

Kalibracija vremenskega radarja s kroglo

Marjan Divjak

Povzetek

S C-pasovnim vremenskim radarjem na Lisci smo izmerili ekvivalentno radarsko odbojnost kovinske krogle s premerom 30 cm pri oddaljenosti 13 km. Krogla je bila dvignjena v zrak s privezanim helijevim balonom. Meritve so potekale sektorsko z ločljivostjo 0.5° po azimutu in 0.2° po elevaciji. Opravljenih je bilo 50 sektorskih meritev pri petih različnih legah balona. Iz vsake sektorske meritve je bil izvlečen maksimum odbojnosti od krogle. Maksimum teh maksimumov je znašal 30.0 dBZ, kar je za 1.3 dBZ več od vrednosti, ki jo napoveduje teorija. Razlikovanje med obema vrednostima je majhno in v okviru sprejemljive napake. Lahko ga odpravimo, če zmanjšamo uporabljano radarsko konstanto za 1.3 dB.

Uvod

Ko vremenski radar izmeri oddaljenost r in povprečno moč P_r odmeva, njegov računalnik iz obojega izračuna ekvivalentno odbojnost Z_e ovire po enačbi $Z_e = CP_r r^2$. Pri tem je C radarska konstanta, ki je znana funkcija radarskih in snovnih parametrov, med drugim sevalne moči, valovne dolžine in dielektričnosti vode. Radarjevemu računalniku moramo vrednost konstante vnaprej povedati, da potem z njo računa. Kako pa določimo vrednost konstante? Izračunamo jo iz njene znane funkcijske odvisnosti od merodajnih parametrov.

Če radarskih parametrov ne poznamo dovolj natančno, je lahko iz njih izračunana konstanta C bolj ali manj napačna. Kako dobra je, preverimo tako, da z njeno pomočjo izmerimo odbojnost take ovire, za katero lahko ekvivalentno odbojnost Z_e tudi neodvisno določimo. Če se obe vrednosti ujemata, je uporabljena konstanta pravilna, sicer pa jo je potrebno ustrezno prilagoditi.

V tehničnem poročilu je najprej podana teoretična osnova, kako preveriti in po potrebi prilagoditi radarsko konstanto za vremenski radarski sistem na Lisci, in sicer z meritvijo krogle, obešene na balonu. Sledijo opis dejanskih meritev, predstavitev rezultatov in prilagoditev konstante.

I. Teoretična osnova kalibracije

A. Odboj od točkaste ovire

Za točkasto oviro v osi radarskega snopa in pri zanemarljivem dušenju v atmosferi velja naslednja radarska enačba [2]:

$$P_r = \frac{1}{A} \frac{\sigma}{r^4} \tag{1}$$

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{64\pi^3} \frac{P_t G^2 \lambda^2}{L^2}.$$

Oznake pomenijo naslednje: P_r je prejeta moč odmeva na vhodu v sprejemnik, σ odbojni presek ovire, r oddaljenost ovire, A radarska konstanta za merjenje točkastih ovir, P_t vršna moč impulza na izhodu iz oddajnika, G ojačanje antene, λ valovna dolžina in L enostranske izgube v valovodu in kupoli.

B. Odbojni presek razsežne krogle

Najpreprostejše ovire z znanim odbojnim presekom so naslednja prevodna telesa: krogla, tristranični ogel in pravokotna plošča. Odbojni presek krogle je neodvisen od njene usmeritve. To velja tudi za tristranični ogel, dokler je le obsevan s sprednje, odprte strani. Odbojni presek plošče pa je močno odvisen od njene usmeritve. Zaradi naštetega je za kalibracijo z balonom primerna edinole krogla.

Krogla premera d , pri čemer je njen obseg veliko večji od radarjeve valovne dolžine (vsaj 10-krat), ima odbojni presek kar enak svojemu geometrijskemu preseku [1]:

$$\sigma = \frac{\pi}{4} d^2. \quad (2)$$

C. Odboj od prostorskih sipalcev

Za enakomerno prostorsko porazdeljene padavine po radarskem impulzu in pri zanemarljivem dušenju v atmosferi velja naslednja radarska enačba [2]:

$$P_r = \frac{1}{C} \frac{Z_e}{r^2}$$
$$\frac{1}{C} = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \frac{P_t G^2 \theta^2 c \tau}{\lambda^2 L^2} \frac{|K|^2 Z_e}{r^2}. \quad (3)$$

Oznake pomenijo naslednje: P_r je povprečna prejeta moč na vhodu v sprejemnik, r oddaljenost prostorske ovire, Z_e ekvivalentna radarska odbojnost ovire, C radarska konstanta za merjenje prostorskih ovir, P_t vršna moč impulza na izhodu iz oddajnika, G ojačanje antene, θ širina snopa, $c\tau$ dolžina impulza, λ valovna dolžina, $|K|^2$ "vodna" konstanta in L enostranske izgube v valovodu in kupoli.

V praksi se uporablja logaritemska oblika zapisane enačbe:

$$10 \log \frac{Z_e}{Z_0} = 10 \log \frac{C}{C_0} + 10 \log \frac{P_r}{P_0} + 20 \log \frac{r}{r_0}$$

oziroma na kratko

$$\mathbf{Z_e = C + P_r + 20 \log \frac{r}{r_0}}.$$

Pri tem so normirne konstante naslednje: $r_0 = 1$ km, $P_0 = 1$ mW, $Z_0 = 1$ mm⁶/m³ in $C_0 = Z_0 / r_0^2 P_0$. Argumenti logaritmov so, kot je treba, brezdimenzijski. Logaritemske količine imajo tradicionalno enoto dB; pri nekaterih je zraven dopisana še oznaka, ki pove, na kaj so količine normirane: odbojnost dBZ (normirana na 1 mm⁶/m³) in moč dBm (normirana na 1 mW).

D. Princip kalibracije s kroglo

Princip kalibracije s kroglo je naslednji. Os radarskega snopa usmerimo na oddaljeno kroglo. Radar izmeri moč odmeva in po enačbi (3) določi ekvivalentno odbojnost ovire. Če bi radar meril po enačbi (1), bi izmeril seveda enako močan odboj in iz njega določil odbojni presek ovire. Izenačitev prejetih moči iz (1) in (3) pokaže, kakšna je ekvivalentna odbojnost Z_e krogle z odbojnim presekom σ :

$$Z_e = \frac{2 \ln 2}{\pi^5} \frac{\lambda^4}{|K|^2} \frac{\sigma}{(\pi/8) c \tau \theta^2 r^2}. \quad (4)$$

Če je delovna konstanta (tista, s katero računa radarjev računalnik) C pravilna, bi moral radar za kroglo z znanim presekom σ izmeriti natanko tako ekvivalentno odbojnost Z_e , kot jo napoveduje enačba (4). Če izmeri premajhno ekvivalentno odbojnost, je konstanta premajhna in jo je potrebno ustrezno povečati. Seveda velja tudi nasprotno.

Pri merjenju odmevov od oddaljene krogle je potrebno zagotoviti, da ni neželenih odmevov od drugih ovir pri isti razdalji. To v praksi najboljše dosežemo tako, da kroglo dvignemo s (privezanim) balonom na primerno višino nad tlemi.

II. Merilna oprema in meritve

A. Izbira krogle

Valovna dolžina C-pasovnega radarja na Lisci znaša $\lambda = 5.3$ cm, zato mora imeti kalibracijska krogla zanj premer $d \geq (10/\pi)\lambda = 15$ cm. Za S-pasovni radar, ki deluje pri dvakrat daljši valovni dolžini, bi bila potrebna dvakrat večja krogla. Kljub temu, da je radar na Lisci C-pasovni, smo se odločili za nabavo večje krogle. Razlog je bil deloma v tem, da je možno kroglo uporabiti tudi za kalibracijo S-pasovnih radarjev in deloma v večjem odboju take krogle. Krogla z dvakrat večjim premerom ima namreč štirikrat večji odboj, oziroma odboj, večji za $10 \log 4 = 6$ dB. Izbrali smo kroglo proizvajalca Trimillennium Corporation z naslednjimi karakteristikami:

Tabela 1: Kalibracijska krogla.

Parameter	Vrednost
Material	aluminijaska zlitina
Premer	30.5 +−0.1 cm
Masa	910 g
Odbojni presek	0.073 m ²

Premer in maso krogle smo izmerili še neodvisno od proizvajalca in dobili enake rezultate. Tudi po enačbi (2) izračunani odbojni presek je enak proizvajalčevi vrednosti.

V dveh diametralno nasprotnih točkah smo v kroglo izvrtali dve luknjici premera 3 mm. Tako je krogla pripravljena, da lahko skozi njeno potegnemo najlonsko vrstico in kroglo na njej učvrstimo z vozlo ali objemkama na vsaki strani. Zgornji konec vrstice potem služi za pritrditev na balon, spodnji pa za privez na tla.

B. Izbira balona

Najprimernejši balon za dvig krogle je primerno velik radiosondažni balon iz lateksa, polnjen s helijem. Vodik ni primeren zaradi lahke vnetljivosti. Vzgon F_{lift} parcele helija s prostornino V in gostoto ρ_{He} v zraku z gostoto ρ znaša

$$F_{\text{lift}} = g(\rho - \rho_{\text{He}})V,$$

pri čemer je g težni pospešek. Pri standardnih pogojih (zračnem tlaku 1 atm in temperaturi 20° C) znaša gostota zraka 1.2 kg/m³ in gostota helija 0.2 kg/m³. To pomeni, da na vsak kubični meter helija deluje vzgon 1 kp.

Balon helija je v ravnovesju, ko je vzgon helija enak teži celotnega nanj obešenega tovora, vključno s težo balona samega. S tem je določena maksimalna teža F_{payload} celotnega tovora, ki ga dana količina helija lahko dvigne:

$$F_{\text{payload}} \leq F_{\text{lift}}.$$

Če je tovor lažji od vzgona, se balon začne dvigati. Pri tem čuti upor, ki narašča s hitrostjo. Dviguje se čedalje hitreje, dokler ne doseže take hitrosti, da je vzgon uravnovešen s težo tovora in uporom. Privezani balon se dvigne, dokler mu dupušča

vrvica. Ko obmiruje, ni navpičen, pač pa ga veter zenese za kot α od navpičnice. Ta kot je odvisen od razmerja treh sil: vzgona F_{lift} navzgor, teže bremena F_{payload} navzdol in horizontalne sile upora F_{drag} :

$$\tan \alpha = \frac{F_{\text{drag}}}{F_{\text{lift}} - F_{\text{payload}}}.$$

Pri toku zraka okrog ovire premera $D \approx 1$ m in hitrosti gibanja $v \approx 1$ m/s v zraku z viskoznostjo $\eta = 1.7 \cdot 10^{-5}$ Ns/m² znaša Reynoldsovo število $Re = vD\rho/\eta \approx 10^5$. Za kroglo je za $Re < 1$ gibanje laminarno in za $Re > 10^3$ turbulentno. Gibanje zraka okrog balona je torej turbulentno. Upor zato znaša

$$F_{\text{drag}} = c_d \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho v^2}{2}.$$

Koeficient upora c_d je odvisen od Reynoldsovega števila. Pri 10^5 znaša okrog 0.2.

Kako velik balon (na vrvici) je najprimernejši za dvig izbrane krogle? Dovolj velik, da dvigne celoten tovor in tudi dovolj velik, da ga horizontalni veter ne zamakne preveč od navpičnice. Upoštevanje zapisanih enačb pokaže, da je za dvig tovora 1.5 kg potrebno okrog 4 m³ helija, oziroma balon premera okrog 2 m, da pri horizontalnem vetru 5 m/s odklon od navpičnice ne preseže 20°.

Za meritve smo izbrali standardni radiosondažni balon mase 0.5 kg, ki se lahko napihne do premera 5 metrov, preden počí, ter industrijsko jeklenko, vsebujočo 5.6 m³ helija (pri standardnih pogojih). Za privez smo izbrali pleteno najlonsko vrvico premera 3 mm, ki zlahka vzdrži natezno silo preko sto kilopondov.

C. Izbira lokacije

Za natančno kalibracijo mora biti krogla primerno oddaljena od radarja. Izpolnjeni morajo biti naslednji pogoji: (i) meritve v daljnem polju, (ii) dovolj velik odmev od krogle in (iii) odsotnost talnih odmevov.

Daljno polje radarja leži pri razdaljah $r > 2D^2/\lambda$, pri čemer je D premer radarske antene in λ njegova valovna dolžina. Za radar na Lisci velja $D = 4.2$ m, zato $r > 0.6$ km. Oddaljenosti pod 1 km torej niso primerne.

Enačba (4) pokaže, da bi moral radar na Lisci zaznati kroglo s premerom 30 cm pri razdalji 10 km kot oviro z ekvivalentno odbojnostjo 31 dBZ. To je vsekakor dovolj velik odmev. Pri 10-krat večji oddaljenosti se odmev zmanjša za 20 dBZ, kar pa že lahko predstavlja probleme pri meritvah. Primerne razdalje se torej sučejo od nekaj kilometrov do nekaj deset kilometrov.

Talnim odmevom se najbolje izognemo tako, da tarčo spustimo izza nižjega hriba, ki prepreči obsevanje tal pod njo. Seveda moramo tarčo dvigniti dovolj visoko nad hrib, da lahko pride v os radarskega snopa.

Pregled možnih lokacij na razdaljah 5-20 km okrog Lisce je pokazal, da je najprimernejša lokacija pri planinski koči pod Bohorjem. Leži v vzhodni smeri od Lisce pri razdalji 13 km in na nadmorski višini 900 m. Tam je velika jasa, ki je v radarski senci. Balon je potrebno dvigniti za višino 100 m, da pogleda preko talnih ovir; optimalna višina dviga znaša 200 m, torej 100 m nad vrhom talnih ovir. Ob zmernem zanašanju balona je zato potrebnih okrog 300 m vrvic. Radar na Lisci ima snop širok 1° in premer snopa nad lokacijo Bohor znaša okrog 200 m.

D. Določitev načina merjenja

Ko radarski impulz dolžine $c\tau$ preleti točkasto oviro, se od nje odbije signal, ki ima enako dolžino kot impulz. Jakost signala je maksimalna, če leži tarča natanko v osi snopa. Radar razseka vrnjeni signal (iz izbrane smeri) na zaporedne dolžinske intervale dr - dolžinske bine. Odvisno od uporabljane dolžine bina se odmev lahko pojavi v enem, dveh ali več zaporednih binih. Za pravilno meritev jakosti je potrebno, da bin ni daljši od polovične dolžine impulza: takrat leži vsaj en bin popolnoma v "notranjosti" signala. Radar na Lisci operativno deluje z impulzi dolžine $c\tau = 240$ m. Za dolžino bina za kalibracijo izberemo 125 m, kar ravno še zadošča. Tako je pričakovati odmeve od tarče v 2-3 zaporednih binih.

Uspeh kalibracije je bistveno odvisen od tega, ali zmoremo os snopa usmeriti natanko na tarčo. Ročno krmiljenje radarske antene in iskanje maksimalnega odmeva je zahtevno, dolgotrajno in ponavadi neuspešno. Na srečo pa sodobna programska oprema omogoča sektorsko merjenje atmosfere: radarska antena se giblje med dvema azimutoma po željenem naboru elevacij. Radar torej meri in shranjuje odmeve zgolj iz izseka atmosfere. Če radar prečesuje izsek dovolj na gosto, se bo os snopa prej ali slej znašla dovolj blizu tarče. Širina snopa RC Lisca znaša 1° (med točkama, kjer pade gostota sevanja za 3 dB glede na maksimalno gostoto vzdolž osi). Pri tolerirani napaki merjenja do -1 dB je torej potrebna meriti s koraki vsaj $1^\circ / 6$ po azimutu in elevaciji. Za ločljivost po elevaciji izberemo 0.2° , kar ravno še zadošča. Za ločljivost po azimutu pa izberemo 0.5° , ker radarski sistem ne dovoljuje manjših vrednosti od 0.35° . Na prvi pogled pri tem toleriramo napako do -3 dB, vendar merjenje po azimutu ne poteka s fiksno usmerjeno, pač pa z gibajočo se anteno; na ta način se učinkovita ločljivost poveča in tolerirana napaka se zmanjša za kakšno polovico ter postane primerljiva z napakami pri elevacijah.

Natančnost lahko še povečamo, če izvedemo več meritev pri različnih legah balona in iz nato vseh meritev določimo maksimum.

Radar RC Lisca upravlja programska oprema IRIS proizvajalca Sigmet. Oprema omogoča napredno obdelavo meteoroloških signalov. Vendar pa je za merjenje krogle nekatere tovrstne obdelave potrebno izključiti: (i) Dopplerjevo izločanje stalnih odmevov, (ii) povprečevanje po dolžinskih binih ter (iii) izločanje izoliranih odmevov po razdalji in azimutu. Za kalibracijo smo izbrali naslednje merilne nastavitve:

Tabela 2: Merilne nastavitve radarja.

Parameter	Vrednost
Scan mode	PPI Sector
Azimuth	80.0-100.0 deg
Resolution	0.5 deg (po azimutu)
Samples	32 (po azimutu)
Scan Speed	Auto (povzroči 1.5 RPM)
Elevation	0.2 0.4 0.6 0.8 ... 2.0 deg
Start Range	10.0 km
Max Range	15.0 km
Bin Spacing	125 m
Range Averaging	None
Filter Doppler	0 (izključen)
Target Detect	OFF
Attenuation	OFF
PntCtl	OFF
Speckle	OFF

E. Izvedba meritev

Meritve smo izvedli dne 8. 10. 2007 med 9 in 12 CET. Vreme je bilo jasno in mirno. Na Lisci so v tem času vladali naslednji pogoji: pritisk 914 mb, temperatura $11-14^\circ$ C,

relativna vlaga 77-60 % in veter jakosti 1-3 m/s iz severovzhodne smeri.

Merili sta dve ekipi, ena na terenu in ena na radarskem centru. Med seboj sta komunicirali preko mobilnih telefonov. Ekipa na terenu je z GPS izmerila geografske koordinate referentne točke, kjer naj bi potekale meritve. Potem je s helijem iz jeklenke napolnila balon, nanj privezala kroglo in oboje – privezano na vrstico – spustila v višino.



Slika 1. Spust balona s kroglo.

Za dvig je bilo uporabljenih okrog 300 metrov vrvice. Radarska ekipa je dvignjeni balon opazila s pomočjo manjšega teleskopa na podstavku in pri 20-kratni povečavi. Balon je bil dobro viden kljub osvetlitvi poševno od zadaj. Lepo se je tudi opazilo, kako ga veter kar precej zanaša sem in tja. Ko je bil balon dvignjen, je radarska ekipa izvedla zaporedje sektorskih meritev. Posamična sektorska meritev je trajala približno 1 minuto. Izmerki – ekvivalentne radarske odbojnosti – so se shranili v ustrezne datoteke. Nato je terenska ekipa nekajkrat spremenila svojo lego in/ali dolžino dvižne vrvice, radarska ekipa pa je vsakokrat izvedla zaporedje sektorskih meritev. Spremembe v dolžini vrvice so znašale 20 metrov, kar približno ustreza polovici merilnega koraka po elevaciji. Spremembe v talni legi pa so bile usmerjene vzdolžno in prečno glede na radar in so znašale 50 metrov, kar približno ustreza polovici merilnega koraka po azimutu in polovici dolžinskega bina. Vsega skupaj je bilo narejenih 50 sektorskih meritev pri 5 različnih nominalnih legah balona. Namen teh variacij je bil v tem, da poskušamo tarčo čim bolje kolocirati s središčem enega izmed radarskih merilnih binov.

Ko so bile meritve s kroglo opravljene, je terenska ekipa potegnila balon na tla, odvezala kroglo in balon spet dvignila. Radarska ekipa je izvedla sektorsko meritev z namenom, določiti odbojnost balona samega. Nazadnje je terenska ekipa potegnila balon na tla, radarska ekipa pa je izmerila še zadnjo sektorsko meritev prazne atmosfere. Pri vsem tem se je pokazalo, da je vleka balona z golimi rokami iz višine nekaj sto metrov na tla kar naporna.

III. Obdelava podatkov in rezultati

A. Obdelava podatkov

Osnovni izmerjeni podatki so bili naslednji: geografska lega Lisce, geografska lega terenske merilne točke in 50 radarskih datotek v specialnem formatu IRIS, vsebujočih ekvivalentne radarske odbojnosti v polarnih koordinatah. Izmerki so bili kvantificirani s korakom 0.5 dBZ.

Geografska lega Lisce znaša 46.068 N, 15.290 E in 950 m a.s.l., merilne točke pa 46.064 N, 15.461 E in 890 m a.s.l. Standardni izračun pokaže, da leži merilna točka glede na Lisco v smeri 91.9° in pri razdalji 13.2 km. Za navpično dvignjeni balon na vrvcici dolžine 300 m tako pričakujemo, da bo viden pri elevaciji okrog 1.0°.

Programska oprema IRIS vključuje pomožni program rays, ki zna čitati datoteke v formatu IRIS in jih izpisati v znakovnem formatu ASCII. Z uporabo tega programa in nekaterih standardnih tekstovnih ukazov v okolju Unix (grep, head, tail in cut) smo iz vsake datoteke izrezali polarno območje velikosti $2 \times 2 \times 1$ km okrog pričakovane lege balona. Potem smo te ASCII datoteke pregledali kar vizuelno, po zaporednih elevacijah, in v njih poiskali odmeve od krogle. To je šlo zlahka: kroglin odmev je v ustrezni elevacijski ravnini rasel iz radarske sence kot skupek 2-3 vzdolžnih in 2-3 prečnih binov z dobro določljivim maksimumom. V vsaki preučevani datoteki se je kroglin odmev raztezal po navpičnici preko več sosednjih elevacijskih ravnin. Na eni imed njih je imel maksimum. To je bil torej iskani merilni bin, katerega center je bil najbližje krogli. Tako smo določili 50 maksimumov, iz vsake datoteke enega. Tabela 3 prikazuje porazdelitev najdenih maksimumov po velikosti.

Tabela 3. Porazdelitev števila maksimumov po velikosti.

Velikost [dBZ]	Število
30.0	2
29.5	2
29.0	0
28.5	4
28.0	3
27.5	9
27.0	7
26.5	12
26.0	7
25.5	3
25.0	0
24.5	1
	50

Maksimum zabeleženih maksimumov je znašal 30.0 dBZ. Taka vrednost je bila izmerjena dvakrat. Takrat sta bila krogla in merilni bin najboljše kolocirana. Večina maksimumov je seveda nižjih: kolokacija takrat ni bila tako dobra. Za predstoječo analizo prideta v poštev obe meritvi, ko je bil dosežen navedeni maksimum. Vendar sta si meritvi med seboj tako podobni, da se bomo zaradi enostavnosti v nadaljevanju omejili le na eno izmed njiju in jo poimenovali optimalna meritev.

B. Rezultati meritev

Optimalna radarska meritev je prikazana z dvema tabelama. Tabela 4 prikazuje polje izmerjene odbojnosti pri konstantni elevaciji 1.2° in sicer med azimutoma 89.0 in 94.0° ter razdaljama 12.5 in 13.5 km. Korak po azimutu znaša 0.5° in korak po razdalji 0.125 km. Tabela vsebuje maksimum 30.0 dBZ, označen z znakom *. Najdemo ga pri azimutu 91.5° in na razdalji 13.1 km, kar se natančno ujema s pričakovanji.

Tabela 4: Radarska odbojnost (dBZ) pri konstantni elevaciji 1.2°, vsebujoči maksimum 30 dBZ. Horizontalno: razdalja med 12.5 in 13.5 km s korakom 1/8 km; vertikalno: azimut med 89.0 in 94.0° s korakom 0.5°.

0.5	-3.5	-5.5	-8.0	-11.0	-5.0	-9.5	-8.5	-9.0
1.5	-3.0	-7.5	-12.0	-7.0	-6.5	-8.0	-11.0	-6.0
1.5	-5.5	-7.0	-7.5	-6.0	-8.0	-12.5	-14.0	-6.5
1.0	1.5	-0.5	-9.5	-5.5	6.5	-7.5	-12.5	-12.0
-7.0	-4.0	-6.5	-5.5	-7.0	18.5	3.0	-13.5	-7.0
-7.5	-7.5	-7.0	-6.0	-2.5	×30.0×	14.5	-10.0	-7.5
-4.5	-5.5	-9.0	-6.5	-5.5	24.5	9.5	-6.5	-5.5
-11.5	-8.0	-7.5	-9.0	-6.5	2.0	-9.5	-9.5	-5.5
-9.5	-3.5	-7.0	-10.5	-6.5	-8.0	-10.5	-6.5	-8.0
-6.5	-8.0	-5.0	-5.5	-8.5	-9.5	-4.5	-7.0	-10.0
-8.0	-9.5	-3.0	-2.0	-9.0	-6.5	-5.0	-2.5	-8.5

Na tabeli 5 je prikazan vertikalni profil odbojnosti skozi maksimum s tabele 4. Odbojnost je prikazana pri elevacijah med 0.2 in 2.0° s korakom po 0.2°.

Tabela 5: Vertikalni profil radarske odbojnosti (dBZ) skozi maksimum 30.0 dBZ. Elevacije v stopinjah.

0.2	6.5
0.4	14.0
0.6	21.0
0.8	24.0
1.0	29.0
1.2	30.0
1.4	28.0
1.6	22.5
1.8	13.5
2.0	2.0

Enačba (4) pove, da bi pri radarsko izmerjeni legi krogle moral idealno kalibrirani radar izmeriti odbojnost krogle 28.7 dBZ. Dejansko je radar izmeril 30.0 dBZ, kar je znotraj tolerirane napake ± 1.5 dBZ.

C. Diskusija rezultatov

Rezultati opravljenih meritev kažejo, da je radar na Lisci dobro kalibriran in nima sistematične napake nad ± 1.5 dBZ. Kljub temu je umestno odgovoriti še na nekaj vprašanj, ki se zastavljajo.

Je izmerjeni maksimum 30.0 dBZ pravilen, prevelik ali premajhen? Glede na to, da je bilo opravljenih 50 meritev pri različnih legah balona in da so bili prostorski koraki prečesavanja zelo gosti, se zdi zelo verjetno, da je uspela maksimalna kolokacija krogle in merilnega bina v dveh meritvah. Zdi se, da "pravi" maksimum nikakor ne more biti manjši od 29.5 dBZ in da je zelo malo verjetno, da je večji od 30.5 dBZ.

Kakšen je doprinos balona k odbojnosti? Pri meritvah smo predpostavili, da je odbojnost od balona in vrvice zanemarljiva v primerjavi s kroglo. Da je res tako, potrjuje tista meritev, ko je bil v zraku zgolj balon sam, brez krogle. Takrat je izmerjeni maksimum znašal 6.5 dBZ. To je za več kot 20 dBZ manj od odboja balona s kroglo in zato zares zanemarljivo.

Kaj če sploh ni bila merjena krogla, pač pa kakšen hrib? Proti tej možnosti govori najprej to, da je zelo malo verjetno, da je prav na mestu, kjer pričakujemo odmev od krogle, hrib, ki povzroča prav tako močan odboj, kot naj bi ga povzročila krogla. Povsem pa smo to možnost izločili s posebno meritvijo brez balona v ozračju. Meritev je pokazala, da z odstranitvijo balona izginejo tudi predhodno beleženi maksimumi in ostane le ozadje z odbojnostmi pod -5 dBZ.

D. Prilagoditev radarske konstante

Razlikovanje med teoretično in dejansko izmerjeno odbojnostjo krogle je manjše od ± 1.5 dBZ in ga smemo za operativne meteorološke potrebe ignorirati. Kljub temu pa smo se odločili, da bomo opaženo razliko odstranili z ustrezno prilagoditvijo radarske konstante.

Od kod bi lahko prišla opažena razlika? Enačba (3) pove, da od nenatančnih vrednosti vršne moči P_t , širine snopa θ , valovne dolžine λ , dolžine impulza τ , ojačanja antene G in dušenja v valovodu in kupoli L . Izmed naštetih parametrov se zdi, da sta najbolj sumljiva ojačanje antene in dušenje. Iz radarja na Lisci je bilo namreč svoj čas odstranjeno polarizacijsko stikalo. Odvisno od tega, ali ga obravnavamo kot del valovoda ali del antene, se je bodisi povečalo ojačanje antene bodisi zmanjšalo dušenje valovoda. V obeh primerih se je ustrezno zmanjšala realna radarska konstanta. Nominalna konstanta je tako postala prevelika in izmerjene odbojnosti prav tako.

Kje in kako torej popraviti konstanto? Z matematičnega vidika je vseeno, ali povečamo ojačanje antene za $(30.0 - 28.7)/2 \approx 0.7$ dB ali pa za isto vrednost zmanjšamo dušenje. Odločili smo se za povečanje ojačanja. Navedeno prilagoditev bomo opravili v enem izmed rednih servisov radarja.

Zaključek

S C-pasovnim vremenskim radarjem na Lisci smo izmerili ekvivalentno radarsko odbojnost kovinske krogle s premerom 30 cm pri oddaljenosti 13 km. Krogla je bila dvignjena v zrak s privezanim helijevim balonom. Meritve so potekale sektorsko z ločljivostjo 0.5° po azimutu in 0.2° po elevaciji. Opravljenih je bilo 50 sektorskih meritev pri petih različnih legah balona. Iz vsake sektorske meritve je bil izvlečen maksimum odbojnosti od krogle. Maksimum teh maksimumov je znašal 30.0 dBZ, kar je za 1.3 dBZ več od vrednosti, ki jo napoveduje teorija. Razlikovanje med obema vrednostima je majhno in v okviru sprejemljive napake.

Zdi se, da je opaženo razliko možno pojasniti s tem, da je bilo svoj čas iz radarja odstranjeno polarizacijsko stikalo, kar je bodisi povečalo ojačanje antene bodisi zmanjšalo dušenje v valovodu. Razliko je najbolj smiselno odpraviti tako, da povečamo nominalno ojačanje antene za $1.3/2 \approx 0.7$ dB. Vendar, kot rečeno: tudi brez te prilagoditve je radar dobro kalibriran, to je, sistem meri ekvivalentne radarske odbojnosti tarč v okviru napake ± 1.5 dBZ.

Sodelavci

Pri meritvah so sodelovali: Anton Zgonc, Jože Vrhovšek, Luka Ravnik, Rudi Vran in Zvonko Komerički.

Viri

- [1] Skolnik, M. I.: *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill, Singapore, 1981.
- [2] Battan, L. J.: *Radar Observations of the Atmosphere*. University of Chicago, Chicago, 1973.
- [3] Doviak, R. J., and D. Zrnič: *Doppler Radar and Weather Observations*. Academic Press, 1993.
- [4] Divjak, M.: *Radarsko merjenje padavin v neoptimalnih razmerah*. Magistrsko delo, Univerza Ljubljana, 1996.
- [5] Brown, R. H.: *C-band Meteorological Radar Free-Sphere Calibration Procedure*, 09/07/01. Internet, <http://radarmet.atmos.colostate.edu>, 2007.