

ZVOČNI RADAR

ACOUSTIC RADAR

Zdravko PETKOVŠEK

Katedra za meteorologijo, VTO Fizika, FNT Ljubljana

SUMMARY

Acoustic radar (or SODAR, ACDAR, sound sounder) is a useful tool for detection of the discontinuity layers of atmospheric turbulence, such as wind-shears, temperature inversions, upper boundaries of cold-air lakes, boundaries of fog and stratus, plumes and domes above cities, etc. An attentive interpretation of registered data of the height and strength of the sounder's echo brings about many important conclusions on the atmospheric processes and phenomena.

In the present survey the elements of the instrument, and theoretical and practical bases of its work are presented at the beginning. Further, the applications, problems, troubles and possible mistakes are discussed, and examples of record interpretations are given. Some comparisons of acoustic sounder data with the data of other sounding systems (radiosonde, microbarographs) are also presented and discussed on the basis of other investigations.

POVZETEK

Zvočni radar (imenovan tudi SODAR, ACDAR, sound sounder i.d.) je sodoben pripomoček za določevanje diskontinuitetnih plasti atmosferske turbulence. Ker so z njimi v tesni povezavi pojavi, kot npr. vetrovna striženja, temperaturne inverzije, meje jezer hladnega zraka, megle in stratusne oblačnosti dimnih zastav in onesnaženja zraka nad mesti itd., nam pravilna interpretacija registriranih podatkov o višini in jakosti odbojev, omogoča mnoga pomembna spoznanja o dogajanjih v prizemnih plasteh atmosfere nad nami.

Delo z zvočnim radarjem ni zelo zahtevno in tudi cena je dokaj dostopna. Podatki, ki jih lahko da zvočni radar, so vedno bolj potrebni pri mnogih odločitvah in koristijo pri kratkoročnih prognozah vremena in onesnaženja zraka. Zato moramo spoznati delovanje in problematiko meritev, kot tudi možnosti, ki jih ta instrument daje, da bi lahko pravilno ocenili potrebe po njem in njegovo koristnost pri našem prihodnjem delu.

UVOD

Vse večje potrebe po čim bolj izčrpnih podatkih o stanju atmosfere v njenih prizemnih plasteh nam lahko deloma krije tudi zvočni radar (imenovan še SODAR,

ACDAR, sound sonder i.d. /1/. Z njim je mogoče določati višine nezveznosti atmosferske turbulence, te pa so povezane z vetrovnimi striženji, temperaturnimi inverzijami, onesnaženjem zraka itd., kot potrjujejo že znane primerjave s podatki doppler-radarja in z mikrobarografskimi krivuljami /2/. Ker je instrument sorazmerno preprost in je tudi njegova cena zmerna (ca. 10^4 §) in dostopna, bi bilo prav, da ga tudi pri nas vključimo med posebne opazovalne instrumente. Zato je koristno, da spoznamo njegove elemente, način delovanja in rezultate, ki jih daje, kakor tudi probleme in težave, na katere naletimo pri delu z njim in pri analizi njegovih registracij /3/.

NAČELO DELOVANJA IN ELEMENTI

Zvočni radar deluje tako, da pošlje navzgor v atmosfero zvočni impulz frekvenca okrog 1600 Hz ter nato sprejme in registrira odmev, ki pride nazaj zaradi odboja na temperaturno-turbulentnih diskontinuitetah v prizemnih plasteh atmosfere.

Glavne sestavine najpreprostejšega monostatičnega zvočnega radarja so tri: sprejemno-oddajna antena, ščitnik proti hrupu in regulator (slika 1 in 2). Antena je parabolični kovinski "krožnik" premera ca. 1 m z oddajno prejemnim elementom; zvočni ščitnik pa je visok okrog 2,5 m. Ščitnik ima dvojno nalogo: na eni strani ščiti okolico pred zvočnimi impulzi oddajnika, predvsem pa preprečuje vpliv zvočnih motenj okolice - hrupa na nemoten ali vsaj malo moten sprejem odbitih valov. Te motnje so lahko tako močne, da v zelo hrupnih področjih instrument ni uporaben, vendar daje uporabne rezultate tudi v urbanih področjih, če je nameščen na strehah visokih zgradb. Ločimo lahko tri vrste hrupa, ki moti: nepravilni odmevi od bližnjih zgradb; zvok, ki nastane na anteni ali na ščitniku zaradi vetra ali dežja in pravi hrup iz okolice. Zato je važna tudi pravilna izbira lokacije instrumenta. Pri šibkem dežju ali pri sneženju dela zvočni radar dobro, pri močnem dežju pa ne.

Monostatični sistem je tisti, kjer sta oddajna in sprejemna antena združeni. Po oddanem impulzu čaka antena na sprejem nekaj sekund (slika 3a); pri bistatičnem sistemu pa sta oddajna in sprejemna antena ločeni in postavljeni nekaj 100 metrov vsaksebi (slika 3b). Ta sistem ima nekaj prednosti, ki jih bomo spoznali pozneje.

Impulzi, ki trajajo 50 do 200 milisekund se ponovijo vsakih nekaj sekund, zato dobimo na regulatorju praktično zvezen zapis višine turbulentne diskontinuitete na višinah nekako med 100 in 1000 m nad anteno. Dejansko dobimo le višino diskontinuitet, sicer pa samo kvalitativne informacije o jakosti pojavov, iz česar pa je mogoče marsikaj sklepati, če dobro poznamo odnose med pojavi.

Širina snopa poslanih zvočnih valov je pri večini monostatičnih radarjev nekaj nad 10^0 ter se pri brezvetrju odmev vrne naravnost v anteno. Pri močnejšem vetru pa nastane zanos, vendar je snop dovolj širok, da deluje zvočni radar še do hitrosti vetra okrog 30 m/s (110 km/h), pri dosti večjih hitrostih vetra pa ne.

Hitrost širjenja zvočnih valov je podana z enačbo

$$c = u + \sqrt{k R T} \quad (1)$$

kjer je u hitrost gibanja zraka, k razmerje specifičnih toplot za zrak, R individualna plinska "konstanta" vlažnega zraka in T temperatura. Za $u = 0$ dobimo ob upoštevanju odvisnosti R -a od parnega pritiska (e) in zračnega pritiska (p) enačbo:

$$c = a \sqrt{T (1 + 0,38 e/p)} \quad (2)$$

kjer je $a = 20,05 \text{ m/s}^{-1} \text{ K}^{-1/2}$; ta daje torej tudi vpliv vlage v zraku na hitrost širjenja zvočnih valov, vendar ta vpliv očitno ni velik; večji pa je vpliv vlage v zraku na slabitev impulza.

V normalnih pogojih ($T = 273,2 \text{ K}$, $p = 1013 \text{ mb}$ in $U = 50\%$) je hitrost zvoka $c = 331,5 \text{ m/s}$ in se poveča pri zvišanju temperature za eno stopinjo za $0,6 \text{ m/s}$, pri povečanju na 100% relativno vlago pa le za ca. $0,1 \text{ m/s}$. Glede na hitrost zvoka je višina, s katere se vrne impulz po eni sekundi, okrog 167 m in je odvisna tudi od kalibracije instrumenta. Za vrnitev impulza z višine 1 km je zato potrebnih ca. 6 sekund, in v skladu s tem je presledek med posameznimi impulzi monostatičnega sistema.

Kako natančno določamo višino odbojne turbulentne plasti pa je odvisno od trajanja poslanega impulza

$$\delta h = c \delta t \quad (3)$$

kjer je δh nenatančnost višine oziroma pot, ki jo preide zvok v času trajanja impulza. Tako dajejo impulzi, ki trajajo 50, 100 ali 200 milisekund, nenatančnost na 8,5, 17 in 33 m.

Odmev povzročajo predvsem take temperaturne razlike, ki vplivajo na razlike v hitrosti širjenja zvoka, tako da se spremeni valovna dolžina (λ) poslanega signala za polovico. V skladu z relacijo

$$\lambda = c/v \quad (4)$$

znaša to, glede na frekvenco impulza $v = 1600 \text{ Hz}$ $\lambda/2 \approx 10 \text{ cm}$.

V skladu z gornjo razlago in enačbo (2) so torej zadostne temperaturne spremembe delčka stopinje ali večje spremembe relativne vlage. Zato turbulenca praktično vedno - razen v čisto adiabatni vertikalni temperaturni razporeditvi - poskrbi za zadostne temperaturne razlike in pride do odboja.

Dober sistem zvočnega radarja dela vsaj s tremi dolžinami impulza in tudi s tremi filtri za širino spektralnih pasov pri sprejemniku. Filtri so potrebni tudi

zato, da izločajo del hrupa iz okolice, ki moti. Najboljše razmerje med signalom in hrupom je pri dolgem impulzu in ozkem spektralnem traku, vendar je oboje treba izbirati glede na potrebe. Navadno imajo sprejemniki možnost izbire treh širin spektralnih trakov, in sicer 20, 40 in 80 Hz. Energija signala je navadno manjša od 1% impulza; slabitev signala v atmosferi pa je tudi odvisna od temperature, relativne vlage in frekvence. Za dosego večjih višin so boljše nižje frekvence, ki pa zahtevajo večje antene. Slabitev signala (S) v odvisnosti od temperature in vlage pa je razvidna iz naslednjih vrednosti, ki veljajo za 1 km dolgo pot impulza skozi atmosfero:

T = 0° C	U = 100%	S = 8,6 dB;	U = 50%	S = 18 dB
T = 30° C	U = 50%	S = 7,0 dB;	U = 14%	S = 12 dB

odkoder sledi, da je sipanje močnejše v suhem zraku in pri nižjih temperaturah.

Videli smo, da je pri daljšem impulzu natančnost meritve manjša; velja pa tudi, čim ožja je širina spektralnega traku sprejemnika, tem večja je možnost, da bo impulz izpadel iz njegovega območja zaradi frekvenčnega premika, ki ga povzroči dopplerjev efekt. Kombinacije impulzov in filtrov morajo biti zato take, da dobimo dovolj takih frekvenc, ki jih spusti ožji spektralni filter. Kratki impulzi in širok spektralni trak, ki dajo veliko ločljivost, so dobri za kratke razdalje, kjer je moč odbitih impulzov v splošnem velika in ni treba paziti na razmerje med poslanim in sprejetim impulzom. Nasprotno pa je daljši impulz in ožji spektralni trak sprejemnika boljši za informacije z večjih razdalj, a le tako, da ne izpade odmev zaradi dopplerjevega efekta. Hitrost gibanja "odbojnikov" navzgor ali navzdol spremeni namreč frekvenco za ca. 10 Hz pri hitrostih gibanja 1 m/s.

Te probleme rešujejo novejši zvočni radarji avtomatično, tako da dobimo za enako turbulenco približno enak zapis - enako zasenčenje - na registrirnem papirju ne glede na razdaljo in čeprav energija snopa z razdaljo slabi. Zadnji efekt je delno kompenziran že s tem, ker odbojna površina z razdaljo narašča. Odnos med obema učinkoma ni linearen, vendar skrbi za potrebne popravke instrument sam.

Odmevni zapis dveh zaporednih impulzov je navadno približno enak, čeprav so sami odbojniki (vrtinci oz. temperature) od impulza do impulza že različni. V polju normalne turbulence je namreč zelo mnogo odbojnikov, ki povzročajo odmev vsakega zvočnega impulza iz nekega območja oddaljenosti. V naslednjih sekundah pred novim impulzom te odbojnice zamenjajo drugi - trenutno polje turbulence se stalno spreminja; poleg tega pa zmerni veter odnaša ta del turbulentnega zraka izven območja naslednjega impulza.

Pri bistatičnem sistemu, kjer odbojni kot ni 180°, ampak je med 165° in 110°, nastaja odboj bolj zaradi hitrostnih razlik kot zaradi temperaturnih. Zato daje kombinacija mono- in bistatičnega sistema več informacij o turbulenci in stratifikaciji atmosferskih plasti kot pa vsak sistem zase.

UPORABA IN PRIMERI ANALIZE

Diskontinuitete v turbulenci in temperaturi se pojavljajo v bližini temperaturnih inverzij, ki jih tako zaznamo. Tako določamo višine talnih, turbulentnih, frontalnih in subsidenčnih inverzij, zgornje meje jezer hladnega zraka, meje dimnih zastav, mestnih kupol onesaženega zraka itd. Zato je očitno, da je uporabnost zvočnega radarja nedvomno velika v meteorologiji, kot v mnogih področjih, ki so povezane z njo.

Stalne meritve višin diskontinuitet nam dajo poleg neposrednih podatkov o njihovi višini tudi njihovo dinamiko, to je, spreminjanje višin, njihov nastanek in razkroj. Po daljšedobnem opazovanju je mogoče dobiti tudi klimatske značilnosti teh pojavov. Pri tem si navadno pomagajo s kategorizacijo registracij. Ta obsega do 15 kategorij /4/, čeprav jih za reševanje problemov onesaženja zraka navadno zadostuje šest. Kategorizacija omogoča tudi preprosto digitalizacijo dobljenih podatkov; lahko pa se celotne registracije prenašajo tudi s faksimile sistemi.

Podatki zvočnega radarja pomagajo razložiti nekatere pojave v atmosferi in nudijo neposredno pomoč pri prognozi vremena in onesaženja zraka v lokalni in mezometeorološki skali. S temi meritvami je mogoče zaznavati lokalno cirkulacijo zraka (obalne in pobočne vetrove), gravitacijske valove, reliefne vplive na gibanja zraka, pa tudi ptičje jate, polucijo atmosfere s hrupom itd. Iz dobljenih podatkov je mogoče sklepati na stabilitetne in difuzijske parametre v prizemnih plasteh, na višino megle in celo na vertikalne temperaturne gradiente. Pri takih ocenah so potrebne primerjave z meritvami z vezanim balonom ali na visokih stolpih /5/, vendar še prihaja do napak in zamenjav /6, 7/ ter je potrebna skrbna analiza in upoštevanje križnih vplivov dogajanj v atmosferi.

Poleg značilnih primerjav registracij zvočnega radarja in mikrobarografov ob zaznavanju valovanj na internih diskontinuitetah /8/, je zanimiva študija A. Gysegema in H. Hellemansa /9/, ki sta primerjala istočasne meritve višin temperaturnih inverzij z zvočnim radarjem in radiosondažo. Zajela sta 380 primerov, kar je omogočilo statistično obdelavo. Tako sta ugotovila za višine med 100 in 900 m zelo visok korelacijski koeficient med meritvami višine temperaturnih inverzij z zvočnim radarjem in radiosondo, in sicer 0,97. Nekoliko podrobnejše odnose med obojimi meritvami pa sta podala tabelarično z razdelitvijo v pet razredov, kot je razvidno s tabele 1.

Registrator hkrati zabeleži odboje zaradi vseh spredaj navedenih vplivov, ki neredko nastopajo v kombinacijah in jih je treba z analizo opredeliti. V glavnem ločimo dve vrsti odmeva, in sicer termalni odmev, ki je posledica konvektivnih celic in ima značilno vertikalno strukturo, ter strižni odmev, kjer je turbulanca predvsem posledica vetrovnih striženj v stabilni stratifikaciji. Plast brez odmevov je navadno plast nevtralne stratifikacije, kjer turbulenca ne daje drobnih temperaturnih sprememb; pač pa so meje take plasti (neosenčene) navadno lepo vidne.

Tabela 1 Odstotki ujemanja meritev višin temperaturnih inverzij po radiosondaži in zvočnem radarju /9/.

Table 1 Percentage of agreement of temperature inversion measurements using radiosonde and sound sounder's /9/.

Razred	Opis	%
1	inverzija po radiosondaži višina z radarjem natančno določena	37
2	inverzija po radiosondaži višina z radarjem dvomljivo določena	10
3	inverzija po radiosondaži ni signala na zvočnem radarju	1,5
4	ni inverzije po radiosondaži nestabilnost ali ni signala na radarju	22,5
5	stabilnost, toda brez inverzije po radiosondaži višina z radarjem natančno določljiva	29

Primeri registracij na naslednjih slikah 4 do 7 z dodanimi pojasnili dovolj dobro že sami prikazujejo uporabnost zapisov in probleme, ki se pojavljajo pri analizi registriranih trakov zvočnega radarja ob nekaterih značilnih pogojih. Na slikah vidimo, kako so registrirane turbulentne plasti in njihova valovanja, vidimo termične vplive tal, vplive hrupa iz okolice, inverzne plasti v primerjavi z izmerjeno temperaturno stratifikacijo, razvoj turbulence ob nastanku fena i.d., zato širši komentar k njim ni potreben.

Iz vsega navedenega je očitno, da je lahko zvočni radar zelo koristen pripomoček za ugotavljanje dogajanj v prizemnih plasteh atmosfere, in bilo bi koristno, da bi čim prej zasedel ustrezno mesto tudi pri nas.

LITERATURA

- /1/Monostatic Acoustic Radar, AeroVironment Inc., Pasadena California USA 91107, 1976.
- /2/BERAN, D.W. et al.: Acoustic Echo-Sounding Techniques and their Application to Gravity-Wave, Turbulence and Stability, Boundary-layer Meteor., Vol. 4, 1973, 133.
- /3/Acoustic Radar - Application and Interpretation of Records, AeroVironment Inc., Pasadena, Calif. USA 91107, 1976.
- /4/SCHUBERT, J.F.: A Climatology of the Mixed Layer Using Acoustic Methods, Prepr. 3rd Symp. Met. Instr. and Obs., AMS 1975.

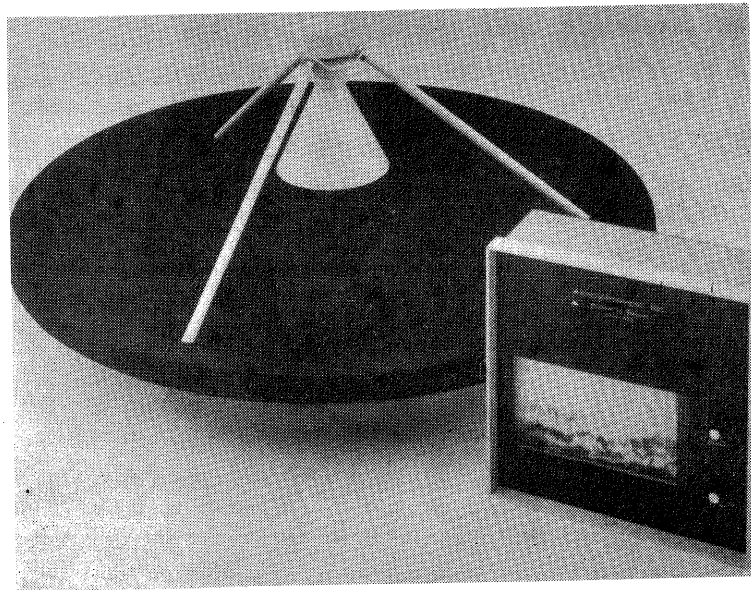
/5/PETERSEN, E.L., JENSEN, N.O.: A Mesoscale Phenomenon Revealed by an Acoustic Sounder, J. Appl. Met. V. 15, 1976, 662.

/6/HALL, F.F., NEFF, W.D.: Comments on "A Mesoscale Phenomenon Revealed by an Acoustic Sounder", Journal Appl. Met. V. 16, AMS 1977, 109.

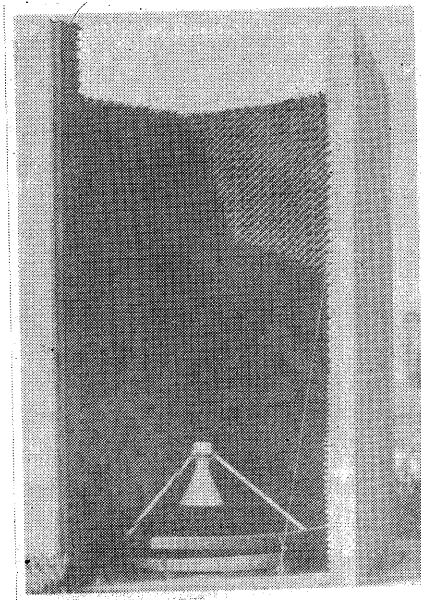
/7/PETERSEN, E.L., NIELS, N.O.: Reply. Ibid 110.

/8/MERRILL, J.T.: Observational and Theoretical Study of Shear Instability in the Airflow near the Ground, Jour. Atm. Sc. V. 34, AMS 1977, 911.

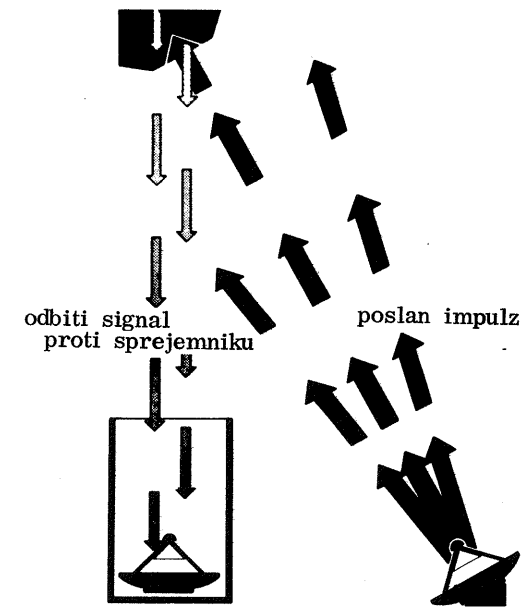
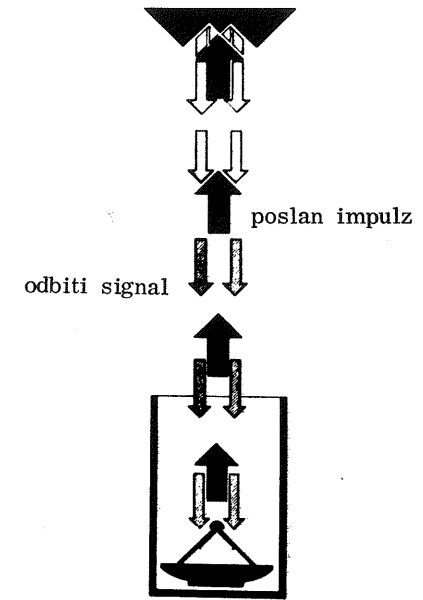
/9/GYSEGEM, A., HELLMANS, H.: Aptitude de l'ACDAR a mesurer en continu les hauteurs d'inversion, WMO No. 480, Methods of Observation (TECIMO), 1977, 249.



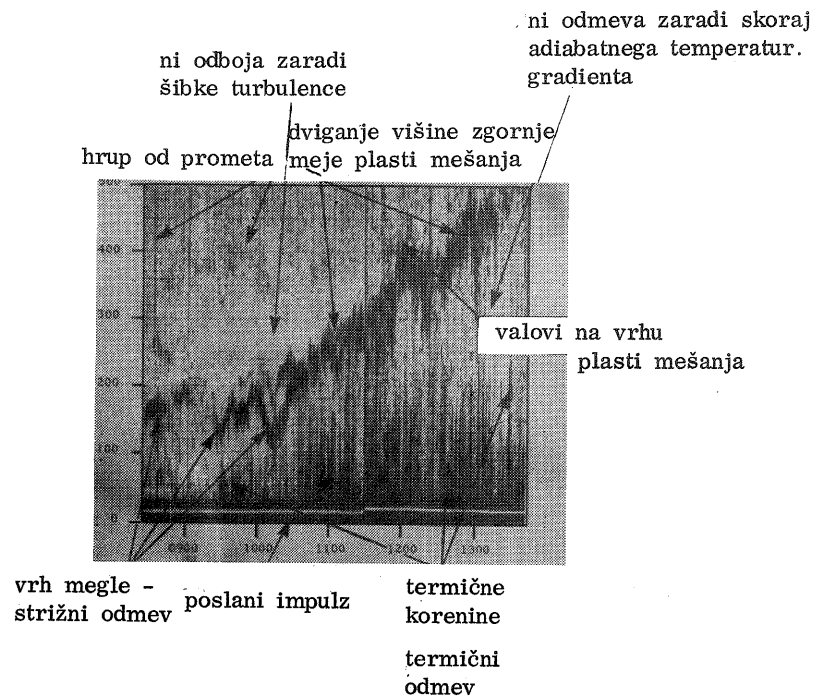
Slika 1 Oddajno-sprejemna antena zvočnega radarja in registrator
 Fig. 1 Antenna system and transceiver-display unit



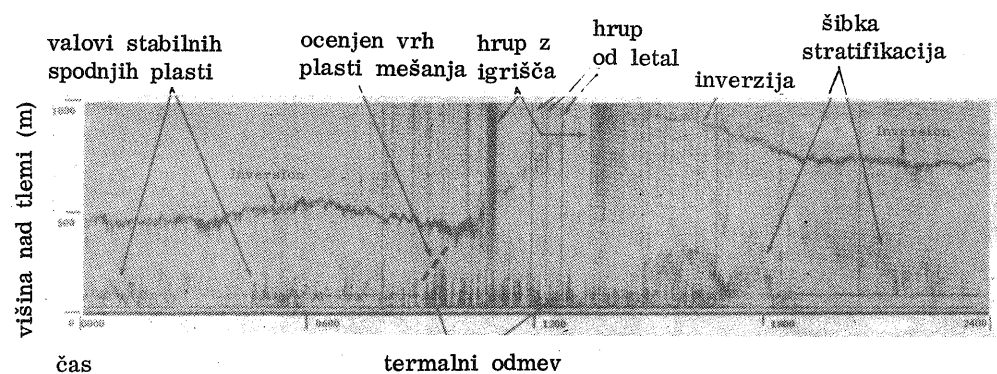
Slika 2 Postavljena antena in ščitnik (brez ene stene)
 Fig. 2 Placed antenna and shield enclosure (one wall removed)



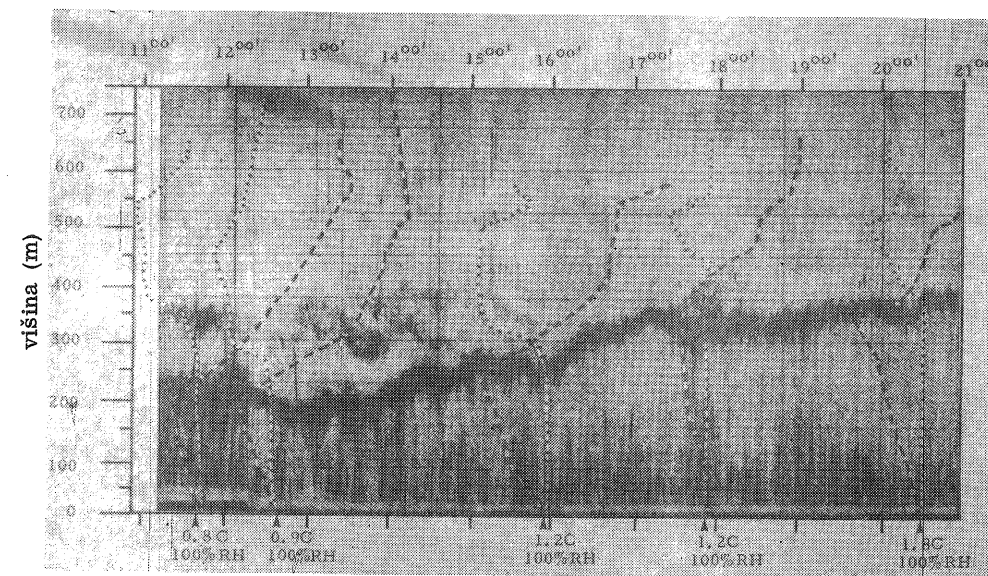
Slika 3a,b Shemi delovanja monostatičnega in bistatičnega sistema
 Fig. 3a,b Setup of monostatic and bistatic system



Slika 4 Razvoj in dviganje plasti mešanja po razkroju jutranje megle
 Fig. 4 Development and lifting of mixing layer after the morning fog dissipation



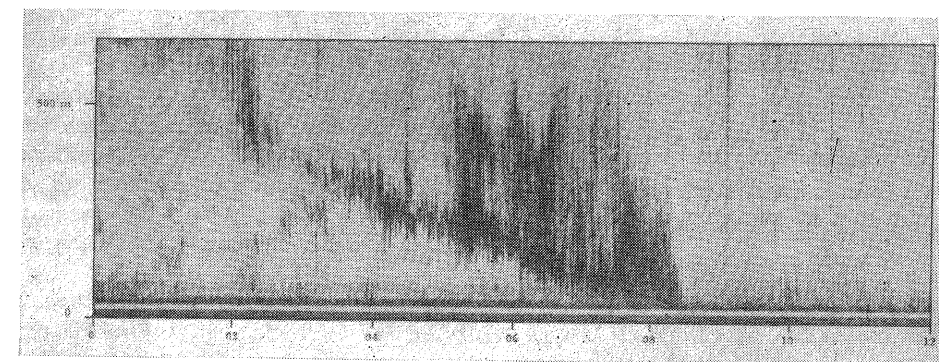
Slika 5 Dnevne spremembe višine dvignjene inverzije plasti nad neko dolino
 Fig. 5 Daily variation of height of an elevated inversion layer above a valley



----- temperatura
 relativna vlaga

Slika 6 Vrh meglene plasti pod močno inverzijo ter profili temperature in rel. vlage nad Benetkami (po H. Hasenjaegerju)

Fig. 6 Upper boundary of fog layer under a strong inversion with temperature and humidity profiles at Venice



Slika 7 Razvoj atmosferske turbulence ob začetku fena v Kaliforniji (po M. Zeldinu)

Fig. 7 Development of atmospheric turbulence at the beginning of the foehn period in California