi [10]. Pri tem dosežemo natančnost, slabšo od 10 odstotkov: odbojnosti so določene na 1 dBZ natančno. Bolj natančno nima smisla meriti, ker že sam radar težko kalibriramo tako dobro.

Količina, ki jo konvencionalni radar neposredno meri, je moč odmevov. Z radarsko enačbo lahko iz izmerjene moči izračunamo ekvivalentno odbojnost padavin. Pri merjenju padavin pa nas pravzaprav zanimajo njihova vrsta, jakost in talne akumulacije. Tekoče poglavje prikazuje, kako lahko te količine določimo iz znane odbojnosti. Pri tem se opira na monografije [7], [9] in [6] ter na zbirna članka [36] in [20].

## 11. Vrsta padavin

Vrsto padavin ocenimo najbolj preprosto, če poznamo temperaturo pri tleh ali vertikalni temperaturni profil v atmosferi: pri pozitivnih temperaturah pada dež in pri negativnih sneg. V območjih s temperaturo  $0^{\circ}\text{C}$  so pa taleči se ledeni delci.

Če temperaturnih podatkov ni na razpolago, lahko določimo višino izoterme  $0^{\circ}\text{C}$  iz tridimenzionalnega polja odbojnosti. Polje horizontalno povprečimo in pogledamo, na kateri višini se kaže maksimum: tam je pas taljenja in tik nad njim je iskana izoterma. Ugodno je meriti čim bližje radarja, kjer je radarski snop ozek in vertikalna ločljivost zato velika. Če so padavine nad radarjem, lahko pas taljenja odkrijemo kar z navpično usmerjeno anteno. Nad pasom taljenja so potem ledeni delci, pod njim pa dež.

Premeri vodnih kapljic ne morejo biti poljubno veliki, saj se večje kapljice začno razletavati. Ponavadi njihov ekvivalentni premer ne presega 5 mm. Prav takó je tudi število kapljic na prostorninsko enoto omejeno s številom razpoložljivih kondenzacijskih jeder. Kapljic s premerom nad 1 mm, ki največ prispevajo k radarski odbojnosti, je le nekaj sto v kubičnem metru. Odbojnost množice kapljic je torej tudi omejena in ponavadi ne presega vrednosti 50 dBZ. Večje odbojnosti pomenijo zato prisotnost zrn toče. Nasprotno pa nekaj manjše odbojnosti še ne zagotavljajo, da toče ni; to lahko trdimo le za dosti manjše odbojnosti, recimo za tiste pod 30 dBZ. Tudi višina, na kateri je izmerjena odbojnost, skriva koristne informacije: čim višja je lega in čim večja je odbojnost, tem večja je tudi verjetnost za točo. Meritve v Švici [34] so pokazale, da točo najdemo v 50% primerov, ko odbojnost 45 dBZ seže preko višine 1.4 km nad izotermo  $0^{\circ}\text{C}$ .

Dodatne možnosti za določevanje vrste padavin se ponudijo, če lahko radar spreminja polarizacijo izsevanih mikrovalov. Padajoče dežne kapljice in ledeni konglomerati so namreč sploščeni v vertikalni smeri, zato različno odbijajo horizontalno ali vertikalno polarizirane mikrovalove. Odboj pri vertikalni polarizaciji je manjši. Zrna toče so pa približno okrogla in enako odbijajo kakorkoli polarizirane mikrovalove. Obe količini, odbojnost (horizontalna ali vertikalna) in kvocient obeh odbojnosti, diferencialna odbojnost, lahko služita kot indikator za vrsto padavin. Pri tem je diferencialna odbojnost nad mejo 1–2 dB znak za snežinke.

Vertikalni profil diferencialne odbojnosti nadalje dobro pokaže lego pasu taljenja in s tem višino izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ . Je pa tudi res, da je za to bolj preprosto uporabiti kar profil navadne odbojnosti.

## 12. Jakost padavin

Osnovna količina, ki nas pri merjenju padavin zanima, je jakost padavin. Defini-rana je kot prostornina vode, ki v časovni enoti pade na vodoravno ploskovno enoto. Če so padavine v obliki snega, velja dogovor, da podamo njihovo pros-tornino v staljeni obliki.

Jakost padavin  $I$  je popolnoma določena z velikostnim spektrom  $dn/dD$  in s hitrostjo padanja  $v$  padavinskih delcev:

$$I = \frac{\pi}{6} \int D^3(v(D) - w) \frac{dn}{dD} dD. \quad (12.1)$$

Vertikalna hitrost zraka je označena z  $w$ . Pri tleh je zanemarljiva, višje v oblakih pa ne vedno. Ker je tudi odbojnost padavin definirana z velikostnim spektrom delcev, sta obe količini – odbojnost in jakost padavin – med seboj povezani. Povezavo lahko določimo, če poznamo spekter in hitrost padanja delcev. S tem namenom privzamemo, da so padavinski delci porazdeljeni po velikosti eksponentno (4.1) in da padajo v mirnem zraku po potenčnem zakonu (4.2). Vstavitev obeh izrazov v definicijski enačbi za odbojnost (9.7) in za jakost padavin (12.1) pokaže

$$Z = \Gamma(7)(dn/dD)_0 D_0^7, \quad (12.2)$$

$$I = \frac{\pi}{6} a \Gamma(4 + b)(dn/dD)_0 D_0^{4+b}. \quad (12.3)$$

Iz obeh enačb dobimo iskano povezavo

$$Z = AI^B, \quad (12.4)$$

$$B = 7/(b + 4), \quad (12.5)$$

$$A = \Gamma(7)(dn/dD)_0^{1-B} (6/\pi \Gamma(b + 4)a)^B. \quad (12.6)$$

Parametra  $A$  in  $B$  sta določena z vrednostmi  $a$ ,  $b$  in  $(dn/dD)_0$  ali neposredno s primerjavo med radarskimi meritvami odbojnosti  $Z$  in ombrometrskimi meritvami jakosti padavin  $I$ . Toda velikostna spektra dežnih kapljic in snežink variirata v prostoru in času, zato se  $A$  in  $B$  spreminjata. Izmerjenih je na ducate parov vrednosti. Prva sta se tega lotila Marshall in Palmer [41] in za stratiformni dež našla  $B = 1.6$  in  $A = 200 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3} / (\text{mm h}^{-1})^B$ .

Enačba (12.4) je aproksimacija. Velja le, če so padavinski delci porazdeljeni po premeru eksponentno, če so njihove hitrosti padanja dovolj dobro podane s potenčnim zakonom in če so vertikalni zračni tokovi zanemarljivi v primerjavi s hitrostmi padanja.

Radarska enačba (9.5) in povezava med odbojnostjo ter jakostjo padavin (12.4) predstavljata osnovo za radarsko merjenje padavin. Izmerjeno moč odmeva povezujeta z jakostjo padavin v radarskem snopu. Dobro ujemanje med radarskimi in lokalnimi meritvami lahko pričakujemo, kadar so izpolnjeni vsi predpostavljeni merilni pogoji. Glavni vzrok napak je v tem primeru variabilnost parametrov  $(dn/dD)_0$ ,  $a$  in  $b$  in s tem povezana variabilnost parametrov  $A$  in  $B$ .

### 13. Talna količina padavin

V vsakdanjem življenju nas navadno ne zanima, kakšne so jakosti padavin v oblakih, pač pa, koliko jih pade na tla v določenem času na določenem kraju. To pove talna količina padavin  $Q$ :

$$Q = \int I dt. \quad (13.1)$$

Količino padavin podajamo navadno v mm. Zraven je treba povedati, za kako dolg čas velja. Pod jakostjo padavin  $I$  v enačbi (13.1) seveda razumemo jakost tik nad tlemi. Radar mora biti torej nameščen tako, da lahko meri čim bližje tlam. To je možno le pri krajših razdaljah. Daleč proč od radarja si pomagamo na dva načina: ali privzamemo, da so padavine vertikalno homogene, ali pa najdemo kako pot, da iz višinskih meritev ocenimo prizemne jakosti padavin.

Količina padavin je v vsaki točki zemeljske površine v splošnem različna. Opišemo jo v radarskih ali zemljepisnih ali kakšnih drugih koordinatah. Za načrtovano primerjavo radarskih in talnih izmerkov je najbolj ugodno, če so radarski izmerki izraženi v zemljepisnih koordinatah, zato izpeljimo ustrezno transformacijo.

Radar naj bo nameščen na zemljepisni širini  $\theta_0$  in zemljepisni dolžini  $\phi_0$ . Padavine naj izmeri v točki, katere navpična talna projekcija je opisana v radarskih koordinatah z azimutom  $\alpha$  in s talno razdaljo  $s$  ter v geografskih koordinatah s  $\theta$  in  $\phi$ . Pri kratkih razdaljah  $s$  lahko računamo na tangentni ravnini radarja. Tedaj velja

$$\theta = \theta_0 + \frac{s \cos \alpha}{R}, \quad (13.2)$$

$$\phi = \phi_0 + \frac{s \sin \alpha}{R \cos \theta_0}. \quad (13.3)$$

Pri večjih razdaljah opustimo aproksimacijo s tangentno ravnino. Takrat radar, merilna točka in severni pol zemlje definirajo sferični trikotnik. Uporabimo kosinusni in sinusni izrek zanj ter dobimo

$$\sin \theta = \sin \theta_0 \cos \frac{s}{R} + \cos \theta_0 \sin \frac{s}{R} \cos \alpha, \quad (13.4)$$

$$\sin(\phi - \phi_0) = \frac{\sin \alpha}{\cos \theta} \sin \frac{s}{R}. \quad (13.5)$$



Za kratke razdalje se enačbi (13.4–5) poenostavita v enačbi (13.2–3). Pri merjenju padavin je pravzaprav vseeno, kateri par uporabimo. Pri razdalji 100 km sta namreč talni projekciji iste točke, izračunani na oba načina, med seboj oddaljeni okrog 1 km; približno tolikšna pa je pri takih razdaljah tudi horizontalna nenatančnost merjenja zaradi širine radarskega snopa.

## 14. Optimalni in neoptimalni pogoji merjenja

Osnovo za radarsko merjenje padavin predstavljata radarska enačba (9.5) in povezava med odbojnostjo ter jakostjo padavin (12.4). Kot rečeno, sta obe enačbi zgolj aproksimaciji in zato bolj ali manj natančni, odvisno od tega, kako dobro so izpolnjeni predpostavljene merilni pogoji. Povzemimo najvažnejše pogoje:

- radarski snop je tik nad tlemi,
- dušenje vzdolž snopa je zanemarljivo,
- radarska merilna prostornina je enakomerno zapolnjena s padavinskimi delci,
- delci so majhni v primerjavi z valovno dolžino in okrogli,
- vertikalna hitrost zraka je majhna v primerjavi s hitrostjo padanja delcev,
- hitrost padanja delcev je potenčna funkcija premera,
- velikostni spekter delcev je eksponenten in poznan.

Vsi pogoji razen zadnjega so dobro izpolnjeni, če se omejimo na meritve blizu radarja in pod pasom taljenja padavin. To so meritve v optimalnih razmerah. Napake pri tem izvirajo predvsem iz variabilnosti spektra padavin in dosegajo v povprečju faktor 2 [6]. Zmanjšamo jih, če uspemo natančneje določiti velikostni spekter padavinskih delcev. Obstaja več metod za to, na primer merjenje z dvema valovnima dolžinama ali merjenje z dvema polarizacijama [9]. V opise se ne bomo spuščali; poudarimo le to, da so vse metode uporabne samo v optimalnih razmerah.

Pri neoptimalnih pogojih merjenja potekajo radarske meritve s širokim snopom visoko nad zemeljsko površino. Napake zaradi variabilnosti spektra postanejo nepomembne v primerjavi z napakami, ki jih povzročita neenakomerna zapolnjenost merilnih prostornin in vertikalna nehomogenost padavin. Slepa uporaba osnovnih enačb merjenja v teh pogojih pripelje do napak, ki lahko presežejo faktor 10 [6]. Metode, ki temeljijo na določitvi velikostnega spektra padavin, nič ne pomagajo.

Če se odločimo za merjenje zgolj v optimalnih razmerah, močno omejimo doseg radarja kot merilnika padavin. Tipični radar s širino snopa  $1^\circ$  je tako uporaben približno do razdalje 60 km, kjer premer snopa doseže 1 km, pa še takrat le v primerih, ko pas taljenja ni prenizek. Drugače se lahko uporabni doseg radarja skrči celo na nič. Bilo bi torej zelo ugodno, če bi lahko radar uporabili za merjenje padavin tudi pri večjih razdaljah in/ali v neoptimalnih razmerah. Zato je razumljivo, da se s to problematiko danes ukvarjajo skoraj povsod, kjer so postavljeni vremenski radarji.

Teorijo radarskega merjenja padavin, prikazano v prejšnjih poglavjih, hočemo zdaj eksperimentalno preveriti. Za to je potrebna ustrezna oprema: radar, talna mreža ombrometrov okrog njega in radiosondna postaja v bližini. Uporabil sem opremo, ki jo vzdržuje in upravlja Eksperimentalni center za hidrologijo in meteorologijo (CSIM) v Teolu pri Padovi. Razdelki tega poglavja opisujejo uporabljeno opremo, merilni proces in osnovni nabor izmerkov. Podatki o opremi so povzeti iz lokalne dokumentacije CSIM.

### 15. Radiosondni sistem

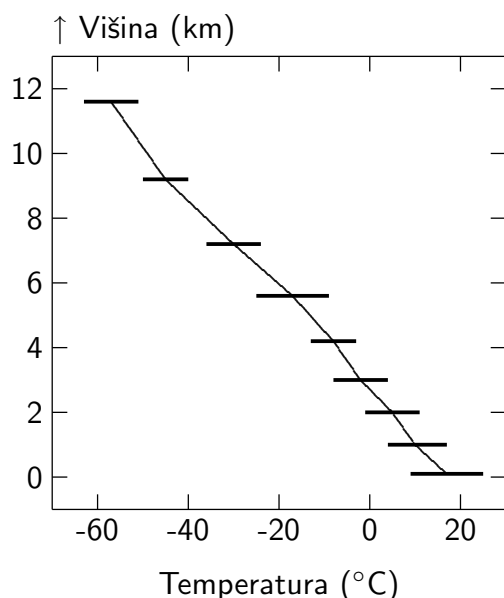
Najvažnejši dopolnilni podatek, ki ga potrebujemo pri radarskem merjenju padavin, je vertikalni profil temperature v atmosferi. Merimo ga z radiosondo. To je balon, napolnjen s helijem in opremljen s košaro, v kateri so merilniki za tlak, temperaturo in vlago. Ko ga spustimo s tal, se dviga skozi atmosfero in z drobnim radijskim oddajnikom sproti sporoča izmerke. Med dviganjem se balon razteza ter v spodnjih plasteh stratosfere počí; preostanki padejo na tla. Takšne balone rutinsko spuščajo s posebnih radiosondnih postaj, posejanih po vsej zemeljski površini, dvakrat na dan: opoldne in opolnoči po Greenwichkem času. Balon med svojim gibanjem sprejema kodirane radijske signale s posebnih talnih postaj in jih ponovno oddaja. Z medsebojnimi zakasnitvami teh signalov je lega balona popolnoma določena. Gibanje balona služi tudi za izračun vertikalnega profila horizontalnega vetra. Podatki se sproti pošiljajo meteorološki srenji. Za radar CSIM pridejo v poštev podatki z radiosondne postaje Udine, ki leži približno 150 km severovzhodno od Padove.

Radiosonda meri temperaturo, vlago in pritisk neposredno. Višine ne meri, pač pa jo računa iz enačbe hidrostatike, upoštevajoč neposredno izmerjene količine. Napake, ki se pri tem pojavijo, imajo v spodnjih plasteh troposfere velikostno stopnjo 10 m in tudi pri večjih višinah ponavadi ne presegajo 100 m. Zaradi zanašanja balona med dviganjem niso vertikalni profili izmerjeni točno nad postajo, pač pa nad območjem s horizontalno razsežnostjo kakšnih 100 km.

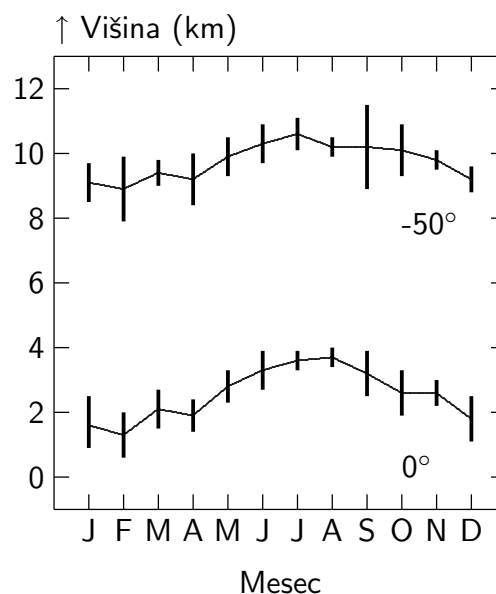
Za vsak radar je ugodno vedeti, v kakšni povprečni atmosferi deluje. Slika 15.1 kaže povprečni letni profil temperature v okolici radarja CSIM. Profil je izračunan iz vseh opoldanskih meritev na postaji Udine v letu 1994.

Temperaturni profil atmosfere posredno vpliva na uporabni doseg radarja. Njegov kvantitativni doseg za merjenje padavin je odvisen od višine izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ : čim višje je ta izoterma, tem daljša je razdalja od radarja do področja, ko radarski snop pri nizki elevaciji zadene pas taljenja in se pojavijo velike merske napake. Kvalitativni doseg radarja pa je odvisen od višine troposfere: čim višja je, tem višji konvektivni oblaki se v njej razvijajo in tem bolj so lahko oddaljeni, pa radarski

snop še vedno doseže njihove vrhove. Slika 15.2 kaže sezonska nihanja v višini izoterm  $0^{\circ}$  in  $-50^{\circ}\text{C}$ ; slednja približno označuje višino troposfere. Razpon višin za izotermo  $0^{\circ}\text{C}$  znaša od 0 do 4 km. Radar CSIM je smiselno preizkušati v takih dneh, ko leži pas taljenja padavin na različnih višinah tega intervala.



Slika 15.1. Povprečni letni profil temperature nad merilnim območjem. Dnevne radiosondne meritve ob 12 GMT v Udinah za leto 1994. Disperzije so označene s horizontalnimi črtami.



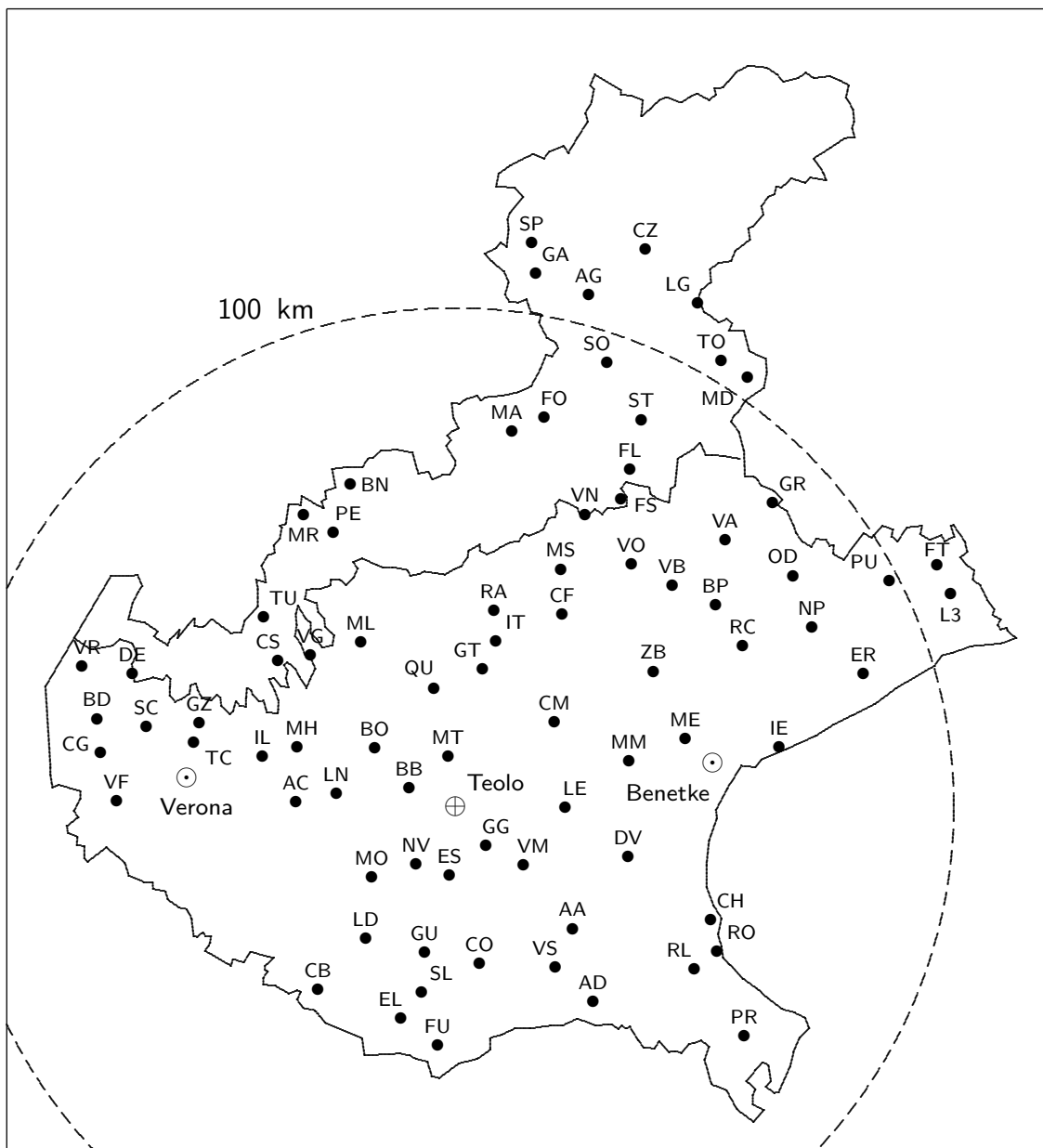
Slika 15.2. Mesečne spremembe v višini izoterm  $0^{\circ}$  in  $-50^{\circ}\text{C}$  nad merilnim območjem. Dnevne radiosondne meritve ob 12 GMT v Udinah za leto 1994. Disperzije so označene z vertikalnimi črtami.

Ker potekajo radiosondne meritve le dvakrat dnevno, se pojavi vprašanje, koliko so izmerki reprezentativni v vmesnem času. Zlasti je pomembno, koliko se spremeni višina izoterme  $0^{\circ}\text{C}$  v enem dnevu. Pregled podatkov za leto 1994 pokaže, da največje spremembe dosegajo 1–1.5 km, vendar so redke: pojavile so se le okrog desetkrat. Povprečna dnevna sprememba znaša 0.0 km, disperzija sprememb pa 0.4 km. Če smo torej zadovoljni z natančnostjo na nekaj sto metrov, so opoldanski radiosondni izmerki merodajni za ves dan.

## 16. Talna mreža ombrometrov

CSIM vzdržuje in uporablja gosto mrežo avtomatičnih vremenskih postaj, ki pokriva celotno pokrajino Veneto. Postaje so opremljene s senzorji za merjenje temperature, vlage, vetra in padavin. Vseh postaj je preko 200, a uporabil sem jih le 80. Prizadeval sem si, da bi kolikor toliko enakomerno pokrile območje z radijem 100 km okrog radarja. Izbrane postaje so prikazane na sliki 16.1. Ležijo na dveh različnih geografskih območjih. Južni del merilnega območja je raven, severni pa gorat. Prehod med obema je oster in na sliki prikazan z izohipso 500 m. Tipične

nadmorske višine v ravnini znašajo 100 m, v gorah pa preko 1000 m. Podrobni geografski podatki za vsako postajo so navedeni v dodatku B.



Slika 16.1. Mreža ombrometrskih postaj. Polna črta prikazuje pokrajino Veneto z radarjem CSIM v Teolu. Sever je gorat, jug ravninski; meja med obema je podana z izohipso 500 m. Prekinjena črta označuje radarski doseg 100 km.

Postaje CSIM merijo padavine večinoma z ombrometri na prekucno tehtnico. Tak merilnik je sestavljen iz lijaka, ki prestreza padavine, in iz vzvodne tehtnice pod njim. Voda se iz lijaka zliva v drobno posodo na tehtnici; ko se posoda napolni, se tehtnica prevesi in pri tem sklene električni tokokrog ter tako generira električni

signal. Postopek se ponavlja in signali se štejejo. Če pada sneg, ga v lijaku stali električni grelec. Izmerjeni podatki iz vseh postaj CSIM se vsakih 15 minut avtomatično stekajo v operativni center v Teolu pri Padovi, kjer se arhivirajo na magnetne trakove.

Ombrometrške meritve seveda niso brez napak [40]. Najbolj moti turbulentno gibanje zraka okrog merilnika. Če je vertikalna hitrost zraka ob njem nasprotno enaka hitrosti padanja padavinskih delcev, merilnik ne izmeri ničesar, čeprav padavine vseeno padejo na tla malo proč. Kljub temu bomo v nadaljevanju privzeli, da so ombrometrski izmerki popolnoma natančni in bomo vse morebitne razlike med njimi in radarskimi izmerki proglasili za radarske napake.

## 17. Radarski sistem

Radar CSIM je nameščen na vrhu hriba Monte Grande, 20 km jugozahodno od Padove in na nadmorski višini približno 500 m. Je sodoben izdelek švedske firme Ericsson. Seva linearno polarizirano valovanje (v horizontalni ali vertikalni ravnini) ter meri jakost odmevov in njihove fazne zakasnitve. Z radarjem upravlja računalnik VAX 8200, v katerem je nameščena programska oprema EWIS. Tudi ta oprema je Ericssonov izdelek. Prikaz in analizo izmerkov opravljajo delovne postaje VAX-station 3100.

Merjenje atmosfere poteka neprekinjeno. Posamezne meritve se začnejo vsakih 15 minut z vrtenjem antene okrog navpične osi pri naraščajočih elevacijskih kotih. Vsako merjenje je razdeljeno na tri zaporedna delna merjenja: konvencionalno, koherentno in polarizacijsko. Pri konvencionalnem načinu merjenja se merijo le jakosti odmevov, pri koherentnem jakosti odmevov in njihove fazne zakasnitve, pri polarizacijskem pa jakosti odmevov pri dveh med seboj pravokotnih polarizacijah, horizontalni in vertikalni. Izmerki se digitalizirajo in uvrščajo v polarno mrežo radarskih merilnih prostornin. Nato se arhivirajo na magnetne trakove za kasnejšo uporabo kot tridimenzionalna polja odbojnosti, radialne hitrosti in diferencialne odbojnosti v atmosferi. Za izračun odbojnosti iz moči odmevov služi radarska enačba (9.5). Tabela 17.1 podaja tehnične značilnosti radarja v konvencionalnem načinu merjenja.

Ni podatkov brez napak in tudi radarski izmerki so obremenjeni z njimi. Pri radarju CSIM prevladujeta zlasti dve vrsti motenj: talni odmevi in zakasneni odmevi. Napake se pojavljajo v poljih odbojnosti, izmerjenih v kateremkoli od treh načinov delovanja.

Talni odmevi so – kot pove ime – odmevi od tal. Ker je radar nameščen na hribu sredi ravnine, je onesnaženje skozi stranske sevalne maksimume posebno močno. Radar namreč obravnava vse odmeve, kot da so prišli iz smeri glavnega maksimuma v smernem diagramu antene, in stranski odmevi od tal se kažejo kot odmevi na višinah. Tako se odmevi z odbojnostmi nad 12 dBZ pojavljajo celo do višine 4 km nad tlemi. Pri elevaciji  $0.5^\circ$  je do razdalje 120 km onesnaženih kar 40% merilnih prostornin. Pri elevaciji  $1.5^\circ$  se delež zmanjša na znosnih 5%.

Talne odmeve povzročajo večinoma mirujoče ovire. V koherentnem načinu

dela jih radar CSIM zato izloča z nizkofrekvenčnim filtriranjem prejetega spektra moči. Tehnika je precej učinkovita, vendar ne popolna, saj ne izloča odmevov od gibajočih se talnih ovir, hkrati pa izloča odmeve od padavinskih delcev z majhno radialno hitrostjo. V konvencionalnem in polarizacijskem načinu dela takšno frekvenčno filtriranje odmevov ni možno. V obeh primerih se zato uporabljajo pri radarju CSIM le izmerki iz tistih delov atmosfere, ki ob lepem vremenu niso prekomerno onesnaženi s talnimi odmevi. Vsakokratni radarski posnetek atmosfere se primerja z referentnim posnetkom, narejenem ob lepem vremenu v brezoblačni atmosferi, in onesnažena mesta se posebej označijo. Metoda je slabša od koherentne, saj ne omogoča merjenj tako blizu tal kot slednja. Hkrati temelji na predpostavki, da sta poti radarskih impulzov skozi atmosfero pri trenutni in referentni meritvi enaki, kar dostikrat ni res. Vertikalna profila temperature in vodne pare v atmosferi se namreč spreminjata, s tem pa variira tudi njen lomni kvocient.

Tabela 17.1. Tehnične značilnosti merilnega radarja. Podatki se nanašajo na konvencionalni način dela.

Parameter	Vrednost
Lega	45° 21' 46'' N, 11° 40' 25'' E, 0.47 km n.m.
Valovna dolžina	5.5 cm
Polarizacija	linearna horizontalna
Širina snopa	1.0°
Osno ojačenje antene	43 dB
Vršna moč impulza	250 kW
Dolžina impulza	2.0 $\mu$ sec
Frekvenca impulzov	250 s <sup>-1</sup>
Hitrost vrtenja antene	6 min <sup>-1</sup>
Digitalizacija izmerkov	256 nivojev
Merilne prostornine	2 km $\times$ 0.85°
Elevacijski koti	0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 6.0, 7.5, 10.0, 15.0°
Doseg	240 km
Pogostost meritev	15 min

Zakasneni odmevi so odmevi od predhodno izsevanih impulzov. V konvencionalnem načinu dela radarja CSIM je razmik med zaporednimi impulzi dovolj velik, da je moč zakasnenih odmevov zanemarljiva. V drugih dveh načinih merjenja je drugače, saj obakrat deluje radar z visokima frekvencama impulzov. V koherentnem načinu merjenja je to potrebno za natančno merjenje hitrosti, v polarizacijskem pa za natančno merjenje diferencialne odbojnosti [9]. Obstaja več metod za izločanje zakasnenih odmevov, vendar na radarju CSIM žal ni implementirane nobene. Tako obravnava radar odmev z razdalje  $cT/2 + r$  kot odmev z razdalje  $r$ ; oddaljeni odmevi se prikazujejo kot bližnji.

Za natančno merjenje atmosfere je potrebno radar kalibrirati. Ker je sistem CSIM zelo stabilen, potekajo kalibracije le nekajkrat na leto. Vzdrževalno osebje preverja usmerjenost antene ter oddajni in sprejemni del radarskega sistema. Anteno kalibrirajo z radarskim opazovanjem markantnih talnih ovir, pred-

vsem osamljenih visokih stolpov. Včasih v ta namen uporabijo tudi točkasti izvor mikrovalovnega sevanja, ki ga namestijo na primerno lokacijo. Od oddajnih karakteristik radarja merijo le tiste, ki se lahko znatno spremenijo: frekvenco valovanja, frekvenco impulzov in povprečno moč sevanja. Smerno ojačenje antene in širino radarskega snopa obravnavajo kot nespremenljiva. Naštete količine enolično določajo vrednost radarske konstante. Sprejemni del radarskega sistema kalibrira osebe tako, da injicira mikrovalove znane moči v antenski valovod in beleži izhod digitalizatorja.

## 18. Osnovni nabor podatkov

Na CSIM potekajo radarske in ombrometrške meritve neprekinjeno. Vsi izmerki se shranjujejo na magnetne trakove in so dostopni za naknadno obdelavo.

Za primerjavo radarskih in talnih izmerkov padavin sem uporabil arhivirane podatke iz leta 1992. Po pregledu arhiva sem izbral 16 dni z zabeleženimi padavinami. Izbor je vključeval vse osnovne tipe padavinskih polj – stratiformne (8), konvektivne (4) in mešane (4) – v vseh letnih časih razen zime in pri različnih višinah izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ , radiosondno izmerjene v Udinah. Tip padavin sem ocenjeval subjektivno iz horizontalnih presekov v poljih odbojnosti. Tabela 18.1 prikazuje izbrane dneve.

Tabela 18.1. Vzorec dni s padavinami. Višina izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ , izmerjena z radiosondo ob 12 GMT, je označena s  $h_0$ . Padavine so karakterizirane kot stratiformne (S), konvektivne (C) ali mešane (S/C).

N	Datum	$h_0$ (km)	Tip
1	24. mar. 1992	1.6	S
2	31. mar.	1.6	S
3	16. apr.	1.6	S/C
4	30. apr.	2.3	S
5	28. maj	2.9	C
6	10. jun.	2.8	C
7	22. jun.	3.6	S/C
8	10. avg.	3.8	C
9	30. avg.	4.0	S
10	4. sep.	3.1	C
11	23. sep.	3.2	S/C
12	29. sep.	2.9	S/C
13	3. okt.	2.6	S
14	10. okt.	3.0	S
15	30. okt.	2.7	S
16	16. nov.	2.3	S

Celotni nabor podatkov za vsakega izmed izbranih dni je vseboval tri dele:

- radiosondno izmerjene vertikalne profile temperature, vlage in horizontalnega vetra ob  $12^{\text{h}}$  po Greenwichkem času,

- urne količine padavin na 80 talnih lokacijah in
- tridimenzionalna polja odbojnosti atmosfere, posneta vsakih 15 minut v konvencionalnem načinu merjenja.

Umestni sta naslednji dve vprašanji: ali je izbrani vzorec dni dovolj velik in ali je reprezentativen?

Glede velikosti vzorca se bo v nadaljevanju pokazalo, da vključuje po več kot 50 ur radarskih izmerkov nad posamezno talno postajo in preko 6000 ur nad vsemi postajami skupaj. To je dovolj, da so disperzije posameznih urnih izmerkov okrog njihovih povprečij določene z natančnostjo 10 odstotkov za eno postajo in z natančnostjo 1 odstotek za vse postaje skupaj. Za potrebe raziskave ni potrebna večja natančnost.

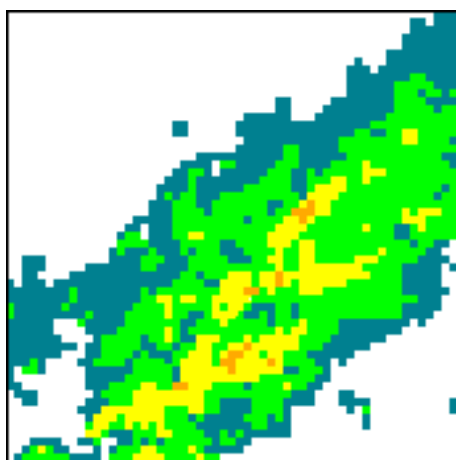
Reprezentativnost vzorca ni strogo zagotovljena, saj izbira dni ni bila slučajna. Prizadeval pa sem si, da bi vzorec vseboval stratiformne, mešane in konvektivne padavine približno v takem razmerju, kakršno velja za dolgoletne nize opazovanj (brez zimskih dni). Zato lahko vzorec označimo kot približno reprezentativen. Verjetno pa so privilegirani močnejši padavinski procesi.



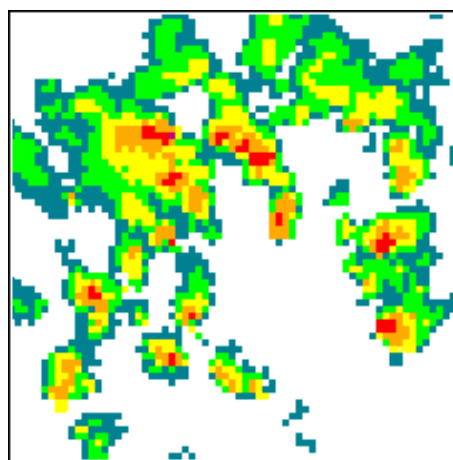
Lokalne značilnosti padavinskih delcev – agregatno stanje, spekter velikosti in hitrosti padanja – so povezane z značilnostmi padavinskega polja v okolici. Razdelki v tem poglavju najprej analizirajo strukturo izmerjenih polj in njen vpliv na lokalne radarske izmerke, nato pa primerjajo radarske izmerke padavin z ombrometrskimi.

## 19. Horizontalna struktura odbojnosti

Padavinska polja so tridimenzionalna, vendar je njihovo strukturo smiselno obravnavati ločeno v horizontalni in vertikalni smeri. Horizontalno strukturo prikažemo s horizontalnimi preseki. Pri tem se je včasih težko odločiti, na kateri višini je presek najbolj primeren. Težavo obidem, če študiramo talne projekcije maksimalnih odbojnosti: nad vsako talno točko pregledamo vse izmerjene odbojnosti in izberemo največjo. Tudi tak presek lahko prištevamo med horizontalne.



Slika 19.1. Horizontalna struktura stratiformnih padavin. Talna projekcija maksimalnih odbojnosti. Odbojnosti 16–40 dBZ s koraki po 8 dBZ. Ločljivost 2 km.



Slika 19.2. Horizontalna struktura konvektivnih padavin. Talna projekcija maksimalnih odbojnosti. Odbojnosti 16–48 dBZ s koraki po 8 dBZ. Ločljivost 2 km.

Tipična horizontalna preseka v stratiformnih in konvektivnih padavinah sta prikazana na slikah 19.1 in 19.2. Oba preseka sta talni projekciji maksimalnih odbojnosti. Zaradi težav s programsko opremo nista bila izračunana iz podatkov CSIM, pač pa iz podatkov vremenskega radarja, nameščenega na Lisci pri Sevnici. To za ilustracijo tipičnih primerov zadošča, saj imata oba radarja skoraj enake karakteristike v konvencionalnem načinu dela in sta med seboj oddaljena manj

kot 300 km. Oba sta tudi na južni strani Alp in merita v podobnih pogojih. Iz radarskega arhiva na Hidrometeorološkem zavodu Slovenije (HMZ) sem izbral podobna primera, kot jih je mogoče najti tudi v vzorcu CSIM. Padavinski polji sta prikazani v ločljivosti  $2 \times 2$  km in s petimi razredi odbojnosti v dBZ: 16–24 (zeleno), 24–32, 32–40, 40–48 in nad 48 (rdeče). Lepo so vidne razlike v horizontalnih razsežnostih, obliki in intenzivnosti odbojev, ki karakterizirajo oba mejna tipa padavin. Horizontalni gradient odbojnosti ima v stratiformnih padavinah stopnjo velikosti 10 dBZ/100 km in v konvektivnih 10 dBZ/10 km. Če se polja translatorsno premikajo in nič ne spreminjajo, so padavine v izbrani talni točki – odvisno od horizontalnih gradientov – šibke, enakomerne in dolgotrajne ali močne, neenakomerne in kratkotrajne. V stratiformnih padavinah smemo zato z radarjem meriti bolj poredko kot v konvektivnih padavinah.

Opazene razlike v strukturi polj lahko kvantificiramo preko frekvenčne porazdelitve odbojnosti, avtokorelacije ali spektralne dekompozicije, ter jih uporabimo za objektivno klasifikacijo padavinskih tipov. Seveda velja takšna klasifikacija za padavinsko polje kot celoto. Brez računanja lahko kar na oko ocenimo, da znaša dekorelacijska razdalja v prikazanih stratiformnih padavinah 100 km in v konvektivnih 10 km. Bolj temeljita obravnava pa za nadaljevanje raziskave ni potrebna.

## 20. Vertikalni profili odbojnosti

Vertikalne nehomogenosti v padavinskih poljih lahko opišemo z vertikalnimi profili odbojnosti. Nad vsako točko zemeljske površine obstaja lokalni profil, ki se s časom spreminja. S primernim horizontalnim in časovnim povprečenjem dobimo profile, reprezentativne za prostorsko-časovno skalo pojavov, ki nas zanimajo. Zastavljena raziskava se osredotoča na dnevne profile z vertikalno ločljivostjo 0.5 km, povprečene na območju z radijem 60 km okrog radarja. Razlogi so naslednji.

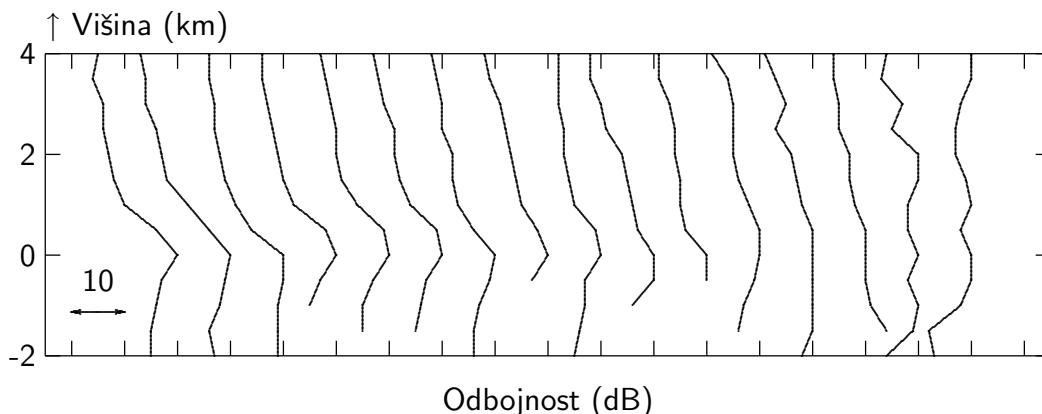
Največje nehomogenosti v padavinskih poljih nastajajo v horizontalni plasti, kjer se padajoči ledeni delci talijo. Višina pasu taljenja je odvisna od višine izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ , njegova debelina in nehomogenost pa, med drugim, od vertikalnih hitrosti zraka. V stratiformnih padavinah znaša debelina pasu ponavadi nekaj sto metrov [43], v konvektivnih pa lahko tudi več. Za detekcijo pasu taljenja je torej potrebna vsaj vertikalna ločljivost 0.5 km. Takšno ločljivost omogoča radarski snop s premerom 1 km ali manj, oziroma snop širine  $1^{\circ}$  pri razdaljah do 60 km. Nadalje je smiselna integracija po taki horizontalni razsežnosti in po takem časovnem intervalu, da so karakteristike pasu pri željeni ločljivosti približno konstantne. Tip padavinskih polj (stratiformni ali konvektivni) se spremeni na razdaljah, ki so ponavadi precej večje od 60 km. Horizontalna integracija v območju z radijem 60 km okrog radarja je torej smiselna. Še boljše bi bilo seveda integrirati po širšem območju, vendar bi za to potrebovali ožji radarski snop, če bi hoteli ohraniti izbrano vertikalno ločljivost.

Padavinski sistemi se gibljejo s horizontalno hitrostjo okrog 30 km/h. Tip padavinskega polja v okolici izbrane talne lokacije se torej ne spremeni prej kot v

nekaj urah. Velikokrat pa se tip polj spremeni šele v enem dnevu, kar je ponavadi tudi tipični čas, v katerem se lahko višina izoterme  $0^{\circ}\text{C}$  spremeni za okrog 0.5 km. Smiselna je torej časovna integracija na intervalih od nekaj ur do enega dne. Pri slednjem času dostikrat že tvegamo, da povprečujemo preko različnih tipov polj.

Za izračun povprečnih vertikalnih profilov odbojnosti sem uporabil vse radarske posnetke iz izbranega vzorca CSIM. Povprečno odbojnost na dani višini sem določal le iz tistih izmerkov, ki niso bili onesnaženi s talnimi odmevi. Pri tem sem kot onesnažena obravnaval vsa območja atmosfere, kjer je katerikoli od treh referentnih posnetkov brezoblačne atmosfere vseboval odbojnosti nad 12 dBZ. Uporabljena meja je kompromis med dvema nasprotujočima si željama po veliki uporabni prostornini in po nizkem zaznavnem pragu padavin. Izmed neonesnaženih izmerkov sem nadalje uporabil le tiste, katerih odbojnost je presegala mejo 15 dBZ. Varnostni razmik 3 dBZ med obema mejama naj bi dovoljeval manjše fluktuacije v jakostih talnih odmevov. Če je bilo na dani višini manj kot 25 veljavnih izmerkov, sem njihovo povprečje izločil iz nadaljnje obdelave kot nereprezentativno. Nazadnje sem trenutne horizontalno integrirane profile povprečil najprej v urne, nato pa v dnevne profile.

Povprečni dnevni profili odbojnosti so prikazani na sliki 20.1. Vsi kažejo bolj ali manj izrazite maksimume, ki približno sovpadajo z višino izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ , in so torej povezani s pasom taljenja ledenih padavinskih delcev. Zaradi boljšega pregleda so profili normirani glede na višino in intenzivnost pasu taljenja ter urejeni po velikosti gradienta nad pasom. Višina pasu taljenja je določena z lokacijo maksimuma odbojnosti v plasti debeline 2 km okrog izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ ; če maksimuma ni, je privzeta kar višina izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ , znižana za 0.3 km [43]. Povprečni gradient nad pasom taljenja je definiran z razliko maksimalne odbojnosti v pasu in povprečne odbojnosti 2 km nad pasom.



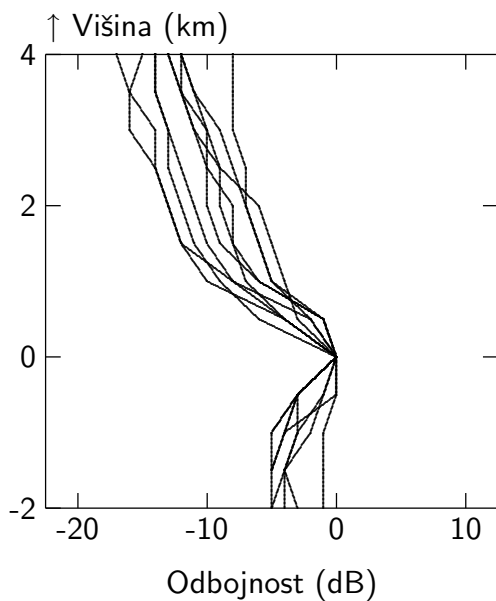
Slika 20.1. Dnevni profili odbojnosti. Profili so normirani na višino in odbojnost pasu taljenja ter razvrščeni po velikosti gradienta nad njim.

Pojemanje odbojnosti z višino nad pasom taljenja kaže na spremembo dimenzij in/ali številske gostote padavinskih delcev. Bolj vplivna je sprememba dimenzij,

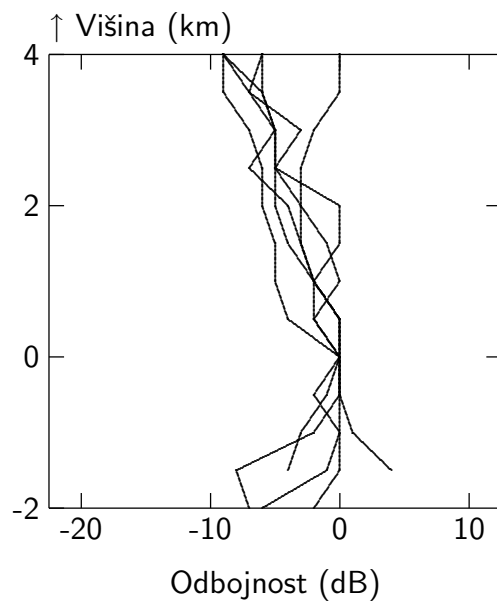
saj je odbojnost sorazmerna s šesto potenco premerov delcev. Razlog za spremembo dimenzij delca je seveda njegova rast med padanjem [33].

Dnevne profile odbojnosti lahko uporabimo za definicijo povprečnega dnevnega tipa padavin. Najpreprostejši parameter je kar gradient odbojnosti nad pasom taljenja. Stratiformni sistemi imajo bolj negativne gradiente kot konvektivni sistemi. Profile lahko razdelimo v dva razreda na podlagi izbrane razmejitvene vrednosti gradienta. Takšna objektivna klasifikacija z mejo  $-3$  dBZ/km dobro sovpa da s prvotno subjektivno oceno: vsi vnaprej subjektivno opredeljeni stratiformni dnevi so prepoznani kot stratiformni, vsi konvektivni kot konvektivni, mešani pa so porazdeljeni med oba razreda.

Slika 20.2 kaže dnevne stratiformne profile. Vsi imajo dobro izražene maksimume v pasu taljenja, približno konstantne vrednosti pod maksimumom in negativne gradiente nad njim. Zaradi precejšnjega premera radarskega snopa pa so profili dokaj zglajeni. Maksimumi so otopeli, vertikalni gradienti nad njimi pa manjši kot v resnici [21]. Na sliki 20.3 so prikazani dnevni konvektivni profili. Za razliko od stratiformnih so precej manj odvisni od višine.



Slika 20.2. Dnevni stratiformni profili, normirani na višino in odbojnost pasu taljenja.



Slika 20.3. Dnevni konvektivni profili, normirani na višino in odbojnost pasu taljenja.

Vpliv profilov na natančnost radarskih meritev je očiten. Meritve z radarskim snopom pod pasom taljenja bi se morale dobro ujemati s talnimi meritvami. V področjih, kjer snop seka pas taljenja, pričakujemo precenitve. Podcenitve pa naj bi nastopile tam, kjer radarski snop tipa nad pasom taljenja. Ponavadi potekajo radarske meritve s poševno navzgor usmerjenim radarskim snopom, višina izoterme  $0^{\circ}\text{C}$  pa je približno konstantna nad celotnim opazovanim območjem. Tako pričakujemo naslednjo sistematično razliko med radarskimi in talnimi meritvami: dobro ujemanje v bližini radarja, precenitve padavin na srednjih oddaljenostih in

podcenitve pri velikih razdaljah. Odvisnost od razdalje naj bi bila bolj izražena v stratiformnih kot v konvektivnih padavinah.

## 21. Radarske ocene talnih padavin

Količino padavin lahko določamo nad različno velikimi območji in v različno dolgih časovnih intervalih. Zastavljena raziskava se omejuje na uporabnost radarja kot lokalnega merilnika padavin v realnem času. Kakšen časovni zamik med meritvijo in njeno uporabo je še sprejemljiv, je seveda odvisno od vrste uporabe. Za večino hidroloških potreb je urni interval dovolj kratek [6], zato bomo študirali točkovne urne akumulacije.

Če želimo primerjati talne izmerke padavin z radarskimi, moramo nad vsako talno postajo izbrati tako območje v atmosferi, v katerem so radarske meritve lokalno reprezentativne. Najbolje je, da je izbrano območje čim bližje tlom. V ta namen sem iz radarskih meritev pri elevaciji  $1.5^\circ$  nad vsako postajo izbral območje s horizontalno razsežnostjo  $2 \times 2$  km. Za transformacijo med radarskimi in geografskimi koordinatami so služile enačbe (7.1), (7.2) in (13.4–5). Tako definirana območja vsebujejo – odvisno od razdalje – od 1 do 10 radarskih merilnih prostornin z razsežnostmi  $0.85^\circ \times 2$  km. Postavil sem še dodatni pogoj, da nobena izmed izbranih prostornin ne sme biti blokirana s hribi ali onesnažena s talnimi odmevi. Blokiranje sem raziskal z računalniško simulacijo radarskega sevanja v standardni atmosferi nad digitaliziranim reliefom, pri čemer sem uporabil programsko opremo CSIM, kontaminacijo pa s preiskavo treh referentnih radarskih izmerkov brezoblačne atmosfere. Da je atmosfera res brez oblakov, so povedali vidni posnetki z geostacionarnega satelita Meteosat.

Lega izbranih merilnih območij ni optimalna za vse uporabljene postaje. Nad kakšno postajo bi se dalo najti ustrezajoče radarske meritve tudi pri nižji elevaciji, to je bližje zemeljski površini. Vendar pa je takšnih postaj malo (manj kot 10%) in za potrebe raziskave je izbrani pristop celo primernejši. Ne iščemo namreč rezultatov, ki bi bili optimizirani za konkretno ozemlje, pač pa take, ki bi bili reprezentativni za tipično radarsko merjenje pri konstantni elevaciji.

Utemeljiti je potrebno še izbiro velikosti za merilna območja. Pri radarskih meritvah, ki potekajo v presledkih, bi bilo ugodno uporabljati neke vrste časovno povprečje jakosti padavin med dvema zaporednima meritvama in ne zgolj njuni trenutni vrednosti. Takšno povprečje, ki ga ne poznamo, lahko približno nadomestimo z ustreznim prostorskim povprečjem. Padavinska polja se v 15 minutah premaknejo horizontalno za 5–10 km, zato bi bilo najbrž smiselno uporabiti tudi merilna območja podobnih razsežnosti. Kljub temu sem izbral manjša območja, deloma zaradi dovolj velikih horizontalnih dekorelacijskih razdalj v padavinskih poljih, ki se zmanjšajo pod 5 km le v primerih šibke konvekcije. Podobno razmišljanje velja za vertikalno razsežnost merilnih območij.

Talne padavine na vsaki postaji sem ocenil iz radarskih izmerkov takole. Iz povprečne odbojnosti v merilnem območju nad postajo sem z enačbo (12.4) najprej izračunal 15-minutne povprečne jakosti padavin. Pri tem sem uporabil parame-

tra  $B = 1.5$  in  $A = 300 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3} / (\text{mm h}^{-1})^B$ , ki najbolje opisujeta povprečne padavine v Švici [27]. Nato sem predpostavil vertikalno homogenost padavin do tal in s tem določil tudi talne jakosti. Nazadnje sem izračunal talne urne akumulacije ob privzetku, da se jakost padavin spreminja linearno v vsakem 15-minutnem intervalu. Pri izračunu urnih akumulacij sem izločil vse ure s pomanjkljivimi meritvami. Vrednosti nad in pod mejama 100 mm in 0.3 mm sem postavil na obe meji. Spodnja meja ustreza pragu odbojnosti 15 dBZ, zgornja pa izloča močne odmeve na velikih zrnih toče. Po primerjavi med sočasnimi radarskimi  $Q_R$  in talnimi  $Q_G$  izmerki akumulacij sem iz nadaljnje analize izločil vse pare, pri katerih sta bili obe meritvi manjši ali enaki mejni vrednosti 0.3 mm. Celotni nabor podatkov se je tako skrčil na 6454 parov.

Razlikovanje med radarskim in talnim izmerkom opišemo z njunim razmerjem  $Q_R/Q_G$ . Da ohranimo simetrijo med izmerki v razmerjih, je smiselno vpeljati logaritme takih razmerij [31]. Zato definiramo logaritemsko radarsko napako  $A$  kot

$$A = 10 \log \frac{Q_R}{Q_G} = 10 \log \frac{Q_R}{Q_0} - 10 \log \frac{Q_G}{Q_0}. \quad (21.1)$$

Logaritemska napaka je brezdimenzijska količina z enoto 1. Poimenujemo jo s posebnim imenom:  $1 \equiv \text{dB}^1$ . Njene vrednosti 0, 3 in 5 dB, na primer, pomenijo, da se radarske in talne akumulacije razlikujejo med seboj za faktorje 1, 2 in 3. Pridevnik logaritemski bomo v nadaljevanju večinoma izpuščali; nanj bo opozarjala enota dB. Povsod v raziskavi bo napaka  $A$  opisovala razlikovanje med točkovnima urnima akumulacijama padavin, izmerjenima z radarjem in talnim ombrometrom.

Z zapisano enačbo je vpeljana tudi logaritemska akumulacija padavin, normirana na vrednost  $Q_0 = 1 \text{ mm}$ . Je brezdimenzijska količina z enoto 1, ki pa jo bomo poimenovali  $\text{dBR}^1$  [25]. Akumulacijam 1, 10 in 100 mm torej ustrezajo logaritemske akumulacije 0, 10 in 20  $\text{dBR}$ .

## 22. Optimalni merilni pogoji

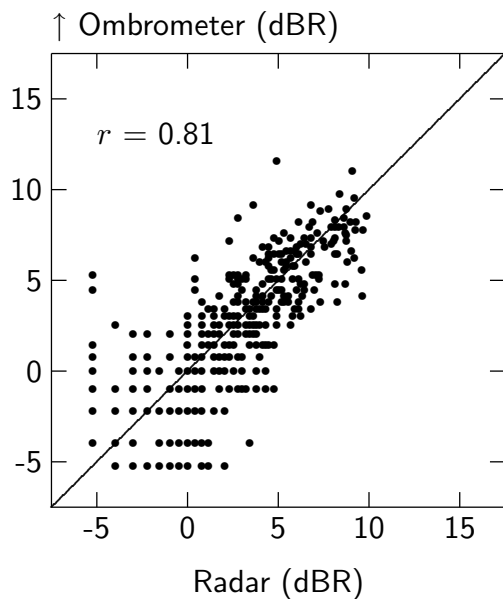
Največjo natančnost radarskih meritev pričakujemo pri optimalnih merilnih pogojih, to je v bližini radarja in pod pasom taljenja. Za določitev te natančnosti sem iz osnovnega nabora meritev izbral le tiste pare, ki ustrezajo naslednjim kriterijem:

- padavine so klasificirane kot stratiformne,
- meritev je bližje kot 30 km od radarja,
- višina izoterme  $0^\circ\text{C}$  presega 2.5 km,
- os radarskega snopa je vsaj za en premer snopa pod višino izoterme  $0^\circ\text{C}$ , znižano za 1 km.

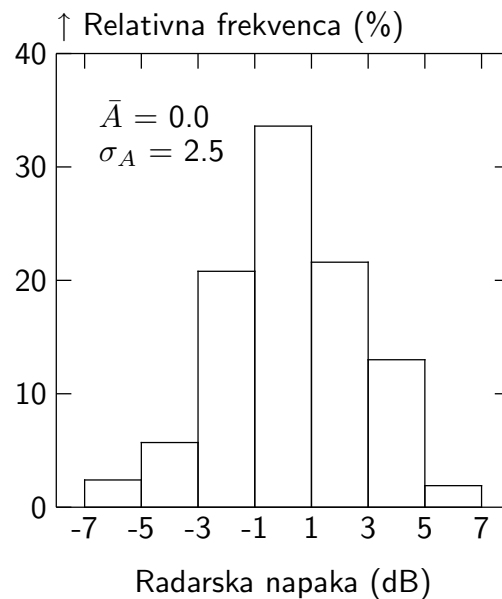
Kriterijem je zadostilo 453 parov podatkov na 15 postajah. Razsipni diagram teh optimalnih parov je prikazan na sliki 22.1.

---

<sup>1</sup> Logaritemska razmerja količin so opisana v dodatku A.



Slika 22.1. Razsipni diagram talnih in radarskih izmerkov. Urne točkovne akumulacije, referentna akumulacija 1 mm. Optimalni pogoji merjenja.



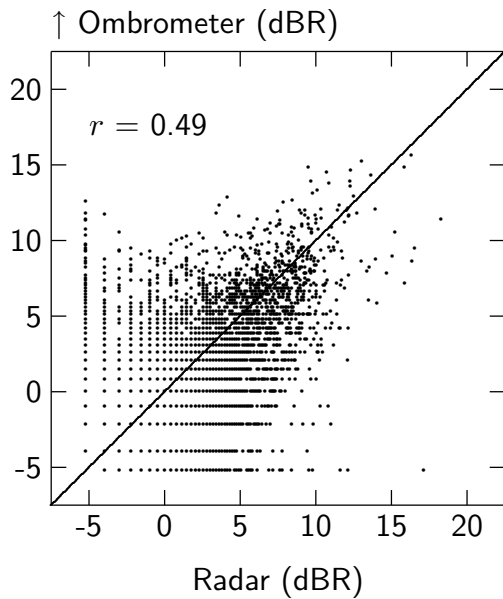
Slika 22.2. Frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Urne točkovne akumulacije. Optimalni pogoji merjenja.

Korelacija parov je velika, saj znaša korelacijski koeficient 0.81. Na sliki 22.2 je prikazana frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Porazdelitev je približno normalna. Radarske in talne meritve se dobro ujemajo. Povprečno razmerje med obojimi znaša 1.0 (0.0 dB), disperzija razmerij pa dosega faktor 1.8 (2.5 dB). To pomeni, da leži radarski izmerki na intervalu med 1.8 in 1/1.8 ombrometerskega izmerka v približno 2/3 primerov. Pod optimalnimi pogoji merjenja torej radarski izmerki niso obremenjeni s sistematičnimi napakami, pač pa kažejo kar precejšnje slučajne napake.

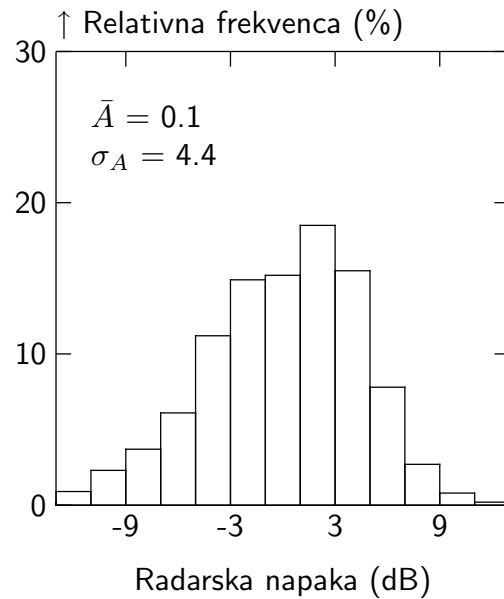
### 23. Neoptimalni merilni pogoji

Pravilnejšo predstavo o radarju kot merilniku padavin dobimo, ko analiziramo celotni nabor podatkov, to je vse izmerke nad vsemi talnimi postajami v ravnini in v gorah.

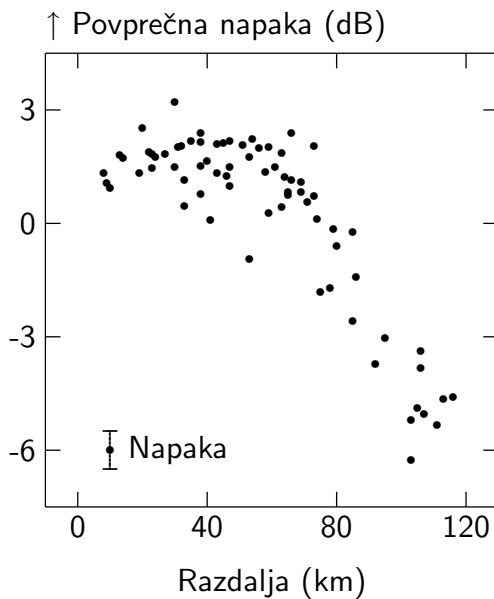
Razsipni diagram talnih in radarskih izmerkov na sliki 23.1 prikazuje slabo ujemanje med obojimi; korelacijski koeficient znaša zgolj 0.49. Razsip je najmočnejši pri šibkih padavinah. Primeri z ničelnimi talnimi izmerki in pozitivnimi radarskimi izmerki padavin opozarjajo na probleme s talnimi odmevi, občasno pa tudi na izhlapevanje padavin med padanjem in na lebdenje padavin v vzgornikih. Obratni primeri z ničelnimi radarskimi in pozitivnimi talnimi izmerki pa so najverjetneje posledica ostrih horizontalnih gradientov v konvektivnih padavinah, majhnih območij merjenja okrog postaj in dolgih časovnih presledkov med zaporednimi meritvami.



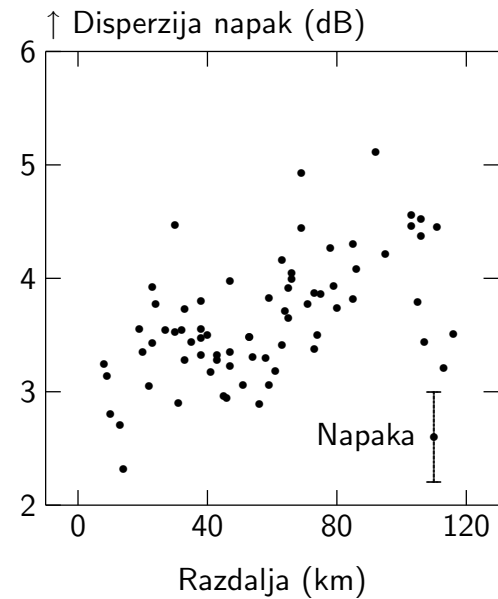
Slika 23.1. Razsipni diagram talnih in radarskih izmerkov. Urne točkovne akumulacije, referentna akumulacija 1 mm. Neoptimalni pogoji merjenja.



Slika 23.2. Frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Urne točkovne akumulacije. Neoptimalni pogoji merjenja.



Slika 23.3 Povprečna radarska napaka v odvisnosti od razdalje. Točkovne urne akumulacije. Neoptimalni pogoji merjenja.



Slika 23.4. Disperzija radarskih napak okrog lokalnega povprečja v odvisnosti od razdalje. Točkovne urne akumulacije. Neoptimalni pogoji merjenja.

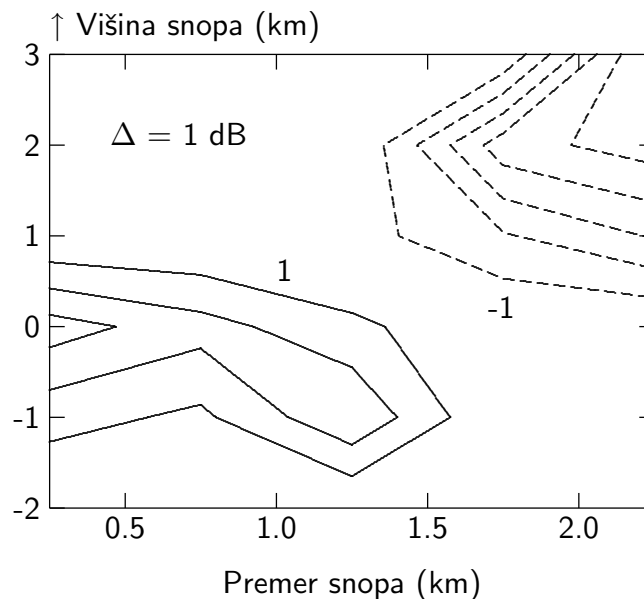
Slika 23.2 kaže frekvenčno porazdelitev vseh radarskih napak; povprečno razmerje med radarskim in talnim izmerkom znaša 1.0 (0.1 dB), disperzija razmerij pa dosega faktor 2.8 (4.4 dB). Podaljšani levi rep porazdelitve je posledica meritev pri velikih razdaljah, kjer radarski snop tiplje nad pasom taljenja. Desni rep



in v desno premaknjeni vrh porazdelitve pa kažeta na meritve v pasu taljenja pri kratkih in srednjih oddaljenostih. Obe vrsti meritev povečujeta širino verjetnostne porazdelitve. Povprečna napaka je rezultat medsebojnega izničevanja med podcenitvami in precenitvami. Ker je v uporabljeni mreži precej manj talnih postaj pri velikih razdaljah kot pri srednjih in kratkih, prevladajo precenitve.

Da bi raziskali prostorsko odvisnost radarskih meritev, je potrebno analizirati izmerke za vsako talno merilno postajo posebej. Pri tem izločimo vse postaje z manj kot 50 izmerki. Slika 23.3 kaže povprečne radarske napake na posameznih postajah v odvisnosti od razdalje med postajo in radarjem. Dodana je tipična disperzija posameznega povprečja. Tekoče povprečje preko 9 zaporednih postaj kaže pri razdalji 50 km precenitve za faktor 1.5 (2 dB) in pri razdalji 100 km podcenitve za faktor 0.3 (-5 dB). Odvisnost je torej kvalitativno prav taka, kakršno so napovedali izmerjeni vertikalni profili odbojnosti.

Razsip radarskih napak okrog lokalnih povprečij v odvisnosti od razdalje je prikazan na sliki 23.4. Disperzija narašča z razdaljo od faktorja 2 (3 dB) v bližini radarja do faktorja 3 (5 dB) daleč proč. Zaradi majhnega števila izmerkov po posameznih postajah so izračunane disperzije precej nenatančne.



Slika 23.5. Odvisnost radarskih napak od višine in premera snopa. Višina je relativna glede na pas taljenja.

V navidezno slučajnem razsipu posameznih radarskih napak okrog celotne povprečne napake so skrite sistematične razlike med radarskimi in talnimi izmerki. Da bi jih razkrili, moramo podatke primerno stratificirati. Izbira klasifikacijskih parametrov je kritična. Ocenimo, da sta fizikalno najbolj smiselni naslednji dve količini:

- višina osi radarskega snopa glede na pas taljenja,
- premer radarskega snopa.

Relativno višino snopa, izračunano iz enačbe (7.1) ob upoštevanju ekvivalentnega zemeljskega radija  $4R/3$ , razdelimo v intervale širine 1 km, premer snopa pa v intervale širine 0.5 km. Kot nereprezentativne izločimo tiste podmnožice podatkov, ki vsebujejo manj kot 100 izmerkov. Iz preostalih 6085 izmerkov določimo dvodimenzionalno tabelo radarskih napak, odvisnih od višine in premera merilnega snopa. Prikazana je na sliki 23.5. Na nekaterih mestih je tabela prazna, ker ustreznih izmerkov ni. Slika potrjuje pričakovanja. Precenitve najdemo v pasu taljenja; z naraščanjem širine snopa pojemajo. Podcenitve se pojavljajo nad pasom taljenja. Pod pasom so meritve brez opaznih sistematičnih napak.

Dobljene kvantitativne ocene za velikost radarskih napak veljajo seveda le za radar, ki meri pod enakimi pogoji kot radar CSIM, to je s snopom širine  $1^\circ$ , pri elevacijskem kotu  $1.5^\circ$  in do razdalje 120 km. Če merimo pri nižjih elevacijskih kotih, pa so dobljeni rezultati reprezentativni celo za nekaj večje razdalje, recimo do kakšnih 150 km.

## 24. Padavine na ravnini in v gorah

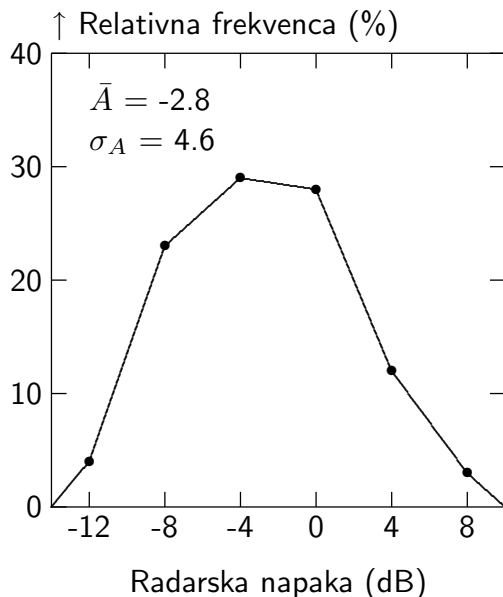
Pri radarskem merjenju v neoptimalnih pogojih ni vseeno, nad kakšnim reliefom potekajo meritve. Gorske pregrade namreč prisilijo horizontalne zračne tokove, da se dvigajo; pri tem se tokovi ohlajajo in v njih se kondenzirajo oblačne kapljice. Morebitni padavinski delci, ki od zgoraj padajo skozi kapljice, rastejo s trki in zlivanjem oziroma sprijemanjem. Stratiformni oblaki torej povzročajo več padavin nad pregradami kot nad ravnino. Domnevamo, da je rast padajočih delcev v spodnjih plasteh orografskega oblaka močnejša kot v zgornjih plasteh, saj je tam kondenzacija izrazitejša zaradi močnejšega dvigovanja in višje temperature [15]. Enake padavine na istih višinah nad ravnino ali gorsko pregrado se do tal različno okrepijo, in sicer nad pregrado bolj. Radar, ki v neoptimalnih pogojih meri padavine na višini, bo talne padavine nad gorsko pregrado bolj podcenil kot nad ravnino.

Za preverjanje, ali navedena domneva drži, je merilno območje okrog radarja CSIM zelo primerno. Njegov južni del je raven, severni pa gorat; meja med obema je ostra. Bolje bi sicer bilo, ko bi gorska pregrada potekala v smeri sever–jug, saj pihajo vetrovi nad območjem večinoma z zahoda, vendar tudi pri obstoječi konfiguraciji lahko pričakujemo zaznavne razlike. V ta namen sem na merilnem območju izbral pas ozemlja med smerema proti severu in proti vzhodu ter med razdaljama 70 in 110 km od radarja; ta pas je z izohipso 500 m razdeljen na dve območji, gorato in ravninsko. V vsakem območju je po osem ombrometrskih postaj (AG, FO, GA, MA, MD, SO, ST, TO v gorah in ER, FT, GR, L3, NP, OD, PU, VA v ravnini). Ker sta območji enako oddaljeni od radarja, potekajo meritve nad obema na enaki višini. Morebitne razlike v radarskih napakah nad enim in drugim območjem je zato treba pripisati vplivu reliefa.

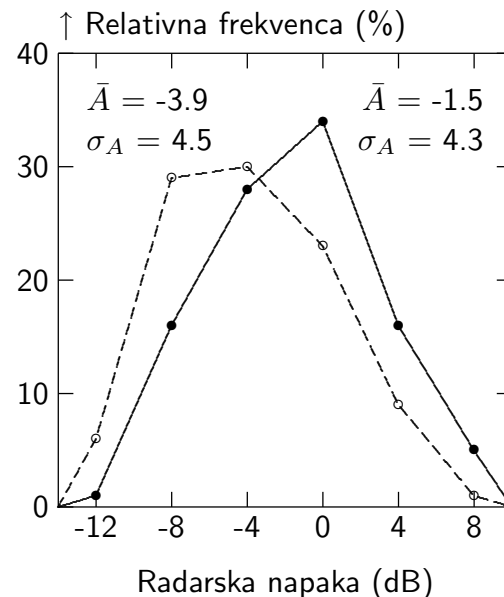
Nad obema območjema, ravninskim in goratim, je v osnovni množici izmerkov skupno 1516 parov radarskih in ombrometrskih urnih akumulacij na 16 lokacijah. Slika 24.1 kaže frekvenčno porazdelitev radarskih napak. Povprečna

napaka znaša  $-2.8$  dB, disperzija napak pa  $4.6$  dB. Korelacijski koeficient med ombrometrskimi in radarskimi izmerki dosega vrednost  $0.36$ .

V skupni frekvenčni porazdelitvi napak se skrivata dve porazdelitvi, ravninska in gorska. Prikazani sta na sliki 24.2. Ravninska porazdelitev vsebuje  $659$  in gorska  $857$  izmerkov. Že na pogled se med seboj razlikujeta: tista nad gorami kaže manjšo povprečno vrednost. Povprečji znašata  $-1.5$  dB nad ravnino in  $-3.9$  dB nad gorami. Razlika med obema,  $2.4$  dB, je vsaj desetkrat večja od disperzije kateregakoli izmed obeh povprečij (stopnje velikosti  $0.1$  dB), zato je statistično značilna. Radar torej nad gorami res bolj podceni padavine kot nad ravnino. Nasprotno pa sta disperziji obakrat približno enaki,  $4.3$  dB nad ravnino in  $4.5$  dB nad gorami. Korelacijski koeficient med ombrografskimi in radarskimi izmerki znaša  $0.47$  v ravnini in  $0.31$  v gorah.



Slika 24.1. Frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Urne točkovne akumulacije na razdaljah  $70$ – $110$  km. Izmerki v gorah in ravnini.



Slika 24.2. Frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Urne točkovne akumulacije na razdaljah  $70$ – $110$  km. Izmerki v gorah (prekinjena črta) in v ravnini (polna črta).

Bolj natančno preiščemo razlikovanje obeh porazdelitev z ustreznimi statističnimi testi. Hipotezo, da imata obe porazdelitvi enako varianco, skušamo zavreči s testom  $F$ , in je pri stopnji zanesljivosti  $90\%$  ne moremo. Nasprotna hipoteza, torej da sta varianci enaki, postane s tem bolj verodostojna. S testom  $t$  zavračamo hipotezo, da sta povprečni vrednosti enaki, in uspemo pri stopnji zanesljivosti preko  $99\%$ . Praktično to pomeni, da je potrjena nasprotna hipoteza o različnih povprečnih vrednostih.

Opažene radarske napake je možno zmanjšati na več načinov. Razdelki v tem poglavju prikazujejo pet tovrstnih metod, njihovo učinkovitost in njihove medsebojne prednosti ter slabosti. Metode so deloma povzete iz literature in deloma originalne.

## 25. Kalibracijski in verifikacijski izmerki

Večina korekcijskih metod potrebuje takšno ali drugačno kalibracijo z radarskimi in ombrometrskimi izmerki. Celotno množico izmerkov je zato smiselno vnaprej razdeliti v dve ločeni podmnožici, od katerih naj ena služi kot kalibracijska, druga pa kot verifikacijska množica za vsako metodo.

Osnovno množico  $N = 6454$  parov izmerkov sem razcepil na dva dela tako, da sem za vsak par na slučajni način določil, v katero podmnožico spada. Za to sem uporabil generator slučajnih števil z enakomerno porazdelitvijo na intervalu  $[0,1]$ . Za vsak par iz osnovne množice sem generiral novo število; če je bilo to število manjše ali enako  $1/2$ , sem par uvrstil v prvo, sicer pa v drugo podmnožico. V kalibracijsko množico se je tako uvrstilo 3294 parov, v verifikacijsko pa 3160. Razlika v številu elementov od pričakovane vrednosti  $N/2$  v vsaki podmnožici je posledica statističnih fluktuacij s stopnjo velikosti  $\sqrt{N}/2$ .

V kalibracijski in verifikacijski množici sta povprečna radarska napaka in disperzija napak enaki, seveda v mejah statističnih fluktuacij. Isto velja za korelacijska koeficienta med ombrometrskimi in radarskimi izmerki. Razlikovanje ima stopnjo velikosti 1%.

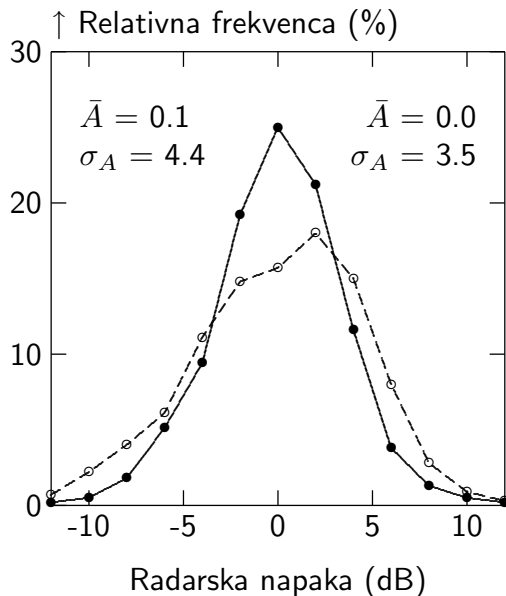
## 26. Ombrometrski faktorji

Najpreprostejša metoda za popraviljanje radarskih napak je uporaba ombrometrskih faktorjev. Za vsako talno lokacijo najprej določimo razmerje med radarskimi in talnimi izmerki – radarsko napako, upoštevajoč letne, sezonske, dnevne ali urne meritve; nato predpostavimo, da so ugotovljene napake reprezentativne po okolicah in nove radarske izmerke popravljamo tako, da jih množimo z recipročnimi vrednostmi starih napak – z ombrometrskimi faktorji. Načinov, kako določiti in uporabiti faktorje, je skoraj toliko, kolikor je avtorjev [35] [14] [17]. Raziskava se osredotoča na regionalne sezonske faktorje. Razlogi so naslednji.

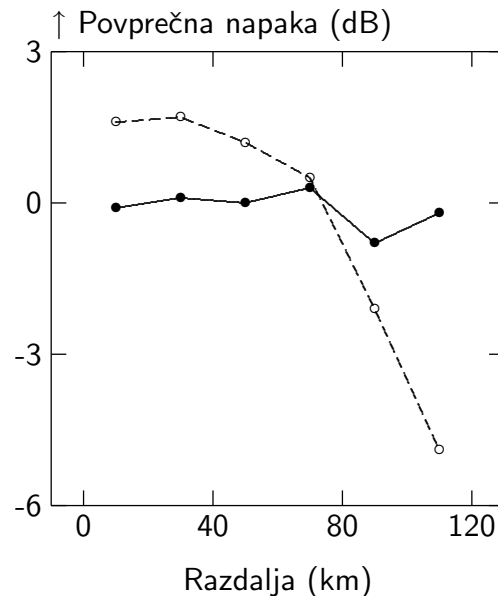
Glavni vzrok za radarske napake v neoptimalnih pogojih merjenja je vertikalna nehomogenost padavin, ki je tesno povezana z višino izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ . Ta višina se s časom spreminja. Nad merilnim območjem CSIM se pozimi in poleti razlikuje za 4 km, kar je nekajkrat več kot povprečni premer radarskega snopa.

Celoletni kalibracijski faktor torej ne posreduje vse razpoložljive informacije, saj se preceinitve in podceinitve med seboj deloma izničujajo. Nasprotno pa so nihanja znotraj posameznih sezon primerljiva s premerom snopa in sezonski kalibracijski faktorji se zdijo mnogo boljše rešitev. Še krajša obdobja pri merjenju v neoptimalnih razmerah verjetno ne pridejo v poštev, saj se v njih višina izoterme  $0^{\circ}\text{C}$  spreminja la malo v primerjavi s premerom radarskega snopa pri srednjih in velikih razdaljah. Dnevni in urni kalibracijski faktorji so tako primerni predvsem za merjenje v optimalnih razmerah. Pa še tam je treba paziti, da ne naredijo več škode kot koristi [31].

Podobni razmisleki kot za časovno veljajo tudi za krajevno povprečevanje. En sam kalibracijski faktor za vse območje nima veliko smisla. Poseben faktor za vsako postajo je lahko obremenjen z lokalnimi napakami, ki niso reprezentativne za bližnjo okolico. Najboljša rešitev za merjenje v neoptimalnih pogojih se zato zdi primerno velika skupina ombrometrov v približno enakem reliefu.



Slika 26.1. Frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z ombrometrskimi faktorji (polna črta).



Slika 26.2. Povprečna radarska napaka v odvisnosti od razdalje. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z ombrometrskimi faktorji (polna črta).

V raziskavi sem določil ombrometrške faktorje iz kalibracijske množice podatkov takole. Merilno površino sem razdelil na 13 reliefno približno homogenih območij, ki so vsebovala po 5–8 ombrometrov. Tipična horizontalna razsežnost območja je znašala 20 km. Nadalje sem časovni niz izmerkov razvrstil v tri sezonske nize: pomladni (marec – maj), poletni (junij – september) in jesenski (oktober – november). September sem prištel k poletju zaradi majhnega števila izmerkov v treh pravih poletnih mesecih. Za vsako talno območje in za vsako sezono sem nato izračunal

radarsko napako iz vseh pripadajočih parov ter privzel, da je ta napaka reprezentativna za vsako postajo na obravnavanem območju. Tako izračunane napake iz kalibracijske množice služijo za korekcijo radarskih podatkov iz verifikacijske množice.

Kako je metoda učinkovita? Slika 26.1. kaže frekvenčno porazdelitev radarskih napak v verifikacijski množici za nekorigirane in korigirane radarske izmerke. Povprečna napaka pri obeh je praktično enaka, disperzija pa se precej zmanjša, od 4.4 dB na 3.5 dB. Korelacijski koeficient med talnimi in radarskimi izmerki se poveča od 0.49 na 0.65. Izboljšanje je torej znatno. Še bolje se vpliv korekcije vidi na sliki 26.2, ki prikazuje odvisnost radarskih napak od oddaljenosti. Precenitve pri srednjih razdaljah in podcenitve pri velikih razdaljah so skoraj odpravljene. Na vsem merilnem območju do razdalje 120 km ni več znatnih sistematičnih napak, razen seveda tistih, ki so še vedno skrite v navidezno slučajnem sipanju okrog povprečnih vrednosti.

## 27. Umeritvena tabela

Korekcija radarskih podatkov z ombrometrskimi faktorji je sicer učinkovita, vendar ima to pomanjkljivost, da ne upošteva merilnih pogojev eksplicitno, pač pa le implicitno. Časovno odvisni faktorji skrivajo vpliv višine izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ , prostorsko odvisni faktorji pa vpliv premera radarskega snopa in reliefa. Korekcijska metoda je zato uporabna le za območje, kjer je kalibrirana, in jo drugje brez ponovne kalibracije težko uporabimo.

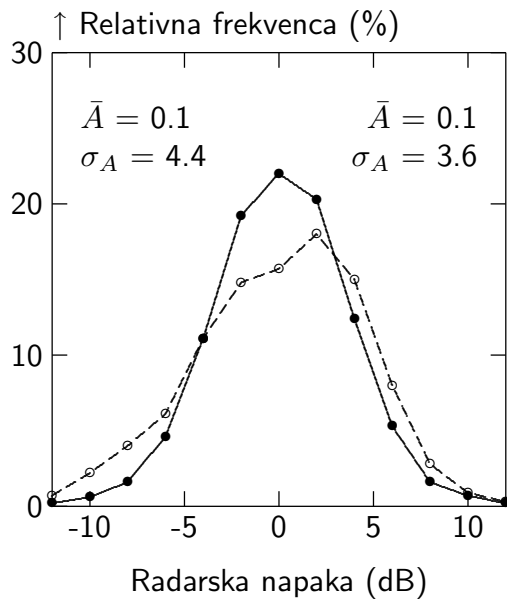
Omenjene pomankljivosti odpravimo, če primerjamo radarske in talne izmerke pri izbranih pogojih merjenja ter poiščemo vpliv tistih parametrov (višine, višine izoterme  $0^{\circ}\text{C}$  itd.), ki na natančnost zares in neposredno vplivajo. Kalibracijsko množico izmerkov v ta namen primerno stratificiramo ter za vsako podmnožico določimo njen umeritveni faktor. Dobljene faktorje nato uporabljamo za korekcijo novih radarskih izmerkov v podobnih merilnih pogojih. Ni mi znano, da bi to preprosto metodo kdo že uporabil.

Kvantifikacija parametrov, ki vplivajo na natančnost meritev, je do neke mere prepuščena svobodni izbiri. Tako, na primer, lahko upoštevamo višino radarskega snopa in višino izoterme  $0^{\circ}\text{C}$  posebej, ali pa oboje nadomestimo z relativno višino snopa nad izotermo. Slednja izbira je očitno boljša, saj zmanjša število parametrov in verjetno ne zavrže nič informacije. Prav tako lahko upoštevamo oddaljenost od radarja ali premer radarskega snopa. Obe količini sta namreč funkcijsko povezani. Boljši je drugi parameter, ker bolj neposredno opisuje merilne pogoje, namreč velikost radarske merilne prostornine. Ko enkrat določimo vpliv premera na natančnost meritev, je rezultat tudi neposredno uporaben za radarje z drugačnimi širinami snopov; poznana odvisnost od oddaljenosti tega ne omogoča brez dodatne informacije o širini snopa.

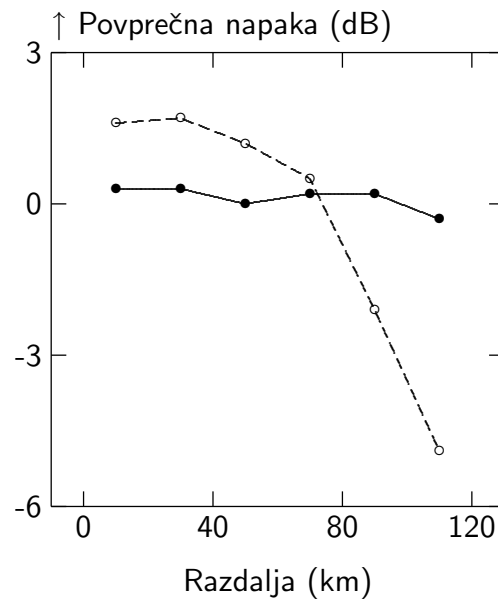
Za kvantificiranje merilnih pogojev nad vsako talno lokacijo sem v raziskavi izbral naslednja dva parametra: premer radarskega snopa  $D$  in relativno višino osi radarskega snopa nad višino maksimuma v pasu taljenja  $\Delta h$ . Pri tem sem

privzel, da leži maksimum v pasu taljenja na višini 0.3 km pod izotermo  $0^{\circ}\text{C}$ . Kalibracijsko množico sem razdelil v razrede z ločljivostjo 0.5 km po premeru in 1.0 km po relativni višini. Za vsak razred, v katerem se je znašlo več kot 50 parov izmerkov, sem izračunal radarsko napako. V ostalih razredih sem privzel, da znaša napaka 0 dB. Tabela napak, izračunana iz kalibracijske množice, se ne razlikuje bistveno od tiste, ki je izračunana iz celotne množice in prikazana na sliki 23.5. Vpliva reliefa nisem poskušal zajeti, ker bi se na ta način število razredov nekajkrat povečalo, s tem pa bi se zmanjšalo število izmerkov v vsakem.

Izračunana tabela napak  $A(D, \Delta h)$  omogoča korekcijo radarskih izmerkov v verifikacijski množici na prav tak način kot ombrometrski faktorji, namreč z odštetjem ustrezne napake od vsakokratnega radarskega izmerka. Korigirana verifikacijska množica bi morala kazati boljše ujemanje med radarskimi in ombrometrskimi izmerki kot nekorigirana. Slika 27.1 kaže porazdelitev radarskih napak v nekorigirani in v korigirani verifikacijski množici. Povprečna napaka je obakrat enaka, disperzija pa se zmanjša od 4.4 na 3.6 dB. Korelacijski koeficient med ombrometrskimi in radarskimi izmerki se poveča od 0.49 na 0.62. Tudi odvisnost napak od oddaljenosti je dosti manj izrazita pri korigiranih podatkih kot pri nekorigiranih. Prikazana je na sliki 27.2.



Slika 27.1. Frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z umeritveno tabelo (polna črta).



Slika 27.2. Povprečna radarska napaka v odvisnosti od razdalje. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z umeritveno tabelo (polna črta).

Primerjava korekcije z umeritveno tabelo in korekcije z ombrometrskimi faktorji kaže, da sta obe približno enako učinkoviti. Umeritvena tabela je bolj pregledna in prenosljiva, a tudi rahlo slabša, verjetno zato, ker eksplicitno ne zajema vpliva reliefa.

## 28. Linearna regresija

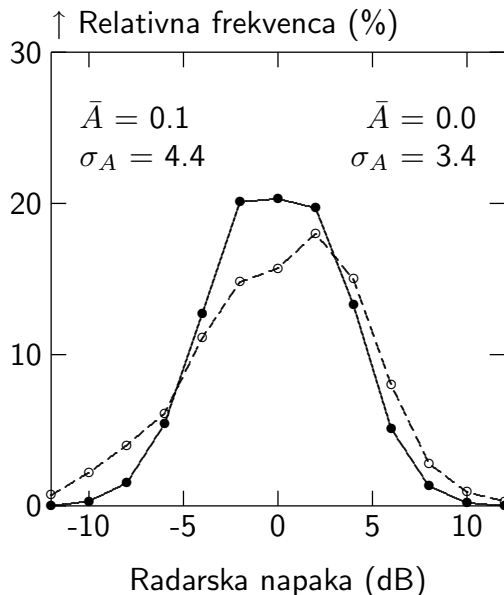
Umeritvena tabela kaže odvisnost radarske napake od dveh količin, premera snopa in njegove višine glede na pas taljenja. To odvisnost poskusimo opisati s primerno enačbo.

Graf umeritvene tabele, prikazan na sliki 23.5, kaže dve značilnosti: prvič, pri izbrani višini snopa se radarski izmerki v primerjavi s talnimi zmanjšujejo z naraščajočim premerom snopa in drugič, pri izbranem premeru snopa se pojavlja maksimum radarskih izmerkov na višini pasu taljenja, z odklikom od te višine navzgor ali navzdol pa se izmerki manjšajo. Graf torej navaja na misel, da bi bila kot prvi približek uporabna kar linearna odvisnost od premera snopa  $D$  in absolutne vrednosti njegovega odklika od pasu taljenja  $|\Delta h|$ . Med talnim izmerkom, radarskim izmerkom in obema navedenima količinama, ki opisujeta merilne pogoje, privzamemo torej naslednjo povezavo

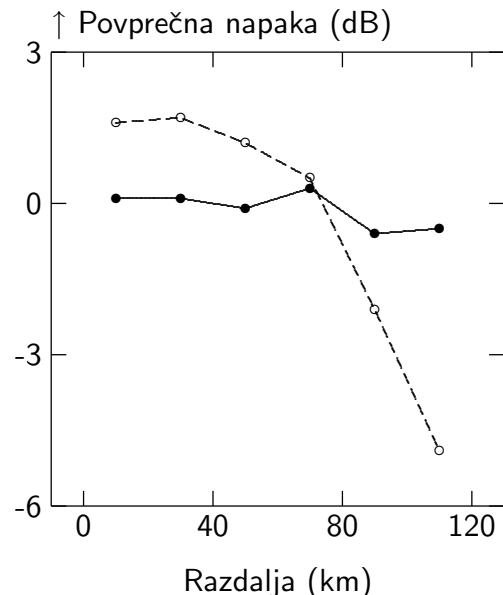
$$10 \log \frac{Q_G}{Q_0} = a + b 10 \log \frac{Q_R}{Q_0} + c D + d |\Delta h| \quad (28.1)$$

s primerno izbranimi koeficienti. Vrednosti koeficientov določimo tako, da minimizirajo povprečno kvadratno razliko med levo in desno stranjo. Regresijska analiza na podatkih kalibracijske množice pokaže:  $a = -0.37$ ,  $b = 0.61$ ,  $c = 0.24/\text{km}$  in  $d = 0.11/\text{km}$ .

Regresijsko enačbo z znanimi koeficienti uporabimo za korekcijo radarskih izmerkov iz verifikacijske množice. Primerjava korigiranih in nekorigiranih radarskih izmerkov s talnimi izmerki je prikazana na slikah 28.1 in 28.2.



Slika 28.1. Frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z linearno regresijo (polna črta).



Slika 28.2. Povprečna radarska napaka v odvisnosti od razdalje. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z linearno regresijo (polna črta).

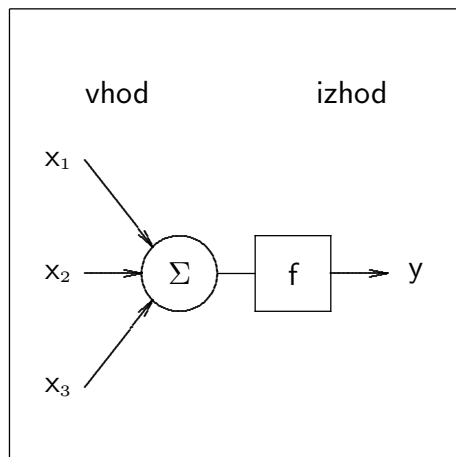


Radarske napake korigiranih izmerkov kažejo manjšo disperzijo, 3.4 dB namesto 4.4 dB. Korelacijski koeficient med korigiranimi radarskimi in talnimi meritvami se poveča od 0.49 na 0.60. Izboljšanje je torej približno tako veliko kot pri neposredni korekciji z umeritveno tabelo. To se vidi tudi v odvisnosti radarskih napak od razdalje, kjer so precenitve in podcenitve skoraj povsem odpravljene. Linearna regresija torej kar dobro služi za korekcijo radarskih izmerkov; delno gre to na račun smiselne izbire regresijskih spremenljivk, zlasti absolutnega odmika  $|\Delta h|$ . Če namreč namesto njega izberemo usmerjeni odmik  $\Delta h$ , postane regresija takoj manj učinkovita.

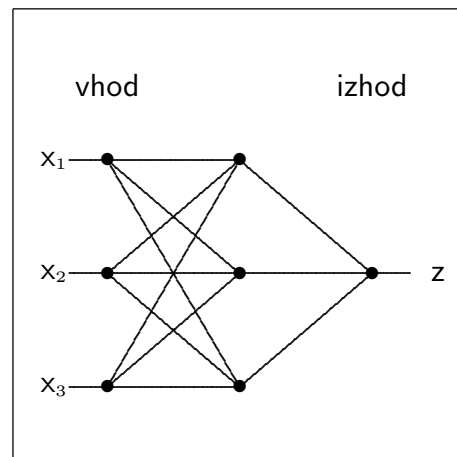
Linearno regresijo med radarskimi in talnimi izmerki padavin je za izboljšanje radarske natančnosti uporabljalo že več avtorjev [24] [18]. Kar je v raziskavi novega, je specifični nabor regresijskih spremenljivk. Rezultati kažejo, da so spremenljivke dobro izbrane.

## 29. Nevronska mreža

Odvisnost radarske napake od premera in višine snopa je linearna le v prvem približku. Korekcija z linearno regresijo je zato omejeno učinkovita. Mogoče lahko dosežemo boljši rezultat z nelinearno regresijo? Ker njene funkcijske oblike ne poznamo, si lahko pomagamo z nevronska mrežo. Metoda je novejša in na področju radarskega merjenja padavin manj znana, zato jo pred uporabo na kratko razložimo.



Slika 29.1. Neuron.



Slika 29.2. Nevronska mreža.

Nevronska mreža je struktura, sestavljena iz tako imenovanih nevronov. Slika 29.1 prikazuje en nevron. Količine  $x_i$  predstavljajo vhodni podatkovni vektor, na primer trojico  $10 \log Q_R/Q_0$ ,  $D$  in  $\Delta h$ . Vsaka komponenta vektorja se množi z neko utežjo  $w_i$ , nakar se vsi produkti seštejejo in vsota se s primerno nelinearno

funkcijo preslika na interval  $[0,1]$ . Zaradi simetrije so ponavadi tudi vhodni podatki normirani na isti interval. Izhod iz nevrona je torej količina

$$y = f \left( \sum_i w_i x_i \right), \quad (29.1)$$

pri čemer je nelinearna funkcija  $f$  ponavadi naslednja:

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}}. \quad (29.2)$$

Pri zgoraj omenjenih vhodnih podatkih imamo izhod za (normirani) približek k ombrometrskemu izmerku. Več nevronov lahko povežemo v nevronske mreže. Primer take mreže je prikazan na sliki 29.2. Sestavljena je iz treh plasti nevronov: vhodne, vmesne in izhodne. Vhodna plast sprejema vhodne vektorje; izhodi predhodne plasti služijo kot vhodi za naslednjo plast; izhodna plast pa posreduje izhodne vektorje, v prikazanem primeru samo enokomponentne. Seveda je število plasti in število nevronov v posamezni plasti lahko drugačno od prikazanega. Pomembno je, da je ob primerni izbiri uteži in pri dovolj veliki mreži mogoče vhodne vektorje bolj ali manj natančno preslikati v takšne izhodne vektorje, kot jih želimo. Izbira nelinearne prenosne funkcije pri tem ne igra bistvene vloge: pri drugačni obliki se spremenijo le velikosti uteži iz optimalnega nabora.

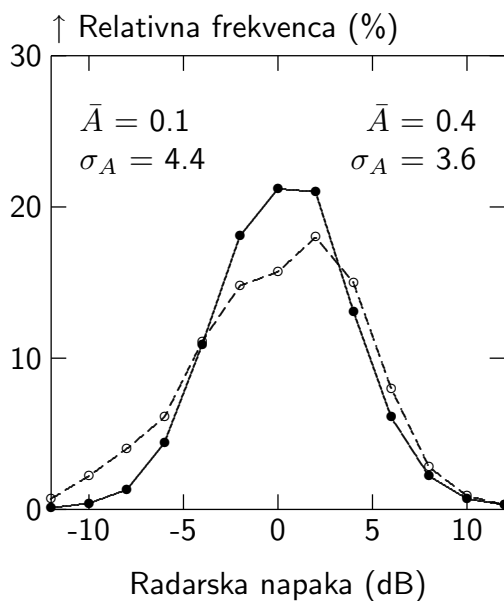
V izbrani mreži je potrebno nastaviti uteži tako, da bodo generirani izhodi čim bližje željenim. Postopek poteka takole. Najprej izberemo poljubne utežne vrednosti. Nato v mrežo uvedemo  $N$  vhodnih vektorjev in izhode primerjamo z željenimi vrednostmi. Razlikovanje med obojimi kvantificiramo s povprečno kvadratno napako. Če je napaka dovolj majhna, prenehamo, sicer pa sistematično spreminjamo uteži tako, da se napaka čedalje bolj manjša. Napaka limitira k minimalni napaki, ki je določena s konfiguracijo mreže in naborom vhodnih ter izhodnih podatkov. Pri nesrečni izbiri začetnih uteži se lahko zgodi, da do konvergence napak ne pride; potem je pač treba kalibracijo ponoviti z drugim začetnim naborom.

V raziskavi nas zanima preslikava vhodnih vektorjev  $10 \log Q_R/Q_0$ ,  $D$  in  $\Delta h$  v ombrometrsko izmerko  $10 \log Q_G/Q_0$ . Vse izmerke je seveda treba predhodno preslikati na interval  $[0,1]$ , kar najpreprosteje naredimo z zamikom in spremembo skale. Iz neskončne množice različnih mrež se moramo nato odločiti za eno. Izberemo tisto, ki je prikazana na sliki 29.2. Razlogi so naslednji. Očitno mora vhodna plast vsebovati tri, izhodna pa le en nevron. Da omogočimo medsebojni vpliv vhodnih komponent, potrebujemo vsaj eno vmesno plast. Primerno je, da ima tudi ta tri nevrone, ker tako dopustimo možnost, da se vhodne komponente preslikajo v izhod brez medsebojnih interferenc.

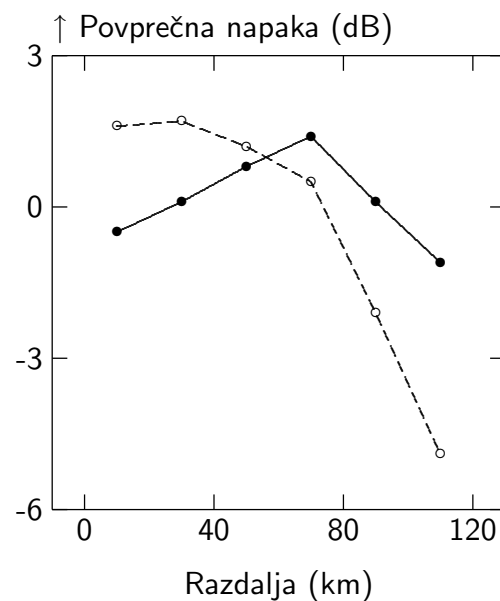
Prilagajanje mrežnih uteži, to je učenje mreže, je dolgotrajno, če je učna množica vhodnih in izhodnih vektorjev velika. Celotna kalibracijska množica 3294 radarskih in ombrometrskih izmerkov ne pride v poštev, saj bi enkratno učenje mreže na osebem računalniku trajalo kar nekaj dni. Zato sem učno množico

naredil posredno iz umeritvene tabele, ki je bila predhodno zgrajena iz kalibracijske množice. Za vsak neprazni razred tabele  $A(D, \Delta h)$  sem določil štiri pare  $10 \log Q_R/Q_0$  in  $10 \log Q_G/Q_0 = 10 \log Q_R/Q_0 - A$  in sicer za radarske izmerke 0, 5, 10 in 15 dBR. Tako je nastalo  $N = 56$  učnih vektorjev. S temi vektorji se je dalo izbrano mrežo naučiti do kvadratne napake  $E^2 = 0.08$ . Če predpostavimo, da k napaki prispevajo vsi vektorji enako, znaša napaka pri posameznem normiranem vektorju  $E/\sqrt{N} = 0.01$ . Mrežne uteži so pri tem zavzele vrednosti med 0.5 in 3.

Kalibrirano mrežo sem preizkusil na verifikacijski množici izmerkov. Mreža je vsakemu radarskemu izmerku priredila korigirani radarski izmerk. Njihova primerjava s talnimi izmerki je prikazana na slikah 29.3 in 29.4.



Slika 29.3. Frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z nevronske mreže (polna črta).



Slika 29.4. Povprečna radarska napaka v odvisnosti od razdalje. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z nevronske mreže (polna črta).

Radarskim napakam se zmanjša disperzija od 4.4 na 3.6 dB, vendar pa povprečna napaka malo naraste: od 0.1 na 0.4 dB. Korelacijski koeficient med ombrometrskimi in korigiranimi radarskimi izmerki se poveča od 0.49 na 0.59. Izboljšanje je manjše kot pri linearni regresiji. Tudi odvisnost napak od razdalje ni tako dobro odpravljena kot tam. To je na prvi pogled presenetljivo, saj naj bi nelinearna mreža bolje opisala radarske napake kot linearna regresija. Videti pa je, da uporabljena učna množica za kalibracijo mreže le ni bila dovolj reprezentativna. Struktura izbrane mreže je verjetno dovolj bogata: testiranja drugih, obsežnejših mrež namreč niso dala boljših rezultatov.

Uporaba nevronske mreže za izboljšanje radarskih izmerkov padavin ni nova. Takšno pot je izbralo že nekaj avtorjev [16]. Kar je v raziskavi novega, je izbira vhodnih vektorjev, ki kvantificirajo merilne pogoje, in temu prilagojena struktura

mreže. Optimalna izbira vhodnih vektorjev in optimalna struktura mreže pa sta zaenkrat še odprti področji za druge raziskave.

### 30. Vertikalna ekstrapolacija odbojnosti

Vse metode za izboljšanje radarske natančnosti, prikazane do sedaj, so temeljile na uporabi ombrometrskih izmerkov. Tovrstne metode zmanjšujejo radarske napake posredno. Ker pa poznamo glavni vir napak – vertikalno nehomogenost padavin, je smiselno, da jo poskusimo upoštevati tudi neposredno. Za to se ponujata dva glavna pristopa. Iz izmerjene odbojnosti na višini lahko sklepamo na odbojnost pri tleh in iz nje izračunamo talno jakost padavin. Ali pa iz izmerjene odbojnosti na višini ocenimo višinsko jakost padavin in iz nje sklepamo na talno jakost. Zastavljena raziskava se omejuje na prvi, lažji pristop. Pri drugem načinu naletimo namreč na težavo, kako določiti jakost padavin v pasu taljenja iz izmerjene ekvivalentne odbojnosti.

Za doseg željenega cilja je treba radarsko enačbo (9.5) najprej razširiti tako, da bo veljala tudi v vertikalno nehomogenih padavinah. Omejimo se na najvažnejši primer, ko je radarski snop približno horizontalen, in predpostavimo, da so padavine v vsaki merilni prostornini vzdolž snopa horizontalno homogene. To je smiselno, saj znašata tipična dolžina in premer impulza dosti manj kot horizontalna dekorelacijska razdalja v padavinskih poljih. Prostornina z vertikalno neenakomerno porazdeljeno odbojnostjo  $Z$  povzroči enako močan odmev kot ista prostornina z enakomerno porazdeljeno povprečno odbojnostjo  $\bar{Z}$ . Zaradi predpostavljene radialne homogenosti padavin je treba pri integraciji odbojnosti po prostoru upoštevati le integracijo po prostorskem kotu  $d\Omega$ , uteženo seveda s smernim diagramom  $f$  antene:

$$\bar{Z} \int f^2 d\Omega = \int f^2 Z d\Omega. \quad (30.1)$$

Diferencial prostorskega kota izrazimo z diferencialoma horizontalnega in vertikalnega kota glede na os antene:  $d\Omega = d\alpha d\beta$ , upoštevamo normalni diagram antene in integriramo po horizontalnem kotu. Enačba (30.1) se poenostavi v obliko

$$\begin{aligned} \bar{Z} &= \int Z(h + r\beta) \bar{f}^2(\beta) d\beta, \\ \bar{f}^2(\beta) &= \frac{1}{\theta_1 \sqrt{\pi}} \exp(-\beta^2/\theta_1^2), \\ \theta_1 &= \theta_0/\sqrt{8 \ln 2}. \end{aligned} \quad (30.2)$$

Količina  $\bar{f}^2$  je horizontalno integrirani smerni diagram antene. Integracija odbojnosti poteka po vertikalnem kotu  $\beta$  glede na os snopa. Enačba povezuje povprečno odbojnost  $\bar{Z}$ , ki jo radar izmeri pri žarkovni oddaljenosti  $r$  in na višini  $h$ , z neznano horizontalno homogeno porazdelitvijo odbojnosti po okolišnjem prostoru. Predpostavimo horizontalno homogenost prav do tal in zapišemo odbojnost na višini

$h$  kot  $Z(h) = Z(0)z(h)$ , s čimer definiramo normirani vertikalni profil odbojnosti. Vstavitev v enačbo (30.2) da

$$\bar{Z}/Z(0) = \int z(h + r\beta) \bar{f}^2(\beta) d\beta. \quad (30.3)$$

Če torej poznamo vertikalni profil  $z(h)$ , lahko iz izmerjene odbojnosti  $\bar{Z}$  na višini izračunamo prizemno odbojnost  $Z(0)$  in iz nje nato prizemno jakost padavin. Težava je seveda v tem, ker profila ne poznamo in ga je potrebno na nek način določiti. Opisano metodo sta med prvimi sistematično razvila Andrieu in Creutin [12], uporabila pa Brown [15] in Koistinen [30]. Ista problematika je na druge, a sorodne načine obdelana v člankih [26], [25] in [28].

Ključ do uspešnosti metode leži v izbiri reprezentativnega profila nad vsako talno lokacijo; profil se s časom seveda lahko spreminja. Različni avtorji so izbirali različne profile, ki jih lahko razvrstimo v dve glavni skupini: dejansko izmerjeni profili v okolici radarja in shematizirani profili. Zastavljena raziskava se omejuje na slednje, ker so za implementacijo in uporabo preprostejši.

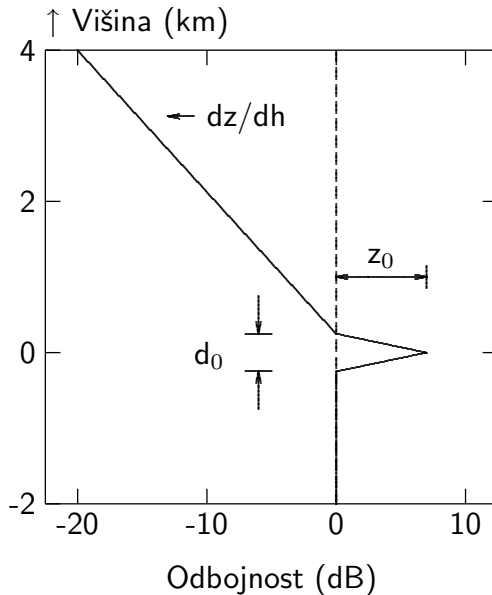
Na to, kakšni naj bodo shematizirani profili, opozarjajo že izmerjeni dnevni profili. Privzamemo naslednje lastnosti:

- Profil nad izbrano talno lokacijo se spreminja le vsako uro, vmes pa je konstanten.
- Profil ima le dve obliki, stratiformno in konvektivno, in je podan relativno na višino izoterme  $0^\circ\text{C}$ .
- Odločitev za enega od obeh profilov temelji na lokalnih karakteristikah padavin. Pri močnih padavinah nad pasom taljenja je veljaven konvektivni profil, drugače pa stratiformni.

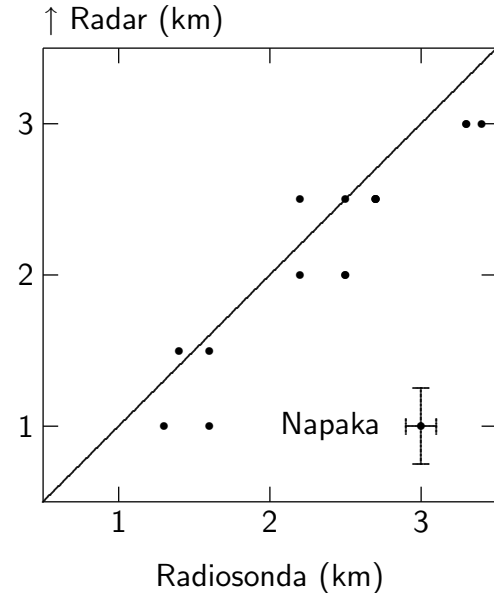
Privzeti shematični profil je prikazan na sliki 30.1. Vsebuje nekaj parametrov, ki jim je treba določiti vrednosti. Najvažnejša je vsekakor višina izoterme  $0^\circ\text{C}$ . V prvem približku privzamamo, da je ta višina ves dan konstantna in podana z radiosondno meritvijo opoldne. Druga možnost bi bila, da višino pasu taljenja določimo neposredno iz izmerjenih vertikalnih profilov odbojnosti. Primerni se zdijo zlasti triurni profili, ki bi utegnili dobro prikazati hitro spremembo temperature pri prehodu hladne fronte. Trenutni in urni profili namreč preveč fluktuirajo, dnevni pa omogočajo približno enako natančnost kot radiosondne meritve. To je razvidno iz slike 30.2.

Vrednosti ostalih parametrov profila (debelino pasu taljenja  $d_0$ , maksimum odbojnosti v pasu  $z_0$ , gradient odbojnosti nad pasom  $dz/dh$ ) in mejno akumulacijo padavin za ločevanje med stratiformnim in konvektivnim profilom  $Q_0$  najbolj preprosto določimo z umerjanjem: sistematično variramo vrednosti parametrov in za vsak nabor pogledamo, kako ustrezeni profil korigira kalibracijsko množico radarskih izmerkrov. Za najboljšega proglasimo tisti nabor, pri katerem je razlikovanje med ombrometrskimi in korigiranimi radarskimi izmerki najmanjše. Razliko kvantificiramo s korelacijskim koeficientom. Izkaže se, da je najboljši naslednji

nabor:  $d_0 = 1$  km,  $z_0 = 7.5$  dB,  $dz/dh = -5$  dB/km in  $Q_0 = 10$  mm. Od vseh naštetih parametrov ima zadnji, diskriminacijski parameter, najmanjši vpliv.



Slika 30.1. Shematični vertikalni profil odbojnosti. Stratiformna oblika (polna črta) in konvektivna oblika (prekinjena črta). Profil je relativen glede na prizemno odbojnost.

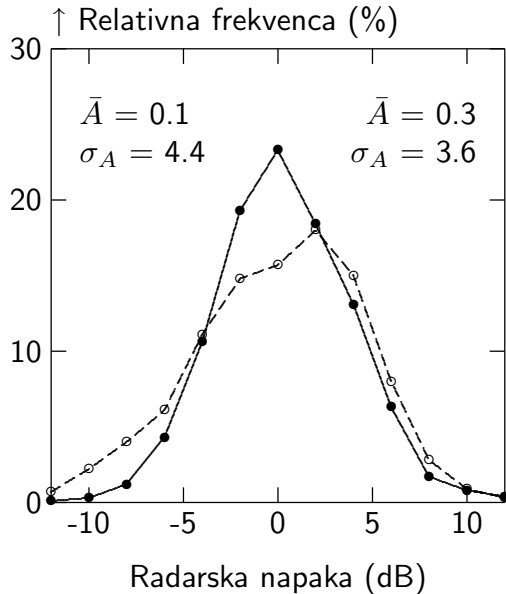


Slika 30.2. Višina pasu taljenja, določena iz radiosondnih meritev temperature in iz dnevnih profilov odbojnosti.

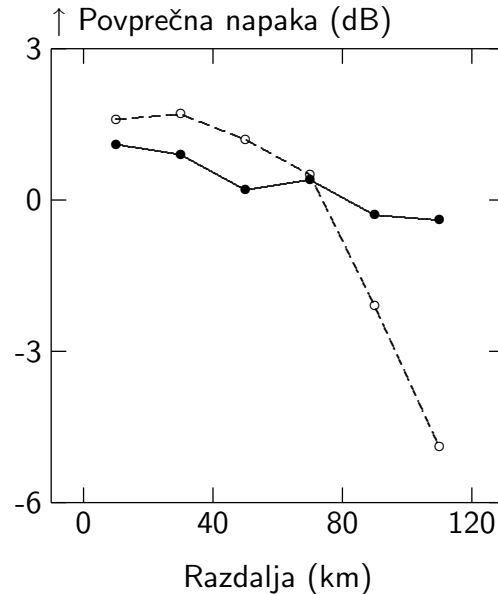
Dobljene vrednosti parametrov so smiselne. Debelina pasu je sicer rahlo pretirana, vendar zato uspešno kompenzira napake zaradi variabilnosti v višini izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ . Maksimum odbojnosti ima približno takšno vrednost, kot jo napoveduje teorija. Konstanta  $|K|^2$  je namreč pri vodi petkrat večja kot pri ledu; od tod porast odbojnosti v zgornjem delu pasu taljenja za približno 7 dB. Tudi padanje dežnih kapljic je približno petkrat hitrejše od padanja snežink; od tod padec odbojnosti v spodnjem delu pasu za približno 7 dB. Nadalje ima gradient odbojnosti nad pasom taljenja približno takšno vrednost, kot je bila izmerjena pri dnevnih stratiformnih profilih. In diskriminacijska vrednost 10 mm se dobro ujema z vsakodnevno izkušnjo o jakosti stratiformnih in konvektivnih padavin.

Kakšna je učinkovitost kalibriranih shematičnih profilov, se pokaže, ko z njimi korigiramo verifikacijsko množico izmerkov. Slika 30.3 prikazuje frekvenčno porazdelitev radarskih napak za nekorigirane in korigirane izmerke. Korigirani izmerki kažejo manjšo disperzijo (3.6 namesto 4.4 dB) in približno enako povprečje (0.3 namesto 0.1 dB) kot nekorigirani. Korelacijski koeficient med talnimi in korigiranimi izmerki se poveča od 0.49 na 0.62. Odvisnost povprečnih napak od razdalje je v veliki meri odpravljena. Podcenitve pri razdalji 100 km znašajo v povprečju le še  $-1$  dB, precenitve pri razdaljah 50 km pa 1 dB. Samo pri kratkih razdaljah pod 30 km je izboljšanje majhno. Tukaj je premer radarskega snopa primerljiv z napakami v višini izoterme  $0^{\circ}\text{C}$ , ki znašajo nekaj sto metrov. Zgodi

se lahko, da tiplje radarski snop po pasu taljenja, a ga obravnavamo, kot da je zunaj, in obratno. Obakrat pridemo napako približno 7 dB.



Slika 30.3. Frekvenčna porazdelitev radarskih napak. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z vertikalnimi profili (polna črta).



Slika 30.4. Povprečna radarska napaka v odvisnosti od razdalje. Urne točkovne akumulacije. Osnovna metoda merjenja (prekinjena črta) in korekcija z vertikalnimi profili (polna črta).

### 31. Ekstrapolacija odbojnosti v gorah

Vertikalni profili, s katerimi smo določali prizemne odbojnosti, so bili enaki nad ravnino in v gorah. Vemo pa tudi, da radar nad gorami bolj podceni padavine kot nad ravnino. Smiselno je torej pogledati, ali lahko to razlikovanje zajamemo z ustreznim profilom odbojnosti [15].

Močnejša rast padavinskih delcev v spodnjih plasteh orografskih oblakov povzroči, da narašča odbojnost proti tlam hitreje, kot nad ravnino. Vertikalni profil odbojnosti nad gorami si zato zamislimo kot normirano superpozicijo dveh profilov: povprečnega, do sedaj uporabljanega profila in orografskega dodatka k njemu. Nadalje predpostavimo, da ima orografski dodatek največjo vrednost pri bazi oblaka, nato pa linearno pojema z višino. Jakost in vertikalna razsežnost dodatka sta odvisni od lokalnega zračnega dviganja, torej posredno od reliefa in smeri ter jakosti vetra. Izven okvira raziskave je, da bi profil zares izračunali z numeričnim padavinskim modelom, kar bi bila najboljša rešitev. Tukaj privzamemo, da je oblika orografskega dodatka konstantna. Vertikalno razsežnost dodatka ocenimo na 1 km, jakost pri bazi oblaka pa določimo z umerjanjem na kalibracijski množici podatkov nad goratim testnim območjem, opisanim v razdelku

24. Pokaže se, da znaša optimalna jakost dodatka 1.5 dB. Višino baze oblakov je sicer možno določiti iz radiosondnih meritev temperature in vlage, vendar so nenatančnosti pri tem tako velike, da sem privzel kar konstantno vrednost 2 km.

Kako orografski dodatek k povprečnim profilom izboljša radarsko natančnost? Verifikacijska množica 440 izmerkov nad omenjenim goratim testnim območjem ima povprečno napako  $-3.4$  dB in disperzijo napak 4.6 dB. Ko jo korigiramo s povprečnimi profili, kaže povprečno radarsko napako  $-0.8$  dB in disperzijo 3.7 dB. Dodatna korekcija z orografskimi profili ne spremeni disperzije, pač pa premakne povprečno napako na  $-0.1$  dB. Izboljšanje je torej vidno, vendar je po absolutni vrednosti majhno. Ko korigiramo še celotno verifikacijsko množico izmerkov na vsem območju, in sicer nad gorami z orografskim dodatkom, nad ravnino pa brez njega, ne pridobimo pri radarski natančnosti praktično ničesar. Zaključimo lahko naslednje: dokler uporabljamo za glavno korekcijo tako grob profil, kot v tej raziskavi, se zdi, da ga nima smisla dodatno zapletati z orografskimi vplivi.

## 32. Medsebojna primerjava merilnih metod

Prikazane korekcijske metode so različno učinkovite. Vsaka ima tudi svoje prednosti in slabosti. Če hočemo med njimi izbrati najustreznejšo za praktično uporabo, jih je potrebno še medsebojno primerjati.

Učinkovitost metod je na kratko prikazana v tabeli 32.1. Tabela je povzetek predhodnih rezultatov in prikazuje, kakšna je radarska natančnost pri merjenju točkovnih urnih akumulacij padavin po posameznih metodah. Vse metode so bile uporabljene na isti množici radarskih izmerkov. Natančnost je kvantificirana s povprečno radarsko napako  $\bar{A}$ , disperzijo napak  $\sigma_A$  in korelacijskim koeficientom  $r$  med ombrometrskimi in radarskimi izmerki.

Tabela 32.1. Učinkovitost merilnih metod v neoptimalnih razmerah. Urne točkovne akumulacije, 3160 ur, 80 ombrometrov. Povprečna napaka  $\bar{A}$ , disperzija napak  $\sigma_A$ , korelacijski koeficient med ombrometrskimi in radarskimi izmerki  $r$ .

N	Merilna metoda	$\bar{A}$ (dB)	$\sigma_A$ (dB)	$r$
0	Osnovna metoda	0.1	4.4	0.49
1	Ombrometrski faktorji	0.0	3.5	0.65
2	Umeritvena tabela	0.1	3.6	0.62
3	Linearna regresija	0.0	3.4	0.60
4	Nevronska mreža	0.4	3.6	0.59
5	Vertikalni profili	0.3	3.6	0.62

Tabela kaže, da je po doseženi natančnosti najboljša metoda z ombrometrskimi faktorji. Velja se spomniti, da so bili ti faktorji določeni s primernim časovnim in prostorskim povprečevanjem. Faktorji implicitno upoštevajo oba bistvena vzroka



za nenatančnost meritev, namreč širino radarskega snopa in njegovo višino nad tlemi, pa tudi ostale manj pomembne vplive, recimo relief. Ni torej presenetljivo, da omogočajo doseganje najvišje korelacije 0.65 s talnimi meritvami. Žal pa ima ta metoda veliko pomanjkljivost: da jo uspešno implementiramo, potrebujemo gosto mrežo ombrometrov. Seveda lahko metodo umerimo na enem radarju in prenesemo na drugega. Pri tem pa je bistvenega pomena, da oba radarja merita pri enakem elevacijskem kotu in z enako širokim snopom, pa tudi reliefa obeh območij naj bi bila kolikor toliko podobna.

Samo malo slabše kot ombrometrski faktorji se odreže umeritvena tabela. Metoda omogoča doseganje korelacije 0.62 s talnimi izmerki. Umeritvena tabela ni nič drugega kot prikrita uporaba ombrometrskih faktorjev. Razlika med obema metodama je v tem, da so faktorji v enem primeru funkcija časa in prostora, v drugem pa funkcija premera in višine snopa. Kljub temu, da je umeritvena tabela malo manj natančna od ombrometrskih faktorjev, pa ima pred njimi veliko prednost: je namreč dobro prenosljiva od enega radarja do drugega. Vseeno je, s kako širokim snopom in pri kakšnem elevacijskem kotu meri radar; tabela to že upošteva.

Enako natančna kot umeritvana tabela je tudi metoda z vertikalno ekstrapolacijo odbojnosti. Vendar se ta metoda od vseh drugih odlikuje po tem, da poskuša upoštevati vzroke za radarske napake in ne le korigirati končnih izmerkov. Metoda je tudi zelo fleksibilna, prenosljiva in lahka za implementacijo. V raziskavi je bila uporabljena le njena zelo poenostavljena varianta in gotovo se jo da še izboljšati. Najvažnejši podatek, ki ga za uporabo potrebujemo, je višina pasu taljenja padavin. To višino lahko določimo posredno iz radiosondno izmerjene temperature ali neposredno iz radarskih meritev samih. Zelo primerno bi bilo merjenje z vertikalno usmerjeno anteno, kadar je seveda kaj padavin nad radarjem, saj je pri takem merjenju vertikalna ločljivost največja.

Naslednji po natančnosti sta metodi, ki temeljita na umerjeni linearni regresiji oziroma na nelinearni nevronske mreži. Obe metodi pravzaprav opisujeta umeritveno tabelo v funkcijski obliki. Pričakovali bi, da bo pri tem nelinearna regresija boljša, saj vključuje linearno kot posebni primer, vendar se kaže drugače. Razlogi za to so bili že navedeni in se nanašajo na neoptimalno izbiro učne množice za kalibracijo mreže. Korelacijska koeficienta med talnimi in radarskimi izmerki imata vrednost 0.60 in 0.59.

Najslabša je – po pričakovanju – osnovna metoda, ki je bila pravzaprav uporabljena izven območja svoje veljavnosti. To se seveda pozna na rezultatih. V neoptimalnih pogojih merjenja doseže korelacijski koeficient med talnimi in radarskimi izmerki le vrednost 0.49.

Zapisane kvantitativne ocene za uspešnost posameznih metod veljajo le za radar, ki meri pod približno enakimi pogoji, kot radar CSIM. Služijo pa lahko tudi kot kvalitativna informacija pri odločanju, katero metodo izbrati pri danih merilnih pogojih. Iz povedanega izhaja, da je za merjenje v neoptimalnih pogojih nad območjem, kjer je na razpolago gosta mreža ombrometrov, najprimernejša metoda z ombrometrskimi faktorji. Tam pa, kjer ni ombrometrov ali jih je malo, je najboljša metoda z vertikalno ekstrapolacijo padavinskih polj.

## Zaključki

V magistrskem delu je analizirano sočasno merjenje padavin s konvencionalnim vremenskim radarjem in s talno mrežo ombrometrov. Meritve so bile opravljene z radarjem CSIM v Teolu pri Padovi in z 80 ombrometri v radiju 120 km okrog njega. Zbranih in obdelanih je bilo preko 6000 ur izmerkov nad ravnino in gorami ter v vseh letnih časih razen zime. Radarske meritve so potekale pri elevacijskem kotu  $1.5^\circ$  s snopom širine  $1^\circ$  in so zajele vse glavne tipe padavin: stratiformne, konvektivne in mešane. Ugotovljeno je bilo naslednje.

Logaritemsko razmerje med radarskim in ombrometrskim izmerkom padavin – radarska napaka – je sistematično odvisno predvsem od lege radarskega snopa glede na pas taljenja padavin in od premera snopa, deloma pa tudi od reliefa. V optimalnih merilnih pogojih (premer snopa pod 0.5 km, snop pod pasom taljenja in blizu tal) znaša povprečna urna lokalna napaka 0 dB, disperzija napak pa dosega vrednost 2.5 dB. Radar torej v povprečju izmeri ravno toliko padavin kot ombrometri na tleh. Vendar pa se posamezni urni radarski izmerki razlikujejo od ombrometrskih tipično za faktor 1.8, to je, radarski izmerek leži med 1.8 in  $1/1.8$  ustreznega ombrometrskega izmerka v  $2/3$  primerov.

V neoptimalnih pogojih merjenja se pojavijo sistematične precenitve in podcenitve. Meritve v pasu taljenja so obremenjene s povprečnimi lokalnimi napakami med 0 in 3 dB, meritve nad njim pa z napakami med 0 in  $-6$  dB. V prvem primeru torej radar sistematično preceni padavine do faktorja 2, v drugem pa jih podceni do faktorja 4. Možne so sicer še večje precenitve in podcenitve, vendar se pri uporabljeni geometriji merjenja niso pojavile. Lokalne disperzije napak se v neoptimalnih pogojih gibljejo med 3 in 5 dB, kar pomeni, da se posamezni radarski in ombrometrski izmerki med seboj razlikujejo povprečno za faktor 2–3. Meritve v goratem območju so manj natančne od meritev v ravnini. Odvisnost radarske napake od premera in višine snopa se pri merjenju s poševno navzgor usmerjenim snopom kaže kot odvisnost od razdalje: pri srednjih razdaljah (50 km) so vidne precenitve in pri velikih razdaljah (100 km) podcenitve. Povprečna napaka nad vsem območjem znaša 0.1 dB (faktor 1.0), disperzija napak pa 4.4 dB (faktor 2.8). Vse opažene napake so dobro pojasnjene z izmerjenimi vertikalnimi profili odbojnosti.

Radarske napake pri merjenju v neoptimalnih pogojih je mogoče zmanjšati z uporabo primernih korekcijskih metod. V raziskavi je predstavljenih in preverjenih pet metod, temelječih na ombrometrskih faktorjih, umeritveni tabeli, linearni regresiji, nevronske mreži in vertikalni ekstrapolaciji odbojnosti. Vse metode občutno zmanjšajo povprečne radarske napake. Lokalne disperzije napak se pri tem ne spremenijo znatno. Najbolj učinkovita je metoda z regionalnimi sezonskimi ombrometrskimi faktorji: povprečne lokalne napake uspe povsod zmanjšati na vrednosti pod 1 dB (faktor 1.25). Disperzija napak nad celotnim območjem se pri tem skrči na 3.5 dB (faktor 2.2). Žal pa je metoda uporabna le v primeru, ko

je na razpolago dovolj gosta mreža talnih ombrometrov za umerjanje; takrat pa je majhna tudi potreba po radarju kot merilniku padavin. Samo malo manj natančna je vertikalna ekstrapolacija padavinskih polj s parametriziranimi profili odbojnosti. Metoda zmanjša precejitve v pasu taljenja na 1 dB in podcenitve nad njim na  $-1$  dB ter skrči celotno disperzijo napak na 3.6 dB (faktor 2.3). Pri kratkih razdaljah je metoda manj učinkovita, saj je dokaj občutljiva na nenatančnosti v višini pasu taljenja. Velika prednost metode pa je, da za svojo kalibracijo skoraj ne potrebuje ombrometrskih izmerkov. Je tudi fizikalno dobro utemeljena ter preprosta za praktično uporabo v realnem času. Zato je od vseh petih preizkušanih metod najboljša izbira za operativno uporabo.

Brez korekcij izmerkov je torej radar kot merilnik padavin uporaben le v omejenih pogojih. Na srednjih zemljepisnih širinah in v topli polovici leta so ti pogoji lahko – ni pa nujno – izpolnjeni pri razdaljah do največ 100 km od tipičnega vremenskega radarja. Mnogokrat je ta razdalja še precej krajša. Z uporabo katerekoli izmed prikazanih korekcijskih metod se uporabni doseg radarja precej poveča. Raziskava kaže, da lahko pri meritvah pri elevacijskih kotih do  $1^\circ$  in s snopom širine do  $1^\circ$  povečamo uporabni doseg vremenskega radarja približno na 150 km. S tem se uporabna merilna površina podvoji in število radarjev, ki naj bi merili padavine nad večjim območjem, se lahko ustrezno zmanjša.

# Dodatek

## A. Logaritemska razmerja količin

V radarski meteorologiji pogosto uporabljamo logaritemska razmerja količin. Takšna razmerja se uporabljajo tudi drugod, na primer v akustiki (glasnost zvoka) in v elektroniki (ojačenje/dušenje signalov). Dodatek A je namenjen definiciji logaritemskih razmerij in kratki diskusiji o njihovi uporabi.

Za zgled vzemimo ojačevalnik moči. Na vhodu ojačevalnika naj bo električni signal z močjo  $P_1$ , na izhodu pa signal z močjo  $P_2$ . Razmerje

$$A = \frac{P_2}{P_1}$$

podaja relativno velikost enega signala glede na drugega. Zavzema lahko vrednosti s širokega intervala preko več redov velikosti. Interval zožimo, če uvedemo logaritemsko razmerje

$$A' = 10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log A.$$

Razmerje  $A'$  je brez dimenzije in ima enoto 1. Poimenujemo jo s posebnim imenom: deci-Bell ali krajše dB. Ime naj bi spominjalo na to, da ima označevana količina  $A'$  obliko logaritemskega razmerja dveh količin.

Relativno velikost dveh signalov  $P_1$  in  $P_2$  lahko enakovredno podamo s katerokoli izmed količin  $A$  ali  $A'$ . To sta dve različni količini in vsaka ima svojo oznako. Zaradi krajšega izražanja pa ponavadi obe količini poimenujemo kar z istim imenom: ojačenje. Na logaritemsko ojačenje opozarja prisotnost enote dB. Tako imajo isti pomen naslednji zapisi:  $A = 10^3$ ,  $A' = 30$  dB in "ojačenje znaša 30 dB" oziroma simbolično  $A \hat{=} 30$  dB.

Moč signala, vhodnega ali izhodnega, podajamo v ustreznih enotah, na primer v miliwattih. Drugače povedano: moč  $P$  signala podajamo relativno glede na izbrano enoto  $P_0 = 1$  mW. Podobno kot zgoraj definiramo

$$P' = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

in s tem vpeljemo novo količino, ki je brezdimenzijska in ima enoto 1. Enoto poimenujemo s posebnim imenom: dBm. Ime naj bi spominjalo na to, da je označevana količina logaritemsko razmerje moči relativno na normirno vrednost 1 mW.

Moč signala lahko enakovredno podamo s katerokoli izmed količin  $P$  in  $P'$ . To sta dve različni količini in vsaka ima svojo oznako, vendar ju ponavadi poimenujemo kar z istim imenom: moč signala. Na katero moč mislimo, navadno ali logaritemsko, pa pove prisotnost ali odsotnost enote dBm. Kot ekvivalentni veljajo

torej naslednji zapisi:  $P = 1 \text{ W}$ ,  $P' = 30 \text{ dBm}$  in "moč znaša 30 dBm" oziroma simbolično  $P \hat{=} 30 \text{ dBm}$ .

Logaritemsko razmerje dveh količin se je najprej pojavilo pri definiciji glasnosti zvoka preko njegove moči na ploskovno enoto. Od takrat tudi izvira ime enote, Bell. Nato so postopno sledile razširitve uporabe na druge količine: v elektroniki na ojačenje in dušenje električnih signalov, v radarski meteorologiji pa na odbojnost, jakost in količino padavin. V vsakem primeru srečamo enoto dB, ki označuje logaritemsko razmerje dveh istovrstnih količin, in enoto dB $x$ , v kateri je  $x$  mnemonična oznaka za specifično referentno vrednost.

## B. Ombrometrske postaje

Tabela B.1. Ombrometrske postaje CSIM. Zemljepisna širina  $\theta$  in dolžina  $\phi$ , nadmorska višina  $h_g$ , azimut  $\alpha$  in oddaljenost  $s$  glede na radar, nadmorska višina osi radarskega snopa  $h$ , premer snopa  $D$ .

N	Ime	$\theta$ ( $^{\circ}$ ' ")	$\phi$ ( $^{\circ}$ ' ")	$h_g$ (km)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	$s$ (km)	$h$ (km)	$D$ (km)
1	GU	45 06 10	11 34 53	0.00	194.1	29.8	1.3	0.6
2	CO	45 05 38	11 43 20	0.00	172.7	30.1	1.3	0.6
3	SL	45 01 51	11 34 38	0.00	191.6	37.6	1.5	0.7
4	VG	45 37 57	11 18 30	0.23	316.6	41.3	1.7	0.8
5	EL	44 59 30	11 31 51	0.00	195.2	42.7	1.7	0.8
6	CF	45 41 45	11 56 53	0.04	29.9	42.7	1.7	0.8
7	CS	45 37 19	11 13 29	0.38	309.6	45.3	1.8	0.9
8	ME	45 28 42	12 15 17	0.03	74.0	47.1	1.8	0.0
9	TC	45 28 41	11 00 27	0.32	284.1	53.5	2.0	1.0
10	TU	45 42 04	11 11 01	0.71	314.8	53.5	2.0	1.0
11	PE	45 50 45	11 22 06	0.31	336.3	58.7	2.2	1.1
12	RO	45 05 48	12 19 38	0.00	119.8	59.1	2.2	1.1
13	MR	45 53 12	11 17 40	1.42	333.3	65.2	2.4	1.2
14	BN	45 55 39	11 24 37	1.99	342.0	66.0	2.5	1.3
15	PR	44 56 38	12 23 23	0.00	129.4	72.9	2.7	1.4
16	FL	45 57 24	12 07 05	0.26	27.5	74.4	2.7	1.4
17	MA	46 02 00	11 49 40	1.41	9.1	75.4	2.8	1.4
18	FO	46 02 43	11 53 58	0.39	12.9	77.8	2.9	1.5
19	VR	45 36 27	10 44 10	0.32	290.8	77.9	2.9	1.5
20	ST	46 02 57	12 09 18	0.54	25.9	84.9	3.1	1.6
21	SO	46 08 29	12 04 14	0.52	19.4	91.8	3.4	1.7
22	TO	46 09 09	12 21 53	0.60	31.2	102.8	3.8	2.0
23	MD	46 07 14	12 26 23	1.18	34.9	103.0	3.8	2.0
24	AG	46 16 39	12 01 59	0.58	15.2	105.3	3.9	2.0
25	GA	46 18 48	11 53 01	1.36	8.7	106.8	3.9	2.0
26	LG	46 15 45	12 18 11	0.49	25.8	111.2	4.1	2.1
27	SP	46 22 14	11 52 56	1.32	8.1	113.1	4.2	2.1
28	CZ	46 20 50	12 11 05	0.88	19.7	116.3	4.3	2.2
29	VF	45 22 24	10 49 59	–	271.3	65.6	2.4	1.2
30	LN	45 23 33	11 22 31	–	278.2	23.5	1.1	0.4
31	MO	45 15 00	11 28 10	–	231.9	20.3	1.0	0.4
32	IT	45 39 12	11 47 06	–	15.0	33.4	1.4	0.6
33	LE	45 21 08	11 57 01	–	93.0	21.6	1.1	0.4
34	RL	45 04 09	12 15 49	–	125.0	56.5	2.1	1.1
35	CB	45 02 08	11 19 37	–	216.9	45.4	1.8	0.9
36	VS	45 04 17	11 55 12	–	149.1	37.7	1.5	0.7
37	AD	45 00 58	12 00 38	–	145.5	46.7	1.8	0.9
38	FU	44 56 42	11 37 30	–	184.7	46.6	1.8	0.9
39	BD	45 31 11	10 45 55	–	284.2	72.9	2.7	1.4
40	DE	45 36 05	10 50 57	–	292.7	69.4	2.6	1.3

Tabela B.2. Ombrometerske postaje CSIM. Zemljepisna širina  $\theta$  in dolžina  $\phi$ , nadmorska višina  $h_g$ , azimut  $\alpha$  in oddaljenost  $s$  glede na radar, nadmorska višina osi radarskega snopa  $h$ , premer snopa  $D$ .

N	Ime	$\theta$ (° ' ")	$\phi$ (° ' ")	$h_g$ (km)	$\alpha$ (°)	$s$ (km)	$h$ (km)	$D$ (km)
41	AC	45 22 39	11 17 25	–	273.3	30.0	1.3	0.6
42	SC	45 30 37	10 53 19	–	285.3	63.3	2.4	1.2
43	IL	45 27 38	11 11 08	–	286.1	39.6	1.6	0.8
44	GZ	45 30 41	11 01 57	–	288.5	52.6	2.0	1.0
45	CG	45 27 18	10 46 20	–	278.6	71.0	2.6	1.3
46	MH	45 28 17	11 17 00	–	291.8	32.7	1.4	0.6
47	ML	45 39 33	11 26 33	–	331.4	37.5	1.5	0.7
48	RA	45 42 06	11 46 41	–	12.1	38.5	1.6	0.7
49	BB	45 23 53	11 34 07	–	295.6	9.1	0.7	0.2
50	BO	45 28 20	11 28 40	–	308.6	19.5	1.0	0.4
51	MT	45 26 58	11 39 51	–	355.6	9.6	0.7	0.2
52	NV	45 15 52	11 34 06	–	217.0	13.7	0.8	0.3
53	QU	45 34 13	11 37 53	–	351.9	23.3	1.1	0.4
54	PU	45 44 45	12 46 20	–	63.1	95.4	3.5	1.8
55	IE	45 27 35	12 29 29	–	80.1	64.7	2.4	1.2
56	NP	45 40 19	12 34 59	–	63.8	78.7	2.9	1.5
57	ER	45 35 46	12 43 02	–	71.9	85.3	3.1	1.6
58	FT	45 46 22	12 54 20	–	64.1	106.0	3.9	2.0
59	L3	45 43 44	12 56 00	–	67.0	106.1	3.9	2.0
60	MM	45 25 59	12 06 36	–	76.9	34.9	1.5	0.7
61	CH	45 09 43	12 18 32	–	114.0	54.4	2.1	1.0
62	AA	45 09 05	11 56 54	–	137.5	31.8	1.4	0.6
63	LD	45 07 56	11 26 26	–	215.5	31.4	1.4	0.6
64	GG	45 18 10	11 43 50	–	146.3	8.0	0.7	0.2
65	DV	45 15 54	12 06 19	–	107.7	35.4	1.5	0.7
66	VM	45 15 21	11 49 48	–	134.1	17.0	0.9	0.3
67	GT	45 35 56	11 45 04	–	12.9	26.9	1.2	0.5
68	CM	45 29 48	11 54 50	–	51.5	23.9	1.1	0.5
69	ES	45 14 34	11 38 57	–	188.2	13.5	0.8	0.3
70	VO	45 46 57	12 06 44	–	36.0	57.8	2.2	1.1
71	ZB	45 35 34	12 10 13	–	56.4	46.3	1.8	0.9
72	VA	45 49 37	12 21 55	–	46.0	74.5	2.7	1.4
73	GR	45 53 28	12 29 24	–	46.9	86.4	3.2	1.6
74	RC	45 38 28	12 23 53	–	61.0	64.3	2.4	1.2
75	VB	45 45 02	12 14 07	–	45.2	61.3	2.3	1.2
76	VN	45 52 59	12 00 24	–	24.0	63.3	2.4	1.2
77	FS	45 54 09	12 06 15	–	29.0	68.6	2.5	1.3
78	OD	45 45 48	12 31 27	–	55.8	79.7	2.9	1.5
79	MS	45 46 47	11 56 37	–	24.3	50.8	2.0	1.0
80	BP	45 43 09	12 20 12	–	52.3	65.0	2.4	1.2

## Literatura

### *Fizika in meteorologija*

- [1] Hočevar, A., in Z. Petkovšek: *Meteorologija*. Partizanska knjiga, Ljubljana, 1984.
- [2] Landau, L. D., und E. M. Lifschitz: *Lehrbuch der theoretischen Physik*. Band 1–10. Akademie-Verlag, Berlin, 1980.
- [3] Petterssen, S.: *Weather analysis and forecasting*. Band 1–2. McGraw-Hill, 1956.
- [4] Pohl, R. W.: *Einführung in die Physik*. Band 1–3. Springer Verlag, Berlin, 1969.
- [5] Rogers, K. K., and M. K. Yau: *A short course in cloud physics*. Pergamon Press, 1989.

### *Radarska meteorologija in radarska tehnika*

- [6] Atlas, D.: *Radar in meteorology*. American Met. Society, Boston, 1990.
- [7] Battan, L. J.: *Radar observation of the atmosphere*. University of Chicago Press, 1973.
- [8] Budin, J.: *Poglavja iz teorije anten*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, 1991.
- [9] Doviak, R. J., and D. Zrnica: *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, 1993.
- [10] Newsome, D. H.: *Weather radar networking*. COST-73 Project, Final Report. Kluwer Academic Publisher, London, 1992.
- [11] Skolnik, M. I.: *Radar handbook*. McGraw-Hill, 1970.

### *Radarsko merjenje padavin*

- [12] Andrieu, H., and J. D. Creutin: Effect of the vertical profile of reflectivity on the rain rate assessment at ground level. *25th Radar Met. Conf.*, AMS, Boston, 1991, 832–835.
- [13] Austin, P. M.: Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, 115, 1053–1070.
- [14] Brandes, E. A.: Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. *J. Appl. Met.*, 1975, 14, 1339–1345.
- [15] Brown, R., et al.: Range and orographic corrections for use in real-time data analysis. *1st Conf. on Hydrolog. Appl. of Weather Radar*. Cluckie, I. D., and C. G. Collier (Ed.), Ellis Horwood Ltd, UK, 1991, 219–228.
- [16] Cappellini, V., et al.: Neural algorithms for weather radar data processing. *COST-75 Seminar on Advanced Weather Radar Systems*, CEC, Brussels, 1994, 208–219.



- [17] Collier, C. G., et al.: A weather radar correction procedure for real-time estimation of surface rainfall. *Q. J. R. Met. Soc.*, 1983, 109, 589–608.
- [18] Divjak, M.: Operational radar measurement of precipitation: The accuracy of point estimates of hourly accumulations. *2nd Conf. on Hydrolog. Appl. of Weather Radar*. Verworn (Ed.), Hannover, Germany, 1992, A3.
- [19] Divjak, M.: Ground rainfall estimations from radar measurements aloft. *3rd Conf. on Hydrolog. Appl. of Weather Radar*, Braga, B. P. F. (Ed.), Sao Paulo, Brazil, 1995, 300–308.
- [20] Doviak, R. J.: A survey of radar rain measurement techniques. *J. Clim. Appl. Met.*, 1983, 22, 832–849.
- [21] Fabry, F.: Vertical profiles of reflectivity and precipitation intensity. *3rd Conf. on Hydrolog. Appl. of Weather Radar*, Braga, B. P. F. (Ed.), Sao Paulo, Brazil, 1995, 344–350.
- [22] Fabry, F., et al.: The accuracy of rainfall estimates by radar as a function of range. *Q. J. R. Met. Soc.*, 1992, 118, 435–453.
- [23] Harrold, T. W., et al.: The accuracy of radar-derived rainfall measurements in hilly terrain. *Q. J. R. Met. Soc.*, 1974, 100, 331–350.
- [24] Joss, J., and G. Galli: Digital radar information in the Swiss Meteorological Institute. *20th Radar Met. Conf.*, AMS, Boston, 1981, 29A.
- [25] Joss, J., and R. Lee: The application of radar-gauge comparisons to operational precipitation profile corrections. *J. Appl. Met.*, 1995, 34, 2612–2630.
- [26] Joss, J., and A. Pittini: The climatology of vertical profiles of radar reflectivity to improve estimates of precipitation. *25th Radar Met. Conf.*, AMS, Boston, 1991, 828–831.
- [27] Joss, J., et al.: The accuracy of daily rainfall measurements by radar. *13th Radar Met. Conf.*, AMS, Montreal, 1986, 448–451.
- [28] Kitchen, M.: Estimation of surface precipitation rate from radar using a variational method. *COST-75 Seminar on Weather Radar Systems*, Collier, C. G. (Ed.), CEC, Brussels, 1995, 228–238.
- [29] Koistinen, J.: The effect of some measurement errors on radar-derived Ze-R relationships. *23th Radar Met. Conf.*, AMS, Boston, 1986, JP50–53.
- [30] Koistinen, J.: Operational correction of radar precipitation errors due to the vertical reflectivity profile. *2nd Conf. on Hydrolog. Appl. of Weather Radar*, Hannover, 1992, K1.
- [31] Koistinen, J., and T. Puhakka: Can we calibrate radar by raingauges? *22nd Radar Met. Conf.*, AMS, Boston, 1984, 263–267.
- [32] Probert-Jones, J. R.: The radar equation in meteorology. *Q. J. R. Met. Soc.*, 1962, 88, 485–495.
- [33] Rakovec, J.: Vertical radar reflectivity profiles in Slovenia. *Poslano J. Clim. Appl. Met.*, 1995.
- [34] Waldvogel, A., et al.: Criteria for the detection of hail cells. *J. Appl. Met.*, 1979, 18, 1521–1525.
- [35] Wilson, J. W.: Integration of radar and raingage data for improved rainfall measurement. *J. Appl. Met.*, 1970, 9, 489–497.

- [36] Wilson, J. W., and E. A. Brandes: Radar measurement of rainfall – a summary. *Bul. Am. Met. Soc.*, 1979, 60, 9, 1048–1058.

*Talno in letalsko merjenje padavin*

- [37] Gunn, K. L. S., and J. S. Marshall: The distribution with size of aggregate snowflakes. *J. Meteor.*, 1958, 16, 452–461.
- [38] Gunn, R., and G. D. Kinzer: The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Meteor.*, 1949, 6, 243–248.
- [39] Hobbs, P. V., and A. L. Rangno: Ice particle concentrations in clouds. *J. Atmos. Sci.*, 1985, 42, 2523–2549.
- [40] Huff, F. A.: Sampling errors in measurement of mean precipitation. *J. Appl. Met.*, 1970, 9, 35–44.
- [41] Marshall, J. S., and W. Palmer: The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 1948, 5, 165–166.
- [42] Spahn, J. F., and P. L. Smith Jr.: Some characteristics of hailstone size distributions inside hailstorms. *17th Radar Met. Conf.*, AMS, Seattle, 1976, 187–191.
- [43] Stewart, R. E., et al.: Characteristics through the melting layer of stratiform clouds. *J. Atmos. Sci.*, 1984, 41, 3227–3237.