

MERITVE RAZPOREDITVE TEMPERATURE IN VLAGE V ATMOSFERI S
SATELITOV

TEMPERATURE AND HUMIDITY SOUNDING OF THE ATMOSPHERE FROM
SATELLITES

Jože RAKOVEC

Katedra za meteorologijo, VTOZD Fizika, FNT, Ljubljana

SUMMARY

A brief survey on the theoretical background of remote-sensing of temperature and humidity profiles in the atmosphere on a basis of spectrometric sounding in absorption bands of typical gases in infrared and microwave region of the spectra is given. Most of the presentation is devoted to the problems of data acquisition and to their quality, and the problem of inversion of the radiometric data to the temperature and humidity data is only briefly mentioned.

POVZETEK

Pregledno so prikazane teoretske osnove za možnost določanja razporeditve temperature in vlage v atmosferi s satelitov na podlagi spektrometričnega sondiranja v absorpcijskih pasovih značilnih plinov v ozračju v infrardečem in mikrovalovnem delu spektra sevanja Zemlje in atmosfere. Pri tem je le manjši del prikaza posvečen problemu inverzije radiometričnih podatkov v podatke o temperaturi in vlagi, večji del pa problemom samega pridobivanja podatkov ter kvalitete le-teh.

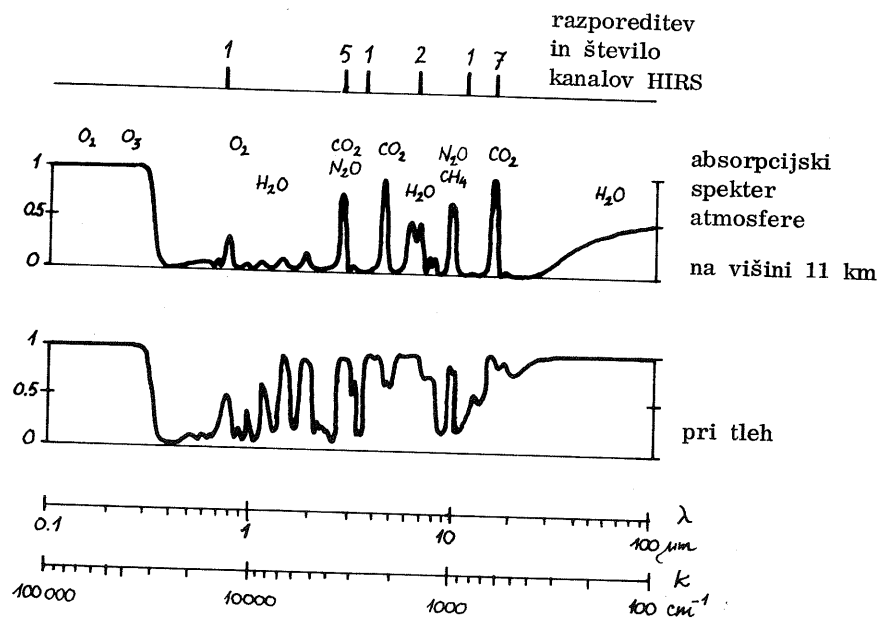
UVOD

Poznavanje vertikalnih profilov temperature, vlage, zračnega pritiska, vetra in še kakšnih meteoroloških parametrov je osnova za uspešno reševanje mnogih nalog meteorologije; še posebej pa brez tega ni možna uspešna napoved vremena. Danes dobivamo te podatke v glavnem z radiosondami. Toda mreža radiosondnih postaj je na Zemlji dokaj nehomogena: dokaj je gosta nad Evropo, Azijo in Sev. Ameriko, nad oceani in skoraj nad celo južno hemisfero pa podatkov ne dobivamo dovolj. Možnost, ki se danes odpira na tem področju, je satelitsko snemanje potrebnih podatkov.

OSNOVE ZA RADIOMETRIČNO DOLOČANJE VERTIKALNIH PROFILOV TEMPERATURE

Na možnost radiometričnega določanja temperature v atmosferi je leta 1959 prvi opozoril Kaplan /1/ in še istega leta je bila ta možnost tudi preizkušena na satelitu Nimbus 3. Rezultati so bili ohrabrujoči in danes je tako snemanje že dokaj popolno.

Osnove za "remote sensing" profilov temperature v atmosferi so naslednje. V področju vidnega in infrardečega sevanja je v atmosferi nekaj značilnih absorpcijskih in sevalnih pasov zaradi absorpcije in sevanja triatomnih plinov, kot so H₂O, CO₂, O₃, N₂O itd. (slika 1). Zelo močan je npr. pas CO₂ pri 15 μm, ki leži tudi blizu vrha Planckove krivulje za sevanje pri temperaturi atmosfere, je osamljen, poleg tega pa je CO₂ dobro premešan do višine kakih 70 km /2/. Oglejmo si torej, kako bi sevanje v tem sevalnem pasu moglo služiti za vertikalno temperaturno sondiranje.



Slika 1 Absorpcijski spekter atmosfere pri tleh in na višini 11 km ter razporeditev kanalov HIRS radiometra.

Fig. 1 Absorption spectra of the atmosphere at the ground and at height 11 km, and the distribution of HIRS radiometer measuring channels.

Ko sevanje prehaja skozi neko zračno plast, se ga del absorbira, delno pa ta plast s svojim sevanjem prispeva k ojačitvi sevanja. Tako je sprememba gostote

te energijskega toka j sevanja frekvence ν pri prehodu skozi plast zraka z maso na ploskovno enoto $dm/s = pdz = dp/g$ pri pritisku p enaka:

$$dj(\nu, p) = j(\nu, p) k(\nu) dp/g - j^*[\nu, T(p)] k(\nu) dp/g \quad (1)$$

kjer je $k(\nu)$ masni absorpcijski koeficient za sevanje s frekvenco ν , j^* pa gostota energijskega toka, ki bi ga pri tej frekvenci sevalo črno telo s temperaturo $T/3$. Z uvedbo nove vertikalne koordinate:

$$x = \int_0^p k(\nu) dp/g$$

se enačba (1) poenostavi v:

$$dj(\nu, x) = [j(\nu, x) - j^*(\nu, x)] dx.$$

To nehomogeno linearno enačbo integriramo v mejah od tal ($x = x_s$) do vrha atmosfere ($x = 0$); pa dobimo na vrhu atmosfere:

$$j(\nu) = j^*(x_s) e^{-x_s} + \int_0^{x_s} j^*(x) e^{-x} dx.$$

V navadi je, da označimo:

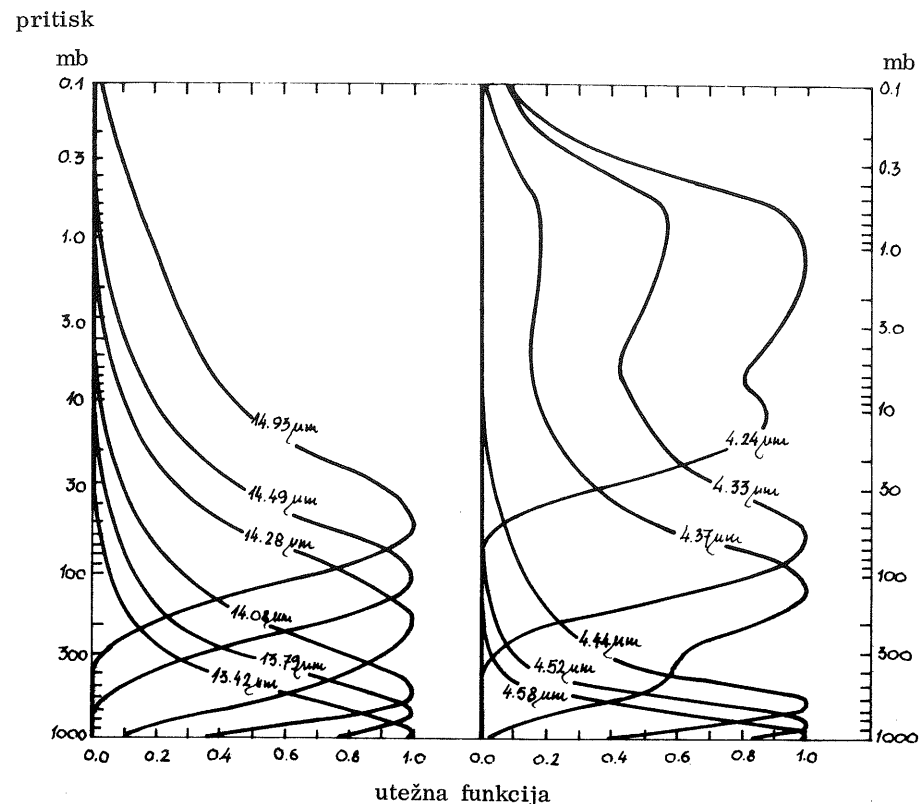
$$\tau(\nu, p) = e^{-x} = e^{-\int_0^p k(\nu) dp/g},$$

pa dobimo:

$$j(\nu) = j^*(\nu, T_s) \tau(\nu, p_s) - \int_0^{p_s} j^*[\nu, T(p)] \partial\tau/\partial p dp. \quad (2)$$

Ta enačba torej pove, da je sevanje s frekvenco ν , ki ga moremo zaznati na vrhu atmosfere, vsota (oslabljenega) sevanja s tal ter prispevkov sevanja posameznih slojev atmosfere. $\partial\tau/\partial p$ je utežna funkcija, ki je močno odvisna od $k(\nu)$ ter od p . Prav ta odvisnost omogoča, da razpoznamo $T(p)$ po zvezi (2), če seveda poznamo radiometrične podatke $j(\nu)$, kajti za različne frekvenčne kanale imajo utežne funkcije maksime na različnih višinah - to je tudi pri različnih temperaturah (slika 2). Čim ostrejši so ti vrhovi, tem tanjšo plast atmosfere nam popiše posamezni frekvenčni kanal in v čim več kanalih merimo, tem točnejši so rezultati.

Kako pa preiti od radiometričnih podatkov do podatkov o temperaturnem profilu? Gre za dva problema: za problem samega načina inverzije podatkov ter za problem ocene napak pri tem /4/. Inverzijo je moč izvesti npr. z metodo inverzne matrike /5/ ali z iterativno nelinearno metodo /6/, napake pa poskušajo spraviti na minimum na različne načine /4, 7, 8/. Tu se tem problemom ne bi več posvečali, omenimo le, da so pomembni in ne preprosti.



Slika 2 Normalizirane utežne funkcije za nekatere kanale v infrardečem delu emisijskega spektra CO₂ (po Smithu /11/).

Fig. 2 Normalized weighting functions for some channels in infrared part of emission spectra of CO₂ (according to Smith /11/).

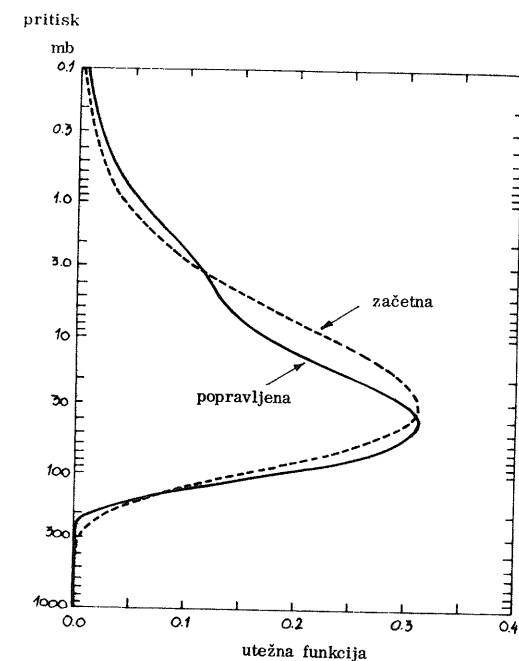
PROBLEM DOBRIH IN REPREZENTATIVNIH RADIOMETRIČNIH PODATKOV

Za dobre radiometrične podatke moramo seveda imeti mnogokanalni, dobro kalibriran radiometer; iz enačbe (2) pa je videti, da so pogoji za pravilno določitev $T(p)$ tudi poznavanje temperature tal T_s ter primerni frekvenčni kanali z dovolj ostrimi in pravilno razporejenimi utežnimi funkcijami. Poznati moramo tudi oblačnost, ki na radiometrične podatke močno vpliva.

Temperaturo tal bi mogli konec koncev meriti tudi na samih tleh, toda ob radiometrih z visoko ločljivostjo, bi morale biti te meritve preveč goste, da bi to še imelo smisel. Zato ima HIRS (infrardeči radiometer z visoko ločljivostjo - High resolution Infra-Red Sounder) na satelitu Nimbus 6 en kanal tudi v območju atmosferskega okna pri 0.7 μm , kjer gre sevanje s tal skoraj nemoteno skozi atmosfero.

Utežne funkcije $\partial T / \partial p$ so zaželeno čim ostrejšje in kanali tako razporejeni, da vrhovi utežnih funkcij dobro pokrijejo vse višine. Najpogosteje naj bi bila pokrita območja, kjer imamo običajno preskoke v temperaturnem profilu, to je pri tropopavzi in pri tleh. Čeprav pa imajo utežne funkcije za pas pri 15 μm pri tleh ostre vrhove, samo ta pas le ne zadošča. Zato so v merjenja vključili tudi sevalni pas CO₂ in N₂O pri 4.3 μm , kajti poleg ostrih vrhov utežnih funkcij za ta pas blizu tal, je tudi Planckova krivulja v tem območju bolj odvisna od temperature kot pa pri maximu. Tako ima HIRS na Nimbusu 6 v pasu pri 15 μm 7 kanalov, v pasu pri 4,3 μm pa 5 kanalov.

Tudi sama določitev oblike utežnih funkcij ni preprosta. Napake so posledica tega, ker koncentracija CO₂, N₂O ipd. le ni povsem konstantna, tako po času kot po prostoru. Pa tudi pri znani koncentraciji sevajočih plinov določitev $k(\nu)$ ni preprosto seštevanje posameznih absorpcijskih učinkov posameznih plinov, kajti efektivni atmosferski absorpcijski koeficient $k(\nu)$ je posledica interaktivnega delovanja absorbentov. Ker je ta absorpcijski koeficient odvisen tudi od pritiska, je treba rezultate popravljati še potem, ko je satelit že v krožnici. Tako so npr. šele potem, ko je Nimbus 5 že meril, s sočasnimi neodvisnimi meritvami temperature in vlage popravili utežno funkcijo za kanal 668 cm^{-1} (slika 3).



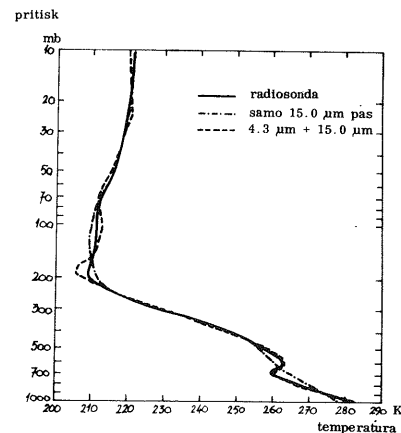
Slika 3 Začetna in popravljena utežna funkcija za kanal 668 cm^{-1} (po Morelu /3/).

Fig. 3 Initial and corrected estimate of the weighting function for the 668 cm^{-1} channel (according to Morel /3/).

Posebno močno pa vplivajo na kvaliteto radiometričnih podatkov oblaki. Sateliti prvih generacij so imeli vidno polje premera 200 km in tam je delna oblačnost prej pravilo kot izjema. V takem primeru pa radiometer na satelitu zazna različno sevanje iz dveh območij vidnega polja, čeprav je tam pravi profil temperature enak. Izdelali so več metod za rešitev tega problema /6, 9/, vendar je zanje potrebno poznati dodatne informacije v drugem frekvenčnem pasu in/ali o količini oblačnosti ter višini gornje meje oblačnosti ter a priori postaviti temperaturo tal. Za vse te namene je bilo v HIRS na Nimbusu 6 treba vključiti tudi merjenja v atmosferskih oknih pri 0.7 μm , 3.7 μm in 11 μm ter v sevalnem pasu H₂O pri 6.3 μm za potrebe določevanja profila vlage. Poleg tega ima HIRS zelo dobro ločljivost (20 km), kar zmanjšuje možnost, da bi v področju snemanja imele jasne in oblačne predele.

Najradikalnejši korak pri premagovanju problema oblačnosti pa so dodatna merjenja v mikrovalovnem območju. Nimbus 6 nosi tudi 5 kanalni mikrovalovni spektrometer SCANS (Scanning Microwave Spectrometer), ki meri v treh kanalih v sevalnem pasu O₂ pri 0.5 cm ter v dveh oknih pri 1 cm in 1.4 cm. Oblačnost na sevanje pri 0.5 cm namreč skoraj nič ne vpliva, zato je merjenje v tem pasu odlično dopolnilo k merjenjem v infrardečem. Samo za sebe pa ne bi zadostovalo zaradi premajhne ostrine utežnih funkcij v nižjih slojih atmosfere.

Za konec še primerjajmo radiosondne podatke s satelitskimi (slika 4). Vidimo, da so ujemanja dokaj dobra. Za daljši niz so dobili /10/, da je standardna deviacija temperaturnih podatkov pod ali okoli 2 K, kar je v okviru napak samih radiosond. Tako ni gotovo, komu te napake pripisati - radiosondam ali satelitom. To pa pomeni, da bi po tej plati sateliti že lahko zamenjali radiosondna merjenja.



Slika 4 Primerjava med sondažama, dobljenima radiometrično in z radiosondo (po Smithu /11/).

Fig. 4 Comparison of radiometrically sounded and with radiosonde observed temperature profiles (according to Smith /11/).

LITERATURA

- /1/ KAPLAN, L.D.: Inference of atmospheric structure from remote radiation measurements. *J. Optical Soc. Am.*, **49**, 1004-1007, 1959.
- /2/ BARRETT, E.C., CURTIS, L.F.: Environmental remote sensing: applications and achievements. London, Arnold, 1974, vi+309 pp.
- /3/ MOREL, P.: Air temperature and moisture observations from space. Seminars on sci. foundations of medium range weather forecast, Reading, ECM-WF, 1975, 23-48.
- /4/ RODGERS, C.D.: The vertical resolution of remotely sounded temperature profiles with a priori statistics. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 707-709, 1976.
- /5/ SMITH, W.L. et al.: Regression method for obtaining real-time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to Nimbus 3 "SIRS" observations. *Mon. Wea. Rev.*, **98**, 582-603, 1970.
- /6/ CHAHINE, M.T.: Inverse problems in radiative transfer: determination of atmospheric parameters. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 960-967, 1970.
- /7/ CHAHINE, M.T.: An analytical transformation for remote sensing of clear-column atmospheric temperature profiles. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1946-1952, 1975.
- /8/ FRITZ, S.: Temperature retrievals from satellite radiance measurements - an empirical method. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 172-176, 1977.
- /9/ CHAHINE, M.T.: Remote sounding of cloudy atmospheres. I. The single cloud layer. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 233-243, 1974.
- /10/ SMITH, W.L., WOOLF, H.M.: The use of eigenvectors of statistical covariance matrices for interpreting satellite sounding radiometer observations. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1127-1140, 1976.
- /11/ SMITH, W.L.: Satellite techniques for observing the temperature structure of the atmosphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **53**, 1074-1082, 1972.