

Sl. 81. Nesimetrična trakasta linija; iscrtano su označene vodljiva traka i vodljiva podloga koje su odvojene dielektričnim supstratom dielektričnosti  $\epsilon_r$

$\epsilon_r = 9,7$ ), politetrafluoretilen (teflon) ojačan staklenim vlaknima ( $\epsilon_r = 2,17 \dots 2,32$ ) i silicij ( $\epsilon_r = 11,7$ ). Elektromagnetski se val ne širi samo dielektrikom nego i zrakom. Zbog toga električno i magnetsko polje nisu potpuno okomiti na smjer širenja, pa se takav tip širenja naziva kvazi TEM modom. Fazna je brzina uzduž linije

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{ef}}}, \quad (212)$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti ( $3 \cdot 10^8$  m/s), a  $\epsilon_{ef}$  efektivna dielektričnost koja se razlikuje od stvarne dielektričnosti materijala, jer ovisi još o debljini dielektrika i širini vodljive trake. Karakteristična je impedancija

$$Z_0 = \frac{1}{v_p C}, \quad (213)$$

gdje je  $C$  kapacitet po duljini linije. Valna je duljina u smjeru širenja uzduž linije

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{ef}}}, \quad (214)$$

gdje je  $\lambda_0$  duljina u slobodnom prostoru. Da bi se odredila karakteristična impedancija i valna duljina, potrebno je odrediti  $C$  i  $\epsilon_{ef}$ . Za izračunavanje tih veličina postoji niz aproksimativnih jednadžbi. Te jednadžbe vrijede za niže frekvencije za koje se može pretpostaviti širenje kvazi TEM modom. Za više frekvencije  $Z_0$  i  $\epsilon_{ef}$  ovisi o frekvenciji, pa asimetrična trakasta linija postaje disperzivna. Fazna se brzina smanjuje s porastom frekvencije, pa se  $\epsilon_{ef}$  povećava, a također i karakteristična impedancija. Granična frekvencija ispod koje se može zanemariti disperzija je

$$f_0 = \sqrt{\frac{Z_0}{h \sqrt{\epsilon_r - 1}}}. \quad (215)$$

Granična frekvencija utvrđena je numerički na temelju grafičkog prikaza ovisnosti fazne brzine o frekvenciji u logaritamskom mjerilu. Iz jednadžbe (215) vidi se da linije s većom karakterističnom impedancijom imaju i višu graničnu frekvenciju. Za kraće odsječke linija gušenje se može zanemariti ako ti odsječci ne čine rezonantne sklopove kojima treba odrediti faktor kvalitete. Konstanta gušenja ovisi o dimenzijama linije, električnim svojstvima dielektričnog materijala i vodiča, te o frekvenciji. Jednadžbe kojima se određuje konstanta gušenja su složene i vrijede za određene omjere širine trake  $w$  prema visini  $h$  dielektričnog sloja. Za asimetričnu trakastu liniju karakteristično je da postoje i gubici zbog zračenja. Prikladnim dimenzijama vodljive trake mogu se ti gubici namjerno povećati, a to znači da takvi odsječci linija djelotvorno zrače, dakle da se mogu iskoristiti i kao antene. U mikrovalnim sklopovima odsječci se linija upotrebljavaju za transformacije impedancija, i to kao serijske i kratkospojone ili otvorene paralelne linije. Zbog ograničenja u izboru dielektričnosti i debljini postojećih dielektričnih materijala te nemogućnosti izradbe dovoljno uske ili dovoljno široke (širina mora biti manja od duljine) vodljive trake, karakteristične su impedancije linija  $10 \dots 200 \Omega$ .

LIT.: F. Fabri, Microwave Radio Link Design. Telettra S.p.A., Milano 1962. – F. H. Lange, Korelationselektronik. VEB Verlag, Berlin 1962. – M. R. Reed, Ultra High-Frequency Propagation. Boston Technical Publishers, Inc.,

Lexington 1964. – P. F. Panter, Modulation, Noise and Spectral Analysis. McGraw-Hill, New York 1965. – A. B. Carlson, Communication Systems. McGraw-Hill, New York 1968. – J. S. Stojanović, Osnovi telekomunikacije. Građevinska knjiga, Beograd 1973. – G. S. Hobson, The Gunn Effect. Clarendon Press, Oxford 1974. – W. C. Jakes, Microwave Mobil Communications. J. Wiley and Sons, New York 1974. – C. Carson, High-Frequency Amplifiers. Wiley-Interscience, New York 1975. – W. G. Duff, A Handbook on Mobile Communications. Don White Consultants, Germantown 1976. – R. V. Garver, Microwave Diode Control Devices. ARTECH House, Dedham 1976. – K. Heime, Laufzeit-Dioden. R. Oldenburg, München 1976. – G. Mathaei, L. Young, E. M. T. Jones, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures. ARTECH House, Dedham 1980. – E. Zentner, Radiokomunikacije. Školska knjiga, Zagreb 1980. – W. Harth, M. Claassen, Aktive Microwellendioden. Springer, Berlin 1981. – M. C. Y. Lee, Mobile Communications Engineering. McGraw-Hill, New York 1982. – G. D. Vendelin, Design of Amplifiers and Oscillators by the S-Parameter Method. J. Wiley and Sons, New York 1982. – G. Gonzalez, Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design. Prentice-Hall, New Jersey 1984. – G. Lukatela, Digitalne telekomunikacije. Građevinska knjiga, Beograd 1984. – Ch. Gentili, Microwave Amplifiers and Oscillators. North Oxford Academic Publishers, London 1986. – Z. Smrčić, Mikrovalna elektronika, Školska knjiga, Zagreb 1986.

E. Zentner

**TELEKOMUNIKACIJE, SATELITSKE, I RADIOASTRONOMIJA**, radiokomunikacije s objektima dovedenim u prostor izvan Zemljine atmosfere, kao što su umjetni sateliti, svemirski brodovi i sonde, te s objektima u Sunčevu sustavu i izvan njega koji zrače radiovalove. To se drugo područje odnosi na radioastronomiju, pasivno komuniciranje koje se ubraja u radiokomunikacije zbog postupaka i uređaja sličnih onima za satelitske radiokomunikacije. Pasivne su radiokomunikacije i satelitska daljinska istraživanja Zemlje i satelitska meteorologija.

#### SATELITSKE RADIOKOMUNIKACIJE

Razvoj raketne i mikrovalne tehnike omogućio je dovođenje različitih umjetnih satelita u putanju oko Zemlje. Tako su se oni počeli primjenjivati i u radiokomunikacijama i u stvaranju brojnih satelitskih radiokomunikacijskih službi.

Već su se prvi umjetni sateliti (v. *Sateliti, umjetni Zemljini*) mogli pratiti samo jednosmjernim komuniciranjem radiovalovima. Rješenjem mnogih problema počeli su se graditi veći sateliti koji su mogli preuzeti opremu prilagođenu potrebama za posredovanje u dvosmjernim vezama. Tome su se pridružili i sateliti koji sami sakupljaju informacije i šalju ih radiovalovima na Zemlju. Zračena snaga satelita dovoljno je velika da omogući prijam pomoću jednostavnijih uređaja, s antenama malenih izmjera. To se odnosi u prvom redu na prijam radiodifuzijskog programa (v. *Elektronika, uređaji*, TE 4, str. 690, v. *Sateliti, umjetni Zemljini*) ili na dvosmjerne radioveze s brodovima.

Kao što je to općenito u radiokomunikacijama, i u satelitskim je komunikacijama mjerilo za uspješnost komuniciranja rezultat bilance radiokomunikacijske veze. To je odnos pozitivnih i negativnih činilaca koji označuju dijelove sustava, dakle uređaje i sredstvo u kojem se radiovalovi šire.

Pri vezama s objektima izvan Zemlje radiovalovi se rasprostiru dijelom u Zemljinoj atmosferi, a pretežno u slobodnom prostoru. Niži dio atmosfere uzrokuje gubitke koji se mijenjaju s promjenama prilika u tom dijelu sredstva, s frekvencijom i s kutom pod kojim se s mjesta prijama vidi satelit. Gubici se, po vrijednosti i udjelu vremena, uzimaju u obzir na način dan međunarodnim preporukama, posebnim za pojedine službe (v. *Telekomunikacije, radiokomunikacije*). Za frekvencije niže od  $\sim 2,5$  GHz, na rasprostiranje radiovalova utječu i pojave u ionosferi. To su lom, Faradayevo zakretanje ravnine polarizacije, promjene amplitude, faze, polarizacije i upadnog kuta radiosignalâ koji prolaze kroz ionosferu te apsorpcija u ionosferi.

Prostiranje radiovalova u slobodnom prostoru popraćeno je gubitkom ili gušenjem. Gušenje je jednoznačno određeno

udaljenošću  $d$  između izvora (odašiljača) i prijavnika te dužinom vala  $\lambda$ , a dano je omjerom snage na ulazu u prijavnika  $P_p$  i snage na izlazu odašiljačkog sustava (izračena snaga)  $P_o$ . U satelitskim komunikacijama u užem značenju to su obično snage u ravnini antene. Taj je omjer uvijek manji od jedan:

$$l = \frac{P_p}{P_o} = \frac{1}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (1)$$

Prvi je član izraza (1) gubitak zbog raspršivanja, a drugi je efektivna površina izotropnog radijatora. Prvi je član neovisan o frekvenciji i pokazuje da se ne radi o gubicima u uobičajenom značenju, zbog kojih se sredstvo zagrijava. Te je gubitke u slobodnom prostoru uobičajeno navoditi kao pozitivnu vrijednost u obliku

$$L = 10 \lg \frac{P_o}{P_p} = (92,44 + 20 \lg \frac{\alpha}{\text{km}} + 20 \lg \frac{f}{\text{GHz}} - G_o - G_p) \text{dB}, \quad (2)$$

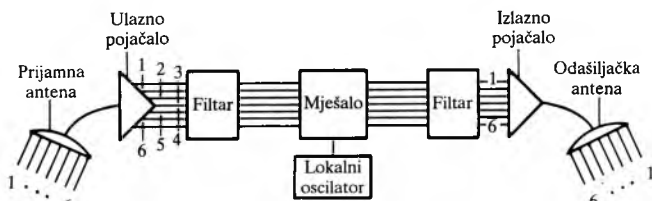
gdje je  $d$  razmak između antena,  $f$  frekvencija, s  $G_o$  i  $G_p$  su dobici objiju antena.

Za izotropni radijator i frekvenciju 1 GHz, gušenje bi do satelita na visini 900 km iznosilo 150 dB, a u radioastronomiji do zvijezde Centaur A 365 dB. Za usmjerene veze na Zemlji, bez utjecaja sredstva i tla te uz tipičnu udaljenost 50 km, gušenje iznosi 126 dB. Tom osnovnom gušenju, određenom izrazima (1) i (2), treba dodati i selektivno gušenje u atmosferi i ionosferi.

### Stalne satelitske službe

Satelitske radiokomunikacije održavaju se između zemaljskih stanica koje se nalaze na određenim stalnim mjestima, uz upotrebu jednog ili više satelita. U satelitsku radiokomunikacijsku službu mogu se uključiti i međusatelitske veze kao dio međusatelitskih službi. Stalna satelitska služba može biti i služba za veze u drugim radiokomunikacijama u prostoru.

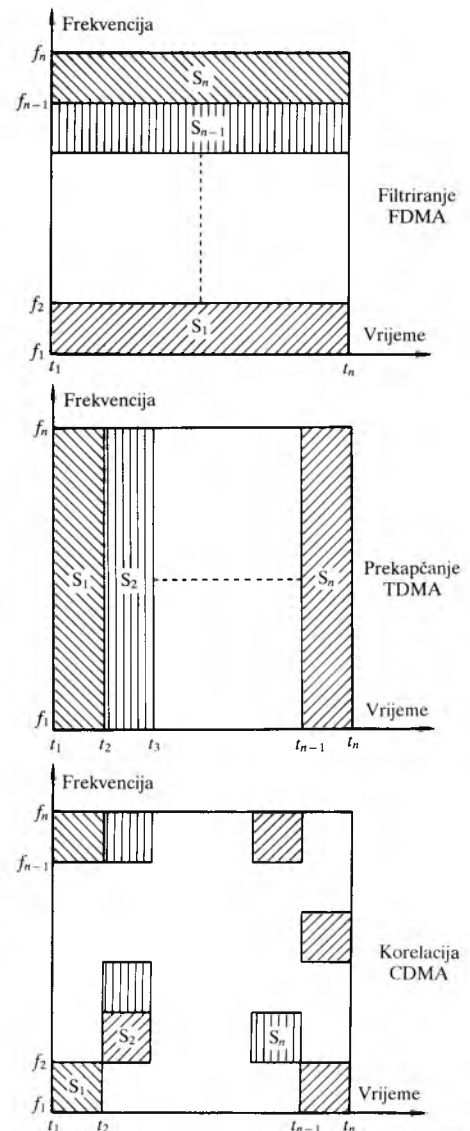
Za satelitske je službe karakteristično da su komunikacijski zahtjevi rasli brže od tehničkih mogućnosti (kapaciteta, a time i veličine satelitske platforme koja je nosilac opreme) te da radiokomunikacijska oprema služi kao frekvencijski pretvarač (relejna stanica), tzv. *transparentni transponder*. Takvim se pretvaračem mijenja smjer veze, obično uz prijelaz u drugi prikladan frekvencijski pojas. Takav se transponder slikovito naziva *savijenom cijevi* (sl. 1). Način rada ne ovisi o broju pretvarača i o načinu višestrukog pristupa pretvaraču. To znači da se preko istog pretvarača na satelitu istodobno uspostavljaju veze između brojnih zemaljskih stanica. Višestruki je pristup moguć primjenom pojedinih fizikalnih parametara komunikacijskog sustava, kao što su frekvencija, vrijeme i prostor.



Sl. 1. Satelit kao pretvarač s promjenom frekvencije, odnosno kao dio tzv. savijene komunikacijske cijevi

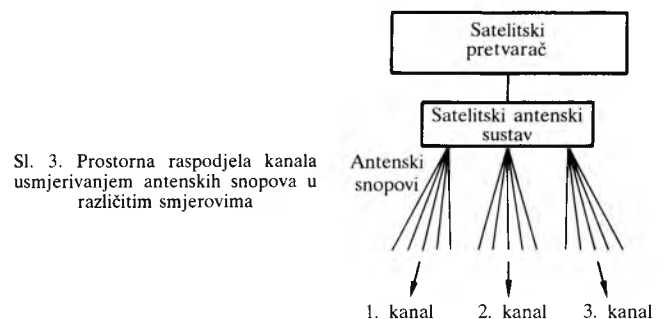
Dio se frekvencijskog pojasa pretvarača može dogovorno dijeliti u istom vremenu (sl. 2a) raznim sudionicima u komunikacijama. To je *višestruki pristup s frekvencijskom razdiobom* (engl. Frequency Division Multiple Access, FDMA). Sudionici u komunikacijama zemaljske su stanice. U njihovom se multipleksiranom signalu pojavljuje mnogo pojedinačnih korisnika. Karakterističan je postupak za takav način višestrukog pristupa frekvencijsko filtriranje.

Raspoloživa se širina kanala pretvarača može dijeliti i na vremenske odsječke (sl. 2b) koji se dogovorno stavljaju na raspolaganje zemaljskim stanicama. To je *višestruki pristup s vremenskom razdiobom* (engl. Time Division Multiple Access,



Sl. 2. Shematski prikaz pristupa više sudionika ( $S_1 \dots S_n$ ) pretvaraču na satelitu. a) pristup u istom vremenu, ali na različitim frekvencijama, b) pristup u različitim vremenima na bilo kojim frekvencijama, c) pristup u kodiranoj vremenu i na kodiranoj frekvenciji

TDMA). Karakterističan je postupak za takav višestruki pristup vremensko prekapčanje. Treći se postupak višestrukog pristupa naziva *korelacijom* (sl. 2c). Osniva se na kodiranoj razdiobi po vremenu i frekvenciji (engl. Code Division Multiple Access, CDMA, *višestruki pristup s kodiranim razdiobom*). Napredak u konstrukciji antena s vrlo uskim snopom kojim se pokriva ograničeno područje na Zemljinoj površini omogućio je da se raspoloživi frekvencijski pojas upotrijebi više puta (sl. 3) u različitim prostorima jednog dijela mogućega globalnog pokrivanja. To je *višestruki pristup*



Sl. 3. Prostorna raspodjela kanala usmjerivanjem antenskih snopova u različitim smjerovima

s prostornom razdiobom (engl. Space Division Multiple Access, SDMA). To nije višestruki pristup u uobičajenom značenju, a u njemu se može dijeliti i vrijeme i frekvencijski spektar. Da bi se povećao prijenosni kapacitet, mogu se kombinirati navedeni načini višestrukog pristupa, ali su takvi uređaji složeniji i skuplji. Višestruki pristup i način modulacije tijesno su povezani, pa je i izbor višestrukog pristupa uvjetovan najpogodnijom upotrebom raspoložive snage i širine pojasa, uz održavanje kvalitete prijenosa u određenim granicama.

Većina satelita za stalnu satelitsku službu (krajem 1991. u geostacionarnoj putanji i dogovoreni za lansiranje bilo ih je 113) upotrebljavaju pojase s nazivnim frekvencijama 4 GHz, 11 GHz i 12 GHz za silazne te 6 GHz i 14 GHz za uzlazne veze. Za njih je i na satelitima i na zemaljskim stanicama razvijena vrlo kvalitetna oprema, dobrim dijelom uz veliku upotrebu poluvodiča. Porastom potreba, razvojem tehničkih mogućnosti i upotrebljivosti počinju se primjenjivati sve više i više frekvencije. Na višim su frekvencijama veći gubici pri prostiranju i veći je šum, pa Radiopravilnik dopušta na prijамnome mjestu mnogo veće gustoće snage za pojas 11-14 GHz od onih za pojas 3,4-7,75 GHz. Zato se na satelitu mogu i trebaju upotrebljavati odašiljači većih snaga, a na Zemlji manje stanice.

Novo se mogućnosti traže i u mijenjanju koncepcije satelitskih frekvencijskih pretvarača i načina obradbe signala. Suvremeni sateliti imaju tzv. netransparentni pretvarač, pa su neka vrsta složenih komunikacijskih centrala. Primljeni se složeni signal u satelitu demultipleksira (vraća u osnovni pojas) i ponovno multipleksira (ne nužno na isti način), uz sakupljanje pojedinih signala prema namjeni. To pojednostavnjuje i postupke na zemaljskim stanicama. Osim toga, predlaže se da se u pretvaraču signal demodulira i remodulira, da bi se pri digitalnom prijenosu signal obnovio te smanjilo djelovanje šuma i interferencije na uzlaznoj vezi. U više se zemalja (npr. SAD, Italija) razrađuje postupak obnavljanja signala, posebno radi smanjenja šuma. Omjer snaga nosioca šuma bolji je za 6-8 dB prema prijenosu s transparentnim pretvaračem. Jednim od postupaka za obnavljanje digitalnog signala (sl. 4) odvojenim se filtrima pojedini nosioci demoduliraju do podatka u osnovnom pojasu. Paralelni kanali u uzlaznoj vezi prelaze u serijski oblik multipleksa s vremenskom podjelom okvira u periodu  $T$ , i takvi se odašilju sa satelita.

Razvoj satelitskih veza omogućuje upotrebu sve manjih zemaljskih stanica. Dovoljni su paraboloidni antenski reflektori promjera od samo 1,2-1,8 m (u frekvencijskom području 14 GHz na 11 GHz ili 14 GHz na 12 GHz) te snage poluvodičkog odašiljača 1-2 W. Takve se stanice s vrlo malim otvorom antene (engl. Very Small-Aperture Terminal, VSAT) u prvom redu upotrebljavaju u SAD, a cijena im je reda vrijednosti 10000 USD. Za vezu se primjenjuje višestruki pristup s vremenskom razdiobom, a korisnici su poslovna udruženja i organizacije. Izravne se veze ostvaruju u mreži sastavljenoj od više malih stanica izravnih korisnika, zvjezdasto postavljenih oko jedne središnje veće stanice, s antenom promjera otvora reflektora 6-8 m. Komuniciranje je moguće

posredovanjem središnje stanice. Upotrebom satelitskih antena koje će pokrivati manja područja i većom zračnom snagom bit će moguće komuniciranje među stanicama VSAT s vremenom prostiranja signala upola kraćim nego uz komuniciranje s dvokratnom upotrebom središnje stanice.

Za stalne se satelitske službe razvijaju sve veće satelitske platforme da bi se mogli upotrijebiti odašiljači većih snaga i širi frekvencijski spektar.

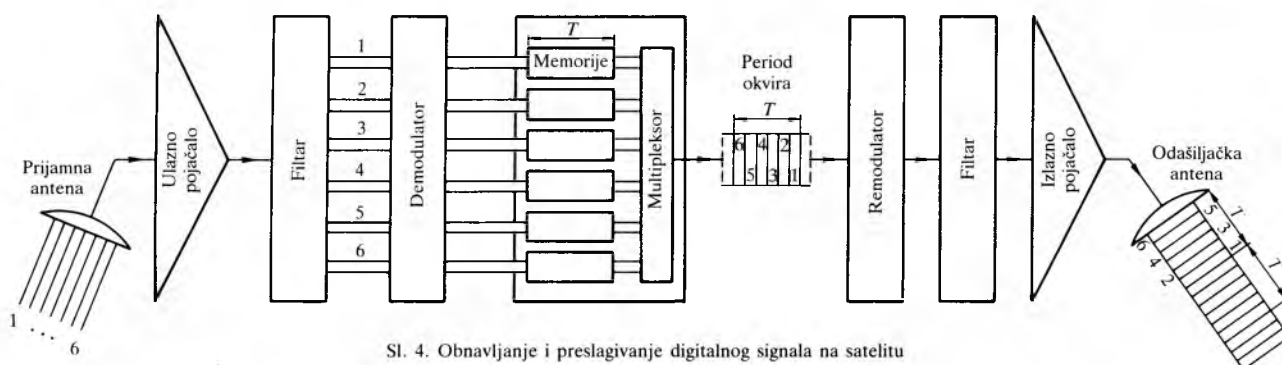
### Pokretne satelitske službe

**Pokretne pomorske službe.** Pokretne se veze u pomorstvu upotrebljavaju u različitim oblicima, kao što su poziv za pomoć, simpleksne veze među brodovima u susretu, veze u peljarskoj službi i u lukama te međunarodne dupleksne radiotelefoneke veze s automatskim biranjem sugovornika na kopnu.

Preko satelita se danas ostvaruje veliki dio pokretnih veza u pomorstvu. Zanimanje za uvođenje satelita u tu službu pokazala je Međudržavna savjetodavna organizacija za pomorsku navigaciju već 1966. godine (pred Svjetsku administrativnu konferenciju za radio 1967), pa je problem tada ušao u razmatranje i proučavanje Međunarodnog saveza za telekomunikacije (engl. International Telecommunication Union, ITU). S gledišta satelitskih radiokomunikacija pomorska pokretna služba nije u sistematizaciji organizacije ITU jedinstvena. Prema odredbama Radiopravilnika veze između plovila (brodova) i satelita dio su pokretnih pomorskih satelitskih veza, a veze između satelita i obalnih stanica dio su stalnih satelitskih veza. Za službe pokretnih pomorskih satelitskih veza dodijeljena su područja 1,530-1,544 GHz za silazne veze (od satelita prema brodu), odnosno 1,6265-1,6455 GHz za uzlazne veze (od broda prema satelitu). U Kanadi je za uzlazne veze predviđeno područje 0,4055-0,410 GHz, a u nacionalnim je granicama za uzlazne veze moguće u nekim zemljama upotrebljavati područje od 0,806-0,960 GHz. Frekvencije za vezu obalnih stanica sa satelitom jesu one iz područja stalnih satelitskih veza.

Do kraja 1989. u pomorskoj je satelitskoj službi na geostacionarnoj putanji bilo osam satelita: INTELSAT V (66°, 179°, 341,5° E) MARISAT 1, 2 i 3 (345,1°, 72,4°, 176,1° E), MARECS B2 (333,9° E) i ETS 5 (135,8° E), koji su lansirani od 1976. do 1987. godine, a za 1991. bilo je najavljeno 14 novih satelita.

Međunarodna organizacija koja je nosilac sustava za satelitske veze u pomorstvu jest INMARSAT. Sustav ima prostorni dio (sateliti i stanice za njihovo nadziranje i upravljanje), brodske stanice koje imaju pristup satelitima, obalne stanice koje preko satelita imaju vezu s brodovima, koordinacijske mrežne stanice koje vode brigu o dodjeli kanala te centar za nadzor rada. U sustavu INMARSAT predviđeni su načini modulacije i pristupa u četiri osnovne kategorije rada: telefoniji, telegrafiji, traženju (brod - kopno) i dodjeli (kopno - brod). Za telefoniju je to pojedinačni nosilac za svaki kanal s frekvencijskom modulacijom za oba smjera (kopno - brod i brod - kopno). Za telegrafiju u smjeru brod - kopno i kopno - brod to je *modulacija faznim pomakom* (engl. Phase Shift Keying, PSK) uz višestruki



Sl. 4. Obnavljanje i preslagivanje digitalnog signala na satelitu

pristup s vremenskom razdiobom (TDMA). Za traženje je u primjeni modulacija PSK sa slučajnim pristupom, a za dodjelu se primjenjuje pristup TDMA uz modulaciju PSK. S obzirom na predviđeno mijenjanje smjera gibanja broda, a osobito s obzirom na nepredvidivo valjanje i posrtanje, pokretna služba za brodove mora zadovoljavati antenskim sustavima. Zbog toga sustavi trebaju imati ograničen dobitak, odnosno širinu glavnog snopa veću od poželjne (antena s promjerom otvora reflektora 1,2 m u pojasu 1,5 GHz ima širinu snopa  $10^\circ$ ). Antenski sustavi trebaju osigurati normalne uvjete prilikom valjanja ( $\pm 30^\circ$ ) i posrtanja ( $\pm 10^\circ$ ) broda, pa i antenski nosači moraju imati potrebnu stabilizaciju, koja može biti mehanička ili električna. Uz to je potreban i prikladan sustav za traženje satelita. Zbog malog dobitka antena na brodu, granica za mjeru kvalitete prijemnog sustava (omjer dobitka antene i temperature šuma sustava, točnije razlika njihovih razina  $G - T$ ) iznosi samo  $-4 \text{ dBK}^{-1}$ . Za stanice na kopnu u pojasu 1,5 GHz ta je razlika najmanje  $32 \text{ dBK}^{-1}$ .

Uvođenjem satelita u pomorsku pokretnu službu riješio se i problem koji se ranije trajno pojavljivao, a bio je posljedica ograničenja u Radiopravilniku. Radilo se o ograničenju upotrebe pojedinih dijelova spektra samo za telegrafiju te ograničenju snage i ograničenju upotrebe veze za privatne razgovore s uključanjem u mreže na kopnu. Satelitskim je vezama omogućeno putnicima na brodu izravno uključivanje u javnu telefonsku mrežu.

**Pokretne zračne službe.** Problemi radiokomuniciranja koji nastaju zbog gibanja sugovornika u komuniciranju najjače su izraženi u pokretnim zrakoplovnim službama zato što se radi o velikim brzinama zrakoplova i velikim udaljenostima, a potrebne su i raznovrsne komunikacije. Međunarodna organizacija civilnog zrakoplovstva brine se i za izvršenje odluka međunarodnih dogovora, a trajno se brinula, među ostalim, i za radiokomunikacije u zrakoplovstvu kao jedini stvarni način komuniciranja sa zrakoplovima svih vrsta. Međunarodna unija za telekomunikacije odredila je zrakoplovne pokretne radiokomunikacije kao radiokomunikacijsku službu između stanica na kopnu i zrakoplova ili između zrakoplova. Za to im je osigurala i upotrebu radiospektra dodjelama označenim s (R) za komuniciranje unutar pojedinih geografskih područja, a s (OR) za komuniciranje između tih područja, i to u nizu frekvencijskih pojava između 200 kHz i 144 GHz. Neke od dodijeljenih frekvencija namijenjene su najkritičnijim potrebama. Za pokretne zrakoplovne službe, uz posredovanje satelitima, takve su frekvencije primjerice 1545...1559 MHz u silaznom, odnosno 1646,5...1660 MHz u 1660,0...1660,5 MHz u uzlaznom smjeru.

Sateliti se u pokretnoj zrakoplovnoj radioslužbi primjenjuju i zbog mogućnosti izbjegavanja prirodnih zapreka u komuniciranju na koje se nailazi u pokretnim zrakoplovnim vezama. Prvi je put satelit primijenjen 1965, kada je jedan civilni zrakoplov na letu iznad Tihog oceana uspostavio dvosmjernu teleprinteru vezu u području metarskih valova preko satelita SYNCOM 3 sa zemaljskom stanicom u Kaliforniji. Već u prosincu 1967. više zrakoplova uspostavilo je preko satelita ATS 1 telefonsku vezu sa zemaljskom stanicom na zapadu SAD. Kasnije je nastavljeno s pokusima pomoću satelita ATS 1 i ATS 3, a uz sudjelovanje zrakoplova iz osam zemalja. Pokusi su konačno potvrdili tehničku mogućnost stvaranja sustava pokretne zrakoplovne službe posredovanjem satelita. Veze satelit – Zemlja i Zemlja – satelit smatraju se stalnim satelitskim vezama (frekvencijsko područje 4 GHz na 6 GHz), dok se veze između zrakoplova smatraju pokretnim satelitskim vezama (1,6 GHz i 1,5 GHz). Prema Radiopravilniku za njih su u globalnoj raspodjeli predviđena frekvencijska područja, i to za silazne veze 117,975...136 MHz (R) i 1,535...1,544 GHz, a za uzlazne veze 1,6465...1,660 GHz (tabl. 1). Uključivanje satelita ima u tom području radiokomunikacija prednosti u prometu, ali i u infrastrukturi. Sa stajališta prometa povećana je pouzdanost i raspoloživost veza, povećane su mogućnosti komuniciranja pilota i općenitog nadzora prometa. S druge strane, moguć je manji razmak među zrakoplovima uz jednaku ili povećanu

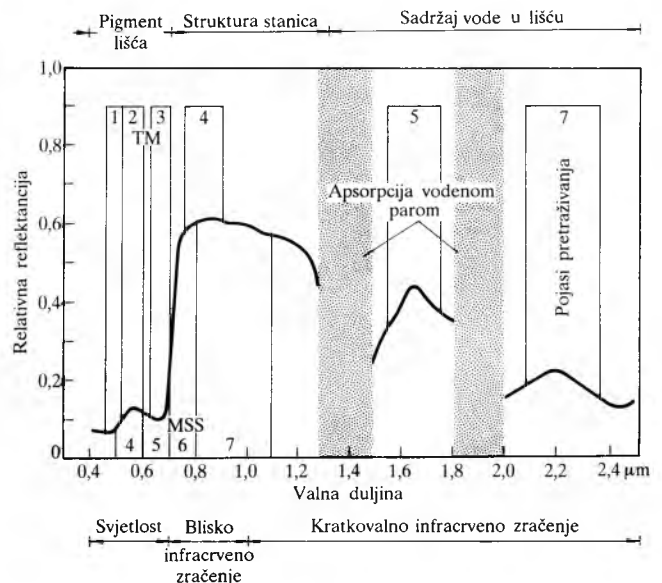
brzinu leta i razinu sigurnosti, pa su zbog toga manji troškovi upotrebe zrakoplova i kraće je trajanje putovanja, a veći je prostor za korisni teret. Prijelazom na satelitske veze i napuštanjem dekametarskih i metarskih valova smanjuje se opseg instalacija na zemaljskim dijelovima komunikacijskog sustava.

Tablica 1  
NEKI PODACI ZA POKRETNE ZRAČNE VEZE

<i>Satelit – zrakoplov</i>	
Snaga odašiljača na satelitu	20,8 dB (re 1 W)
Gubici u slobodnom prostoru	188,4 dB
Gubici u ionosferi i troposferi	0,7 dB
Temperatura šuma zrakoplova (412,3 K)	26,2 dB K
Dobitak antene zrakoplova	0,0 dB
Boltzmannova konstanta	$-228,6 \text{ dB Hz}^{-1} \text{ K}^{-1} (\text{re } 1 \text{ W})$
Omjer nosioca i šuma	34,1 dB Hz
<i>Zrakoplov – satelit</i>	
Snaga odašiljača na zrakoplovu	11,5 dB (re 1 W)
Gubici u dovodima do antene	1,5 dB
Dobitak antene zrakoplova	0,0 dB
Gubici u ionosferi i troposferi	0,7 dB
Gubici u slobodnom prostoru	189,9 dB
Omjer dobitaka i temperature šuma satelitske antene	$-15,0 \text{ dBK}^{-1}$
Boltzmannova konstanta	$-228,6 \text{ dB Hz}^{-1} \text{ K}^{-1} (\text{re } 1 \text{ W})$
Omjer nosioca i šuma	34,0 dB Hz

### SATELITSKA DALJINSKA ISTRAŽIVANJA

Daljinska se istraživanja obavljaju bez fizičkog dodira, a organizacija ITU svrstava ih u pasivne radiokomunikacijske službe, iako to ona u cjelini kao služba nisu. Nisu to bila ni prije uvođenja radarskih, aktivnih istraživanja, jer su se služila radiovalovima za dostavljanje rezultata istraživanja na Zemlju. Svjetska je administrativna konferencija o radiokomunikacijama (WARC) u Ženevi 1979. definirala satelitska daljinska istraživanja kao radiokomunikacijsku službu između zemaljskih stanica i jednog ili više satelita, koja može imati i uređaje za vezu između satelita.



Sl. 5. Spektar zračenja reflektiranog od Zemljine površine obrasle zelenim raslinjem, snimljen satelitom LANDSAT; MSS multispektralno pretraživanje, TM tematska kartografija

Daljinska se istraživanja za civilne potrebe primjenjuju u geologiji, poljoprivredi, šumarstvu, hidrologiji, oceanografiji, geodinamici, geografiji i kartografiji, arheologiji i ekologiji. Meteorologija je sa svim svojim granama izdvojena kao posebna služba koja se pretežno ograničuje na promatranje atmosfere. Svako se od područja primjene daljinskih istraživanja dijeli u uže odsjeke, koji se mogu služiti istim podacima dobivenim sa satelita, ali se ti podaci unutar pojedinog odsjeka tumače s posebnog gledišta (interpretacija). Za neke su namjene (sl. 5) pogodniji određeni dijelovi raspoloživog

spektra elektromagnetskog zračenja, pa su tome prilagođeni i uređaji za detekciju.

Početak je daljinskog istraživanja u prastarom čovjekovu iskustvu da se veće visine više vidi. Prvu priliku da napusti čvrsto tlo iskoristio je čovjek za daljinsko istraživanje Zemljine površine. F. Turnachon, poznatiji kao Nadar, snimio je 1859. iz balona napunjena toplim zrakom jedno selo u okolici Pariza. Topografska su snimanja nastavljena iz zrakoplova, posebno tijekom obaju svjetskih ratova, kada su obrazovani sposobni interpretatori zračnih snimaka. Pojavom satelita otvorile su se nove i gotovo neograničene mogućnosti istraživanja Zemljine površine i njezina omotača novim sredstvima i postupcima te slanjem informacija na Zemlju radiovalovima. Podaci se na satelitu mogu sakupljati po nekom načelu te naknadno slati na Zemlju, ali kad je potrebno, mogu se slati i tijekom snimanja, dakle u realnom vremenu. Razdoblje suvremenoga daljinskog istraživanja počinje šezdesetih godina ovog stoljeća, od kada se uz fotografiranje primjenjuju i suvremeni radiometrijski postupci, podaci obrađuju računalima, a pojavljuju se i novi načini i postupci radiokomuniciranja.

Za dobivanje što kvalitetnijih i potpunijih informacija o Zemljinoj površini i atmosferi razvijeno je više programa u Europi, Kanadi i SAD za istraživanja u proširenom mikrovalnom dijelu spektra, s prikladnim mikrovalnim sensorima. Primjena vrlo kratkih radiovalova omogućuje mnogo intenzivnije proučavanje geomorfologije, oceanografije, atmosferske vlažnosti i temperature, klasifikacije raslinja, kretanja i tipova leda na moru i hidroloških prilika na tlu.

Spektar valnih duljina namijenjen toj službi ili spektar koji ona upotrebljava kada je pasivna jest  $(0,3 \dots 15) 10^{-6}$  m, no čitavo se područje može samo djelomično upotrebljavati zbog apsorpcije u atmosferi, koja se pri promatranju Zemljine površine ne može izbjeći.

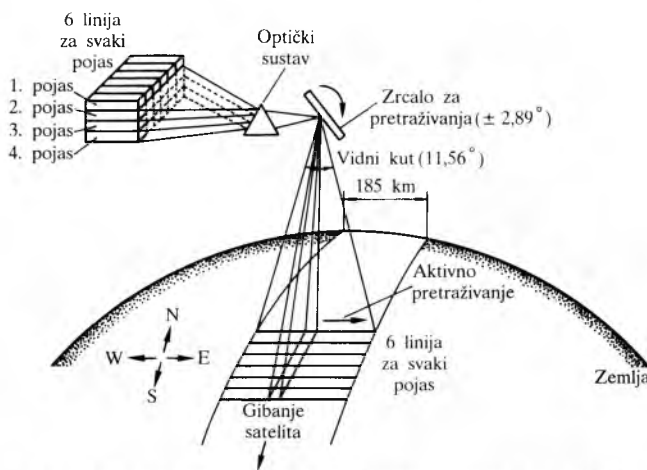
Elektromagnetsko zračenje pomoću kojeg se obavlja daljinska istraživanja potječe dijelom od Sunca (reemitirana svjetlost i infracrveno zračenje), a dijelom od Zemlje koja je izvor zračenja na temperaturi  $\sim 300$  K. Tom su širokom spektru prilagođeni i radiometri, koji su npr. na satelitima LANDSAT 4 i 5 predviđeni za 7 područja unutar valnih duljina  $0,45 \dots 12,5 \mu\text{m}$ . To se elektromagnetsko zračenje prostire djelomično i Zemljinom atmosferom koja ga propušta ili apsorbira (v. *Optičke elektrokomunikacije. Širenje atmosferom*, TE 9, str. 641). Prvi je radiometar, iako ne u tom frekvencijskom području, upotrijebio K. Jansky (1906–50), osnivač radioastronomije. Bio je to antenski sustav i prikladan prijatelj s pisacem. Pasivni su se radiometarski senzori upotrebljavali na satelitima već 1962. godine (Mariner 2 za istraživanje temperature površine Venere), a 1968. se pomoću satelita Kozmos 243 radiometrima ( $\lambda = 0,81 \dots 8,6$  cm) istraživala vodena para u atmosferi, ledeni Zemljin pokrivač i temperatura oceana. Meteorološki satelit Nimbus 5 (1972. godine) imao je 5 radiometara ( $\lambda = 0,51 \dots 1,35$  cm) i bio je prvi uređaj za sondiranje temperature po visini (izradbu temperaturnog profila), s pogreškom do  $2^\circ$  C.

Aktivni se senzori razlikuju od pasivnih po tome što sami odašilju zračenje prema predmetu koji istražuju, te ga nakon refleksije registriraju. Tri su osnovna tipa aktivnih senzora, sva tri osnovana na radaru: skaterometar, visinomjer i radarski sustavi koji oblikuju radarsku sliku. Prednost je tih uređaja što na njih ne utječu doba dana i ograničenost područja zračenja koja su na raspolaganju pasivnim sensorima. Za proučavanje Zemljine površine upotrijebljen je 1978. na satelitu SEASAT radarski uređaj SAR (engl. Synthetic Aperture Radar, *radar sa sintetskim otvorom, aperturom*), koji je davao sliku Zemljine površine s visokim razlučivanjem. Aktivni mikrovalni senzori rade u frekvencijskom području  $1 \dots 37$  GHz, s osjetljivošću od  $-164,5$  dB (re 1 W) (skaterometar za vjetar na satelitu ERS 1) do  $-130$  dB (re 1 W) (visinomjer na satelitu GEOS-C). Skaterometar ili difuziometar aktivni je senzor koji se u daljinskom istraživanju upotrebljava za određivanje brzine i smjera vjetera mjerenjem raspršivanja radiovalova uzrokovanog promjenama u atmosferi zbog vjetera.

Osnova je daljinskog istraživanja mjerenje zračenja, no mjeriti se ne može izravno, pa je uvijek potreban posrednik koji će zračenje pretvoriti u drugi, mjerljivi oblik energije, npr. u električnu energiju. Posrednik se u daljinskim istraži-

vanjima naziva osjetilom ili *senzorom* (v. *Fotometrija*, TE 5, str. 608).

Pri istraživanjima Mjeseca u vidljivom dijelu spektra (misija Ranger) snimačkom cijevi *vidikon* (v. *Televizija u boji*) male mase i malih izmjera, pretvorena je ta cijev, namijenjena u prvom redu za industrijsku televiziju, u prvi senzor koji je davao cjelovitu sliku na satelitima LANDSAT 1 do 3, posebno u poboljšanoj izvedbi RBV (engl. Return Beam Vidicon, *vidikon s povratnim snopom*). Za razliku od vidikona, koji daje sliku *elektronskim pretraživanjem*, tzv. otipkavanjem (engl. scanning), u 1960. stvorene su mogućnosti preciznog optičko-mehaničkog pretraživanja vidnog polja, pri čemu se dobivaju vrlo točne radiometrijske informacije iz raznih dijelova spektra. Prvi su put takvi senzori primijenjeni na satelitima u sklopovima za *multispektralno pretraživanje* (engl. Multispectral Scanner System, MSS) (sl. 6). Informacije su se dobivale u 4 spektralna pojasa ( $\lambda = 0,5 \dots 1,1 \mu\text{m}$ ) pomoću sklopa sa 4 senzora složena u 4 reda, koji istodobno detektiraju podatke iz 6 supsatelitskih pojava na Zemljinoj površini, širine 79 m i duljine 185 km. Zrcalo na koje pada slika te površine oscilira oko srednjeg položaja i pretražuje sliku Zemljine površine te šalje elemente slike na 6 senzora za svaki dio spektra. Za vrijeme jednog pretraživanja supsatelitska se točka pomakne za  $6 \times 79$  m.



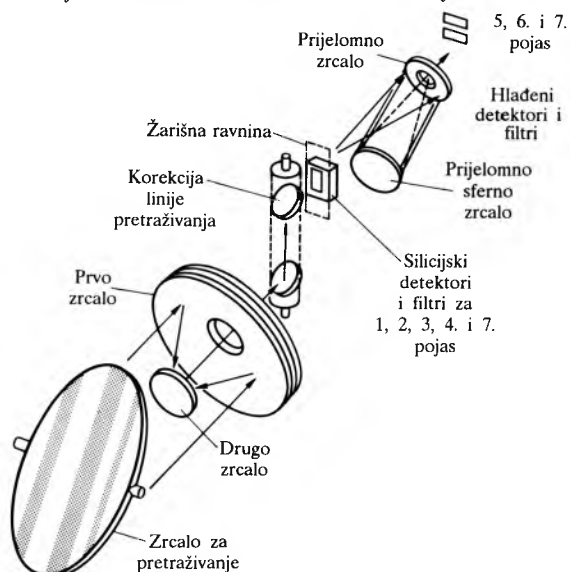
Sl. 6. Shematski prikaz sustava za multispektralno pretraživanje (MSS)

Sateliti za daljinska istraživanja imali su gotovo kružnu i polarnu putanju. Putanja satelita LANDSAT 3 imala je, npr., srednju visinu 913 km, s nagibom oko  $99^\circ$ , i bila je gotovo sinkrona sa Suncem. To znači da je trag satelita prelazio preko bilo kojeg mjesta na Zemljinoj površini u isto lokalno vrijeme, odnosno da je satelit u ponavljanim prijelazima »gledao« dijelove Zemlje na jednakim geografskim širinama pod gotovo jednakim uvjetima. Ti se uvjeti mijenjaju s meteorološkim prilikama, a u duljim razmacima i s godišnjim dobima. Zbog toga neke od snimaka često nisu upotrebljive.

Uz zaokružene nazivne vrijednosti parametara putanje, vrijeme obilaska satelita LANDSAT 3 iznosi 103,3 min, a za to vrijeme supsatelitska točka na ekvatoru prijeđe 2868 km. Za 24,094 h satelit obide Zemlju 14 puta, a točka na ekvatoru za to se vrijeme jednom okrene oko Zemljine osi i prijeđe daljih 158,3 km. Kako je  $2868:158,3$  približno 18, može se reći da se supsatelitske točke vraćaju na isti trag nakon 18 dana, pa će satelit s tim vremenskim periodom ponovno prelaziti preko pojasa koje je već snimio. Udaljenost između prostorno susjednih tragova na ekvatoru iznosi 168,7 km. Kako je područje aktivnog pretraživanja široko 185 km, ispitivana će se područja preklapati. Preklapanje će biti to veće što je veća geografska širina područja. Za ostale satelite vrijede drugačiji odnosi zbog razlike u početnim uvjetima (npr. visina putanje), ali se princip snimanja ili pretraživanja površine u vidnom polju ne mijenja.

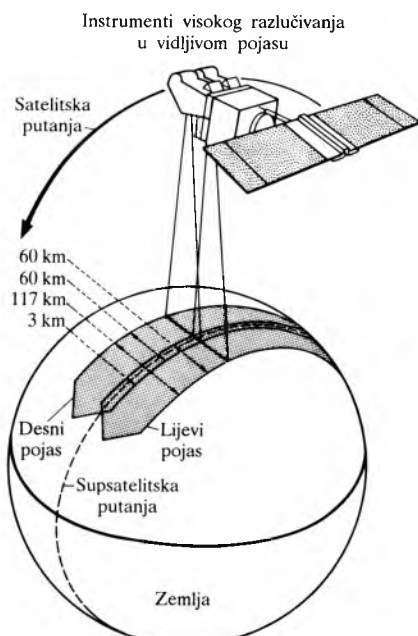
Optički sustav za *tematsku kartografiju* (engl. Thematic Mapper, TM) (sl. 7) prati supsatelitski pojas širi od 30 m

(pojas je u sustavima MSS širok 82 m u sva četiri frekvencijska pojasa), osim za reflektirano infracrveno zračenje, za koje pojas iznosi 120 m. Taj je sustav postavljen na satelitima tipa LANDSAT, počevši od satelita LANDSAT 3. Dalji su napredak *modulni optoelektronički multispektralni sustavi pretraživanja* (engl. Modular Optoelectronic Multispectral Scanner, MOMS) sa 6912 elementarnih senzora. Taj je sustav doveden u putanju oko Zemlje svemirskim letjelicama Space Shuttle (STS 7 sredinom 1983, STS 11 početkom 1984), a istraživalo se s visine od 300 km. Sustav je snimao po 30 minuta na magnetoskopske vrpce, pa je snimljena pruga dugačka više od 14000 km, odnosno ~200 »scena« supsatelitskih izmjera 140 km × 140 km, uz razlučivanje 20 m.



Sl. 7. Shematski prikaz sustava za tematsku kartografiju (TM)

Francuski satelit SPOT sastoji se od dva jednaka sustava koji se mogu nezavisno, nalogom sa Zemlje, nagibati do 29° udesno ili ulijevo od traga satelita. Time se područje promatranja može proširiti sa 60 km na 120 km, a stereosnimke se mogu dobiti za 24 sata (sl. 8). Senzori se sastoje od niza slogova poluvodičkih elemenata koji su na izlaz vezani nabojem (engl. Charge Coupled Device, CCD) (v. *Televizija u boji*). Vidno je polje instrumenata dvostruko, a razlučuju



Sl. 8. Satelit SPOT s dva nezavisna sustava za daljinsko istraživanje

se elementi (engl. pixel) supsatelitskih izmjera 20 m × 20 m u tri spektralna područja, a 10 m × 10 m kad je snimanje pankromatsko. Visina je putanje tog satelita 832 km i on se vraća na isti trag svakih 26 dana, te prelazi ekvator (silazni čvor) u 10,30 h po lokalnom vremenu. Budući da su sustavi s instrumentima pomični, može se isto područje na ekvatoru promatrati osam puta u 26 dana. Na satelitu se nalaze i dva uređaja za širokopojasno snimanje na vrpce podataka iz senzorskog sustava. Podaci se mogu reproducirati na traženje iz upravljačkog centra. Snimanje traje najviše 22 minute.

Unatoč velikim pokazanim mogućnostima pasivno je daljinsko istraživanje ograničeno činjenicom da se na kvalitetu primljenog signala ne može utjecati i da mu je na raspolaganju samo zračenje izravno odaslano sa Zemlje ili od nje reflektirano, dakle u ograničenom dijelu spektra i s ograničenom snagom. Utjecaj pojedinih zapreka (oblaci, oborine, primjese u zraku) ovisi o dijelu spektra i uvjetima prostiranja tog zračenja. Mnoga su od tih ograničenja uklonjena primjenom aktivnog daljinskog istraživanja, tako da se signal odašilje sa satelita i da se registrira zračenje reflektirano s promatrane površine. Zračenje nižih frekvencija prodire kroz Zemljinu površinu i reflektira se na slojevima i do nekoliko metara ispod površine. Dubina prodiranja definira se snagom koja iznosi 1/e, odnosno 36,8% snage na površini, a ovisi o valnoj duljini i vlažnosti tla. U tu se svrhu primjenjuje radar i mjeri primljena snaga  $P_p(\vartheta)$ , za koju prilagođena radarska jednadžba (v. *Elektronika, uređaji. Radar*, TE 4, str. 697) glasi

$$P_p(\vartheta) = P_o \sigma_{op}(\vartheta) \frac{g^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}, \quad (3a)$$

a iz toga je

$$\frac{P_p(\vartheta)}{P_o} = 5 \cdot 10^{-4} \left( \frac{g \lambda}{R} \right)^2 \sigma_{op}(\vartheta), \quad (3b)$$

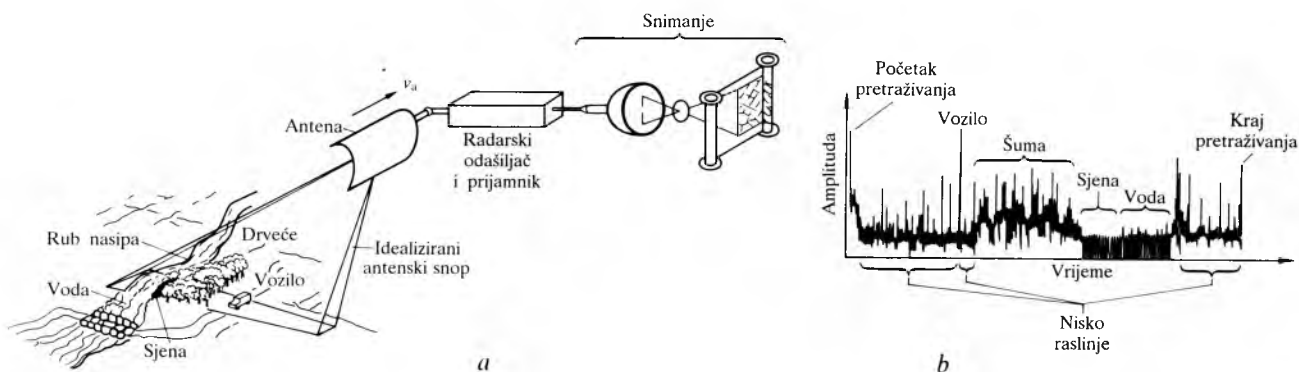
gdje je  $P_o$  odaslana snaga,  $\sigma_{op}(\vartheta)$  koeficijent raspršivanja na površini na kojoj se snop reflektira u smjeru  $\vartheta$ ,  $\vartheta$  kut između smjera reflektiranog snopa i spojnice satelit – supsatelitska točka,  $g$  dobitak antene u tom smjeru,  $\lambda$  valna duljina, a  $R$  visina satelita iznad tla. Vrijednost u zagradi izraza (3b) ovisi o uređaju i prostiranju i nema utjecaja na raspodjelu koeficijenta  $\sigma$ . To znači da vrijednosti primljene snage sa susjednih elementarnih, različitih površina ovise samo o razlici njihovih koeficijenata raspršivanja. Ako je radar koji daje sliku kalibriran u apsolutnim vrijednostima, on može izravno prikazati sliku raspodjele  $\sigma$ , dakle svojstva istraživanog zemljišta.

Radari koji u daljinskom istraživanju služe za stvaranje slike raspodjele  $\sigma$  nalaze se na pomičnim objektima koji se gibaju iznad terena i snimaju ga bočno, a ne u smjeru svog gibanja (engl. Side Locking Airborne Radar, SLAR). U smjeru gibanja antena ima uski snop, a u smjeru okomitom na smjer gibanja široki snop. Zbog toga antenski snop prelazi po Zemljinoj površini uskim dugačkim tragom, već prema tome kako se giba nosilac antene. Ako se zračen signal ne mijenja, npr. modulacijom ili na koji drugi način, razlučivanje će biti jednako površini što je pokriva antenski snop. Zbog male površine platforme koja nosi antenu, dakle zrakoplova ili satelita, ograničene su i njezine izmjere, pa je trag snopa na Zemljinoj površini dugačak nekoliko kilometara, a širok samo nekoliko desetaka metara. Razlučivanje po duljini traga može se povećati odašiljanjem kratkih impulsa. Tada razlučivanje po duljini iznosi

$$r_d = \frac{c \tau}{2 \sin \vartheta}, \quad (4)$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti,  $\tau$  trajanje impulsa, a  $\vartheta$  bočni vidni kut.

Razlučivanje po širini ovisi o širini antenskog snopa u smjeru gibanja i širini impulsa u okomitom smjeru. Ono se postiže *radarima sa stvarnim otvorom antene* (engl. Real Aperture Radar, RAR). Postupak je shematski prikazan na sl. 9. Istraživanje terena u bočnom smjeru provodi se brzinom



Sl. 9. Daljinsko istraživanje pomoću radara sa stvarnim otvorom antene. *a* shema snimanja, *b* snimljeni reflektirani signal

svjetlosti, a u smjeru gibanja brzinom  $v_a$  platforme (za satelit na visini 900 km  $v_a \approx 7400$  m/s).

Radari sa sintetskim otvorom (SAR) mogu povećati razlučivanje i bez povećanja izmjera antene (v. *Elektronika, uređaji. Radar*, TE 4, str. 706). Podaci o fazi i amplitudi vraćenog signala pohranjuju se za niz impulsa koji pokrivaju sintetski otvor duljine jednake razlučivanju stvarnog otvora u uzdužnom smjeru. Obradbom pohranjenih impulsa dobiva se slika u kojoj razlučivanje u smjeru gibanja može biti jednako polovini stvarne izmjere antene u tom smjeru. Neovisno o udaljenosti, razlučivanje je u uzdužnom smjeru uvijek jednako, no potrebna je kvadratična fazna korekcija signala koji se primaju različitim dijelovima sintetskog otvora.

Radari su se u daljinskom istraživanju prvo primjenjivali u oceanografiji, pa je tako satelit SEASAT, namijenjen promatranju oceana, imao radarski visinomjer i radarski skaterometar u 10. pojasu (3–30 GHz). Radar sa sintetskim otvorom frekvencijski se nalazio u sredini 9. pojasa (300–3000 MHz). Satelit je bio na visini 800 km, s nagibom putanje 108° i trajanjem obilaska 100,75 min (dnevno 14,33 obilazaka). Radarski visinomjer i skaterometar radili su samo kad je satelit bio nad morem.

Europska svemirska agencija (ESA) pripremila je kao prvi u seriji satelit ERS 1 (engl. Earth Remote Sensing, daljinsko istraživanje Zemlje) za oceanografska istraživanja i bolje upoznavanje obalnih područja. Satelit je na visini ~770 km, sinkron je sa Suncem (silazni čvor 10,15 h), s točnošću ponavljanja traga 1 km. Instrumenti za daljinska istraživanja su radar SAR, radarski visinomjer i skaterometar, mikrovalni sonder i laserski reflektometar. Satelit ima i neke posebne zadatke, npr. određivanje radijalne komponente putanje satelita s točnošću reda vrijednosti 0,1 m.

Za posebne je zadatke pripreman i kanadski satelit RADARSAT, namijenjen za predviđanje položaja ledenih santi na moru, kao pomoć pri određivanju pomorskih putova, opažanjima koja služe u poljoprivredi, šumarstvu i hidrologiji te ažuriranju geoloških karata. Oprema je satelita radar SAR, skaterometar i optički instrumenti. Radiometar s vrlo velikim razlučivanjem odlikuje se razlučivanjem od 1,1 km u svakome od svojih šest optičkih i infracrvenih područja. Modulni optoelektronički multispektralni sustav ima 4 optička kanala, širinu pojasa promatranja 400 km i razlučivanje 30 m. Predviđeno je da radar SAR radi do 20 min (oko 1/5 putanje), a do 8 min (oko 1/12 putanje) kada je satelit u Zemljinj sjeni. Satelit se giba sinkrono sa Suncem, po gotovo polarnoj, kružnoj putanji, s trajanjem obilaska 105,2 min i sa srednjom visinom 1004 km, a potpuno se pretraživanje Zemlje ponavlja svakih 16 dana.

Japanski satelit MOS 1 namijenjen je u prvom redu promatranju morske površine i zbivanja u atmosferi. To je pokusni satelit koji treba provjeriti svojstva uređaja koje nosi, a to su multispektralni radiometar s elektronskim samopretraživanjem, radiometar za vidljivi i toplinski infracrveni dio spektra, mikrovalni radiometar s pretraživanjem i dr. Satelitu je zadatak sakupljanje podataka s više platformi, a informacije šalje na Zemlju u dva frekvencijska pojasa (2 GHz i 8 GHz).

Nazivna je visina satelita 900 km, potpuno se pretraživanje Zemlje ponavlja svakih 17 dana, a lokalno je vrijeme silaznog čvora između 10 h i 11 h. Taj će pokusni satelit biti zamijenjen satelitom JERS (engl. Japanese Earth Resource Satellite).

Uređajima povećanih mogućnosti za aktivno daljinsko istraživanje potrebne su veće snage pogonskih izvora (suncanih baterija), pa je zato i aktivnost pokusnoga kanadskog satelita ograničena na po 20 min. Satelitima će u budućnosti trebati velika pouzdanost i trajnost uređaja, a onima za posebne namjene i mogućnost bočnog snimanja pod različitim kutovima (stereosnimanje), multispektralni rad i mogućnost prijenosa velike količine podataka. Dio se tih zahtjeva rješava razvojem poluvodičkih pojačala u području decimetarskih i centimetarskih valova i novim tehničkim postupcima integriranih antena-pojačala, raspoređenih u velikom broju (nekoliko stotina) u ravnini. Mogućnost prijenosa mnoštva informacija mora se naći uz poštivanje granica za najveću dopuštenu razinu spektralne gustoće toka zračenja, koja prema Radiopravilniku i prema preporuci CCIR broj 358 iznosi  $-140 \text{ dBm}^{-2} (4 \text{ kHz})^{-1} (\text{re } 1 \text{ W})$  uz upadni kut  $29^\circ \dots 90^\circ$  u području 8025–8400 MHz, u kojemu se informacije šalju na Zemlju. Trebat će također tražiti i područja za komuniciranje u kojima bi spektralna gustoća toka na Zemlji omogućila izravnim korisnicima prijam pomoću jeftinijih prijemnih uređaja. To jednako vrijedi i za područje 20 GHz u kojemu sada najveća dopuštena spektralna gustoća toka iznosi  $105 \text{ dBm}^{-2} \text{ MHz}^{-1} (\text{re } 1 \text{ W})$ .

Daljinsko se istraživanje Zemlje razvilo u multidisciplinarnu znanstvenu granu. Podaci koji se dobivaju takvim istraživanjem mogu se davati korisnicima uz naknadu, ali bi trebali služiti i općem dobru radi zaštite okoliša u širokom smislu. Komercijalizacija je daljinskih istraživanja uzrokovala nastajanje satelita SPOT, RADARSAT i MOS. I u drugim se zemljama nastoje ostvariti vlastiti sateliti za primjenu u opće humanitarne svrhe (zapažanje šumskih požara, onečišćenja mora i sl.).

### SATELITSKA METEOROLOŠKA SLUŽBA

U suvremenoj meteorologiji Zemljin se zračni omotač istražuje pomoću satelita, a satelitsko je daljinsko istraživanje i započelo u meteorologiji. Radiopravilnikom se ta služba označuje kao daljinsko istraživanje sa satelita u meteorološke svrhe, a dodijeljeni su joj posebni radiofrekvencijski pojasi. U satelitskoj se meteorološkoj službi zbog brze promjene predmeta promatranja učestalo promatra bez velikog razlučivanja. Time se meteorološko istraživanje razlikuje od daljinskih istraživanja u užem smislu, koja su manje učestala jer se predmet istraživanja sporije mijenja, ali je potrebno veće spektralno i prostorno razlučivanje.

Postupci promatranja i sakupljanja podataka pomoću meteoroloških satelita slični su postupcima daljinskog istraživanja Zemljine površine. Radiometarskim se sustavima s prikladnom optičkom opremom snimaju promjene u atmosferi, i to u vidljivom i infracrvenom dijelu spektra. Pritom se mogu snimati i profili (razdioba po visini) temperature i udjela vodene pare u atmosferi.

Meteorološki se sateliti gibaju po različitim putanjama. U SAD je 1960. god. nacionalna administracija za istraživanje oceana i atmosfere započela sa serijom satelita TIROS (engl. Television Infrared Observation Satellite) u gotovo polarnoj putanji visine 870 km. Oni su mjerili temperaturu površine, pokrivenost oblacima i raslinjem, temperaturne profile i raspodjelu ozona u atmosferi. SSSR je, počevši od 1969. godine, postavio seriju satelita također u gotovo kružnu i polarnu putanju na visini ~1000 km, koji gotovo sinkrono sa Suncem obilaze cijelu Zemlju i daju globalnu sliku oblaka i površine pod njima u infracrvenom dijelu spektra.

U razdoblju od 1975–87. u SAD je lansirano šest satelita u geostacionarnu putanju na položajima između 223,9° i 296,0°E, i oni se, uz poblizu oznaku, nazivaju GOES (engl. Geostationary Operational Environmental Satellite). Godine 1987. postavljen je satelit GOES 7 u gotovo geosinkronu, kružnu i ekvatorijalnu putanju, visine 33363–36408 km, s nagibom 0,6°. Po njoj satelit obilazi Zemlju za nešto više od 23 sata. Od 1977–89. Japan je postavio četiri geostacionarna satelita (GMS-ETS) na položaje između 129,9° i 167,6°E, a Europska svemirska agencija postavila je od 1981–89. tri satelita METEOSAT na položaje 10°, 349,2° i 354,9°E. Tim se satelitima pridružuju i oni iz SSSR (planirani su GOMS 2 na 166°, GOMS 2M na 166°E, GOMS 1M na 342°E i GOMS 1 na 346°E) te iz Kine (FENG YUN na 105°E). Na taj se način pokriva Tih ocean i istočni dio Azije, Sjeverna i Južna Amerika, Atlantski ocean i Europa te zapadni dio Azije.

S geostacionarnog se satelita (v. *Elektronika, uređaji. Satelitske komunikacije*, TE 4, str. 692) vidi gotovo polovina Zemljine kugle (središnji je kut vidljive kalote 162°, a površina  $217 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>), i to na udaljenosti koja je na rubu vidljivog područja 41600 km, a u sredini 35780 km.

Glavna su područja djelovanja meteoroloških satelita: snimanje Zemljina oblačnog pokrivača, mjerenje temperature gornje strane oblaka i površine mora, mjerenje vlažnosti gornje troposfere, određivanje karakteristika vjetera, sakupljanje podataka s međunarodnih promatračkih stanica, zrakoplova, brodova, satelita u nižim putanjama, sve u vidnom području satelita. Posebno su važni podaci o prirodnim opasnostima kao što su orkan, tornado, iznenadne poplave i veliki valovi uzrokovani potresima (tsunami).

Podaci se sakupljaju senzorima koji npr. na satelitu METEOSAT rade u tri spektralna područja: 0,4–1,1 μm (reflektirana sunčana svjetlost), 10,5–12,5 μm (infracrveni dio spektra), 5,7–7,1 μm (pojas apsorpcije infracrvenog zračenja vodenom parom). Razlučivanje je u supsatelitskoj točki u prvom od tih područja 2,5 km, a u druga dva po 5 km.

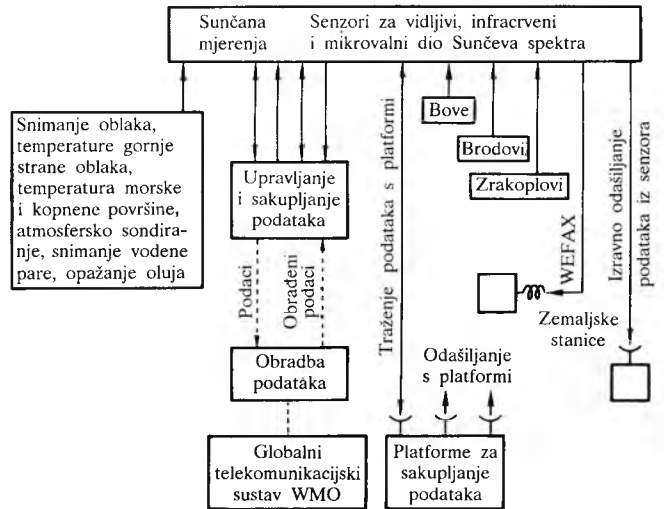
Satelit METEOSAT, kao tipični primjer meteorološkog satelita (sl. 10), zamišljen je i izrađen u Europi. Stepeničasta je i valjkasta oblika, visine 3,2 m i promjera najvećeg valjka 2,1 m, s masom u putanji 300 kg. U unutrašnjosti su satelita, uz radiometrijske i radiokomunikacijske uređaje, spremišta s pogonskim sredstvom koje bi satelitu omogućilo pet godina održavanja položaja na putanji. Stabilizacija, tj. održavanje vlastite osi paralelnom s osi Zemlje, postiže se okretanjem satelita oko osi kutnom brzinom od 100 okretaja u minuti, čime se postiže usmjerenje prema supsatelitskoj točki s točnošću od 0,3%. U tom ritmu satelit pretražuje i svoje područje vidljivosti s istoka prema zapadu. Stupnjevitim se pomicanjem radioteleskopa u pravcu sjever – jug u 25 minuta pretraži cijela površina koja se sa satelita može vidjeti. Da bi se posredstvom antene za slanje informacija, uz potreban dobitak, mogla trajno osiguravati veza sa zemaljskom stani-



Sl. 10. Meteorološki satelit METEOSAT

com, mora se antenski sustav jednakom kutnom brzinom okretati u protivnom smjeru. Na satelitima za stalne satelitske veze često se primjenjuje mehaničko okretanje antena. Na satelitu METEOSAT okretanje antene nadomješteno je električnim prekapčanjem antena na njegovu plaštu. Elementarnih 128 antena složeno je u 32 stupca po plaštu valjka promjera 1,2 m. Iz odašiljača se istodobno napaja po 20 elemenata koji su upravo usmjereni prema Zemlji, uz progresivno mijenjanje amplitude napajanja. Prekapčanje je antena sinkronizirano s okretanjem satelita oko osi. Za odašiljanje s meteoroloških satelita dodijeljeno je sedam frekvencijskih pojava u području između 137 MHz i 7550 MHz, a za odašiljanje prema satelitima predviđeno je područje 8175–8215 MHz. Satelit METEOSAT odašilje signal zemaljskim stanicama u frekvencijskom području 1,7 GHz. Na njemu su još dva antenska sustava na koje se priključuju sustavi za primanje i odašiljanje. U normalnim uvjetima satelit istodobno preko antene s protuokretanjem odašilje pet signala u pojasu 1670–1690 MHz.

Suvremeni meteorološki sateliti odašilju dvije vrste meteoroloških podataka. Jedni su na primjeren način priređeni podaci iz satelitskog radiometrijskog sustava, a drugi su podaci obrađeni i priređeni u zemaljskoj stanici, sa svim potrebnim korekcijama. Podaci se šalju na satelit, a odatle neposrednim korisnicima, koji ih kao gotove slike većeg ili manjeg područja primaju jednostavnijim prijemnim uređajima.



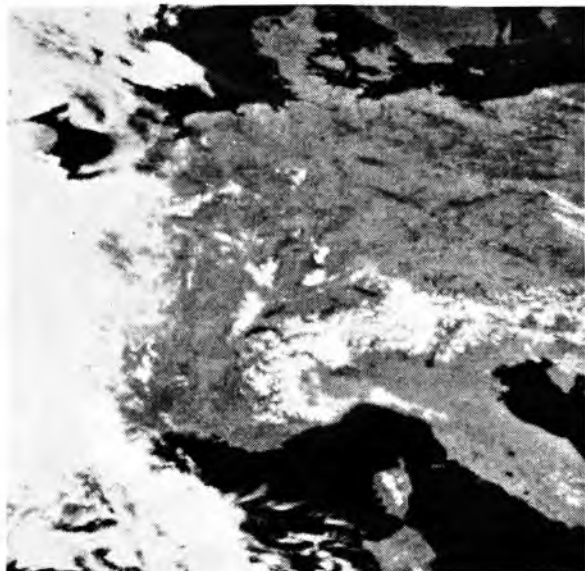
Sl. 11. Radna shema meteorološkog satelita

Osim podataka koje senzori satelita sakupljaju izravno, satelit dobiva informacije s platformi za sakupljanje podataka, s brodova, zrakoplova ili drugih stanica (sl. 11). Platforme odašilju podatke ili stalno ili odgovarajući na upit sa satelita. Sakupljene podatke i odgovore satelit šalje stanici za upravljanje i sakupljanje podataka, a ona ih upućuje centru za obradbu. Obradjeni i priređeni podaci šalju se na satelit koji ih u prikladnu obliku (WEFAX, engl. Weather Facsimile) šalje korisnicima, od kojih neki dobivaju i podatke neposredno iz senzora (sl. 12). Za zemaljske je stanice, koje mogu sudjelovati u raspodjeli informacija (u frekvencijskom pojasu 166 MHz), mogućnost prijama uvjetovana promjerom otvora reflektora od najmanje 0,95 m i kvalitetom prijemnog sustava određenom najmanjom vrijednošću omjera dobitka antene i temperature sustava. Ako je stupanj djelovanja antene 0,65, a temperatura sustava  $T_s = 400$  K, taj je omjer  $-4$  dB K<sup>-1</sup>.

## RADIOASTRONOMIJA

Radioastronomija je područje astronomije koje se osniva na primanju radiovalova iz svemira (v. *Astronomija*, TE 1, str. 437). S gledišta radiokomunikacija to je pasivna radiokomunikacijska služba, a sadržajno je dio astrofizike kojoj su predmet proučavanja sva svemirska tijela, od Sunčeva sustava



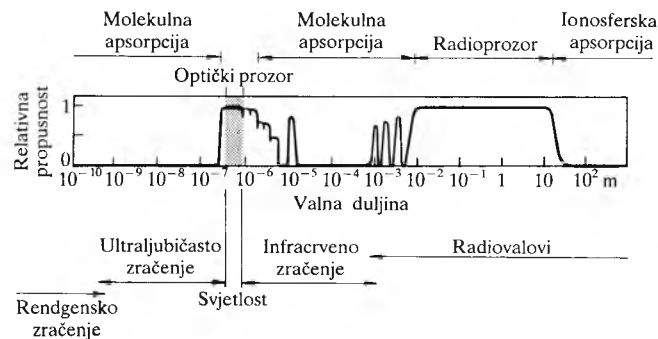


Sl. 12. Stanje oblaka nad središnjim dijelom Europe, snimljeno satelitom

do metagalaksija i prostora između njih. Opravdanje za uvrštenje u radioslužbe jest što se u radioastronomiji, kao i u radiokomunikacijama općenito, informacije prenose radiovalovima, i što su oprema, posebno ona suvremena, i postupci rada u biti zajednički radioastronomiji i satelitskim radiokomunikacijama. To su antenski sustavi s vrlo velikom usmjernošću i prijammici s vrlo niskim vlastitim šumom.

Nastanak je radioastronomije bio tijesno vezan uz radiokomunikacije. Istražujući smetnje u primanju kratkih valova K. Jansky je 1932. otkrio jednu vrstu smetnji za koju je kasnije utvrdio da potječe od vrlo jakog izvora radiovalova iz središta naše galaksije. Jansky i nastavljači njegova rada pokazali su da je izvanzemaljski prostor izvor informacija u spektru elektromagnetskih valova duljih i kraćih od onih kojima su dotada primane informacije iz tog prostora (v. *Astronomski instrumenti*, TE 1, str. 451). Ljudsko oko, s teleskopom ili bez njega, osjetljivo je na vrlo usko optičko područje elektromagnetskog zračenja od samo jedne oktave (valne duljine  $0,4 \dots 0,8 \mu\text{m}$ ). Elektromagnetsko zračenje iz svemira širokog je i neprekinutog spektra, od  $\gamma$ -zračenja do kilometarskih radiovalova. Zbog zapreka što ih na različite načine stvara Zemljin omotač (atmosfera i ionosfera) elektromagnetsko se zračenje može primati na Zemlji samo u dijelovima spektra, tzv. prozorima, što ga taj omotač propušta (sl. 13). Osim svjetlosti (v. *Optičke komunikacije*, TE 9, str. 641), ta su zračenja u granicama valnih duljina  $0,01 \dots 10 \text{ m}$  ( $\sim 10$  oktava). Prijam je moguć i na duljim (do  $150 \text{ m}$ ) i na mnogo kraćim, milimetarskim valovima, već prema trenutnoj apsorpciji u atmosferi i stanju ionosfere.

Oprema koju je upotrebljavao Jansky, iako različita po izgledu, bila je po svom sastavu u biti jednaka modernim radioteleskopima i prijammicima za satelitske komunikacije. Oprema je sadržavala usmjerenu antenu (tipa Bruce), primjenu valnoj duljini ( $14,6 \text{ m}$ ), koja se mogla okretati oko

Sl. 13. Propusnost Zemljina omotača u području valnih duljina  $10^{-10} \dots 10^2 \text{ m}$ 

vertikalne osi, zatim za tadašnje mogućnosti osjetljiv i stabilan kratkovalni prijammik te pišać priključen na njegov izlaz.

**Radioteleskopi.** Paraboloidni antenski reflektor, obično nazivan radioteleskopom, uveo je u radioastronomiju 1937. G. Reber, koji je uspješno i uz bolje tehničke uvjete nastavio radove što ih je započeo Jansky. Reber je 1944. ustanovio da je i Sunce radioizvor, na što su mnogo ranije upozoravali T. A. Edison, O. Lodge i C. Nordmann, ali tada nisu imali aparaturu kojom bi to mogli dokazati. Smetnje koje su 1942. primijećene na radarskim prijammicima britanske zračne obrane, bile su, kako se utvrdilo i tek nakon rata 1945. objavilo, konačna potvrda da je i Sunce izvor radiovalova.

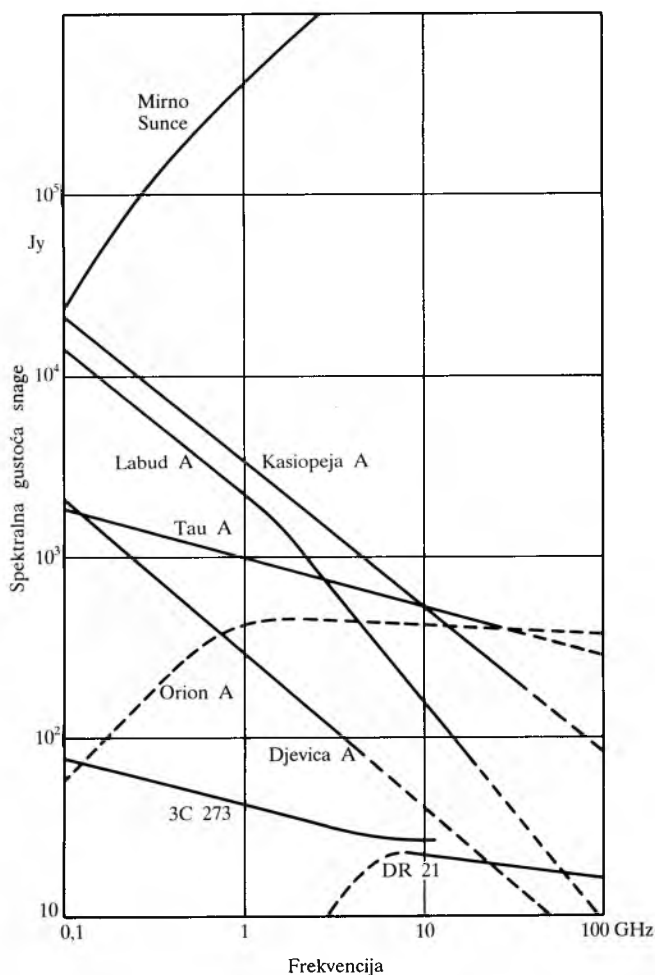
U radioastronomiji se u početku na raznim frekvencijama istraživao dio kontinuiranog spektra. U toku 1944. nagoviješteno je, a 1951. i otkriveno postojanje zračenja na točno određenim frekvencijama, npr. na liniji tzv. slobodnog, neioniziranog vodika na frekvenciji  $1420,405 \text{ MHz}$ . Napredak u gradnji radioteleskopa omogućio je 1948. otkriće Kasiopeje A, sa Zemlje najjačeg zapaženog izvora, bez optičke identifikacije. Nakon toga zapaženo je i nekoliko drugih diskretnih izvora iz naše i vanjskih galaksija. Kasnije su optički identificirane vanjske radiogalaksije kao rezultat nastojanja identifikacije diskretnih izvora, tzv. radiovizijezda. Od tada se galaksije dijele na obične i radiogalaksije. Obične su galaksije, kao i naša, izvori razmjerno slabog radiofrekvencijskog zračenja, a *radiogalaksije* su izvori izvan naše galaksije izuzetno jakog radiofrekvencijskog zračenja. Kombiniranim promatranjima pomoću radioastronomije i optičke astronomije otkriveni su 1963. *kvazari*, dotada nepoznati, vrlo udaljeni (do nekoliko stotina milijuna svjetlosnih godina) i vrlo snažni (do  $10^{38} \text{ W}$ ) zvjezdoliki izvori zračenja (engl. quasar, prema quasi stellar). Pri traženju novih kvazara (u prvih 20 godina otkriveno ih je  $\sim 1500$ ), otkriveni su 1976. *pulsari*, izvori koji odašilju vrlo kratke impulse s pravilnim periodom i stabilnošću koja je bolja od one najboljih umjetnih izvora točnog vremena. Udaljenost pulsara procjenjuje se na  $300$  do  $175000$  svjetlosnih godina. Jedno od najspektakularnijih otkrića u radioastronomiji, otkriće *izvora pozadinskog šuma* s temperaturom  $\sim 3 \text{ K}$ , rezultat je istraživanja satelitskih komunikacija (u to doba s pasivnim satelitom ECHO 1). To je preostala temperatura pratijela, od kojeg je eksplozijom na temperaturi  $10^{10} \text{ K}$ , po jednoj od kozmoloških teorija, tzv. velikim praskom nastao nama poznati svemir. Za to su otkriće, osnovano na vrlo duhovito zamišljenim mjerenjima, A. Penzias i R. Wilson dobili 1978. Nobelovu nagradu za fiziku.

Iako ima i drugih načina svrstavanja mehanizma stvaranja radiovalova, izvori zračenja kojima se bavi radioastronomija dijele se u dokumentima Međunarodnog savjetodavnog odbora za radiokomunikacije (CCIR) na tri skupine: izvori s toplinskim odašiljanjem, izvori osnovani na netoplinskim procesima i izvori s linijskim odašiljanjem.

*Izvori s toplinskim odašiljanjem* su užareni ionizirani plinovi, čvrsta tijela i mikrovalna pozadina. Pritom je gustoća snage pri odašiljanju iz ioniziranih plinova razmjerna kvadratu valne duljine, baš kao i pri zračenju crnog tijela. Iz toga slijedi naziv toplinsko odašiljanje, pa i onda kad je zračenje osnovano na drugim mehanizmima. Sljedeći su *izvori osnovani na netoplinskim procesima*, u prvom redu sinkrotronskom odašiljanju relativističkih elektrona, koji se spiralno gibaju u magnetskom polju, ali i odašiljanjem iz plazme (Sunčeva atmosfera) i odašiljanjem iz pulsara. Treća su skupina *izvori s linijskim odašiljanjem* na određenim frekvencijama, što je posljedica prijelaza između energijskih razina unutar pojedinačnih atoma i molekula.

Zračenja se prema CCIR dijele na kontinuirana, linijska, intermitentna i pulzirajuća. *Kontinuirana zračenja* razmjerno su jednolično raspoređena u frekvencijskom području dostupnom na Zemlji (sl. 14), a potječu iz pozadine s mnogim malim svijetlim područjima. Ti se diskretni izvori nazivaju i radiovizijezdama, iako, s rijetkim iznimkama kao što je Sunce, nisu vizijezde, tj. tijela s vlastitim optičkim sjajem, nego maglice iz naše galaksije i izvan nje. *Linijska zračenja* pojavljuju se

na mnogim frekvencijama precizno određenim energijskim prijelazima u atomima i molekulama. Zračenje se može promatrati i u širem pojasu kao posljedica Dopplerova efekta zbog relativnog gibanja izvora u pravcu gledanja. Zbog toga se traži i zaštita oko frekvencije linija. *Intermitentna zračenja* (tzv. *burst*) s trajanjem od nekoliko sekunda do nekoliko sati, s naglo promjenljivim frekvencijama u području 20...400 MHz, otkrivena su kao lokalizirani izvori na dijelovima Sunčeve površine, na nekim tipovima zvijezda, na Jupiteru i na nekim jakim izvorima rendgenskog zračenja. *Pulzirajuća zračenja* s pulsara dolaze, prema sadašnjim spoznajama, s neutronske zvijezde (najveće koncentracije mase). One rotiraju velikom brzinom jer su malih izmjera pa međudjelovanjem svoga magnetskog polja i plazme što ih okružuje stvaraju impulse u vremenskom razmaku od 4 sekunde do nekoliko milisekunda, a tipična je širina impulsa 5% jednog perioda.



Sl. 14. Spektralna gustoća toka nekih radioizvora

Radioizvori koji se ističu kao diskretni izvori dijele se na točkaste, lokalizirane i proširene, pri čemu kriteriji nisu oštri, a pripadnost pojedinim skupinama nije jednoznačna. Točkasti je izvor idealizacija. To je izvor s kutnom veličinom manjom od kuta glavnog antenskog snopa. Lokalizirani su izvori male ali konačne veličine, a često se nazivaju radiozvijezdama. Prošireni izvori su veći diskretni izvori, a po slobodno postavljenoj granici kutna im je veličina veća od 1°. Veliki radioizvori, koji se mogu vidjeti i pod većim kutom, diskretni su ako su im granice oštro određene.

Radioastronomija se od radiokomunikacija u uobičajenom značenju bitno razlikuje jer nema utjecaja na izvor pa ne može osigurati jači, sadržajno bogatiji i kvalitetniji signal. Stoga je upućena, bez obzira na mehanizam stvaranja, na snagu izvora i njegovu veličinu. Signal ima karakter šuma, dakle brzih, slučajnih promjena amplitude, i ne razlikuje se

od unutrašnjeg šuma prijamničkog sklopa. Pojas tog šuma mnogo je širi od propusnog pojasa prijamnika, pa je jakost signala konstantna u pojasu prijamnika.

Zračenje točkastog izvora u radioastronomiji se opisuje veličinom koja se naziva *spektralna gustoća toka zračenja* ili *spektralna gustoća snage zračenja* (jedinica  $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ), iako se često ispušta pridjev spektralni. U dokumentima CCIR ta se veličina naziva *gustoća toka snage* (engl. *power flux density*). Za plošne izvore kojima je kutna veličina veća od kutnog otvora snopa antene mjerjenje daje podatke samo za dijelove izvora. Zračenja se takvih izvora opisuju veličinom koja se naziva *spektralna zračivost*, *spektralna radijancija* ili *spektralni radiosjaj* (jedinica  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}$ ). I za tu se veličinu često ispušta pridjev spektralni, ali se po jedinici vidi da se radi o veličini za neko područje spektra. Spektralna gustoća toka po prostornom kutu izvora iznosi

$$S = \iint_{A_i} B(\vartheta, \varphi) d\Omega, \quad (5)$$

gdje je  $A_i$  površina izvora,  $B(\vartheta, \varphi)$  funkcija položaja na izvoru, a  $d\Omega = \sin\vartheta d\vartheta d\varphi$ . Ako je normirana prostorna karakteristika zračenja antene (maksimumu snage je pridružena vrijednost 1) dana s  $P_n(\vartheta, \varphi)$ , bit će promatrana spektralna gustoća toka

$$S_p = \iint_{A_i} B(\vartheta, \varphi) P_n(\vartheta, \varphi) d\Omega \quad (6)$$

manja od stvarne (5), jer karakteristika zračenja djeluje kao težinska funkcija.

Radiosjaj se može izraziti i temperaturom sjaja. Ako se radiosjaj izjednači sa snagom zračenja crnog tijela na temperaturi  $T_B$ , temperatura tog zamišljenog crnog tijela jest temperatura sjaja izvora u određenom smjeru, a veza između nje i sjaja dana je Rayleigh-Jeansovom aproksimacijom Planckova zakona:

$$B \approx \frac{2kT_B}{\lambda^2} \quad (7)$$

Iako među izvorima u svemiru (tabl. 2) ima i onih kojima je zračena snaga do  $10^{38}$  W (zračena snaga Sunca je  $10^{13}$  W), ipak su njihovi signali na Zemlji vrlo slabi. Često se spektralna gustoća toka signala daje u nenormiranoj jedinici janski (jansky, znak Jy), vrijednosti  $\text{Jy} = 10^{-26} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ . Slabiji je signal posljedica udaljenosti izvora, koja za neke izvore iznosi i 1600 megaparseca. Nakon signala sa Sunca na Zemlji je najjači signal s Kasiopeje A. U pojasu 4 GHz spektralna mu je gustoća toka  $1,06 \cdot 10^{-23} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ , dok je onaj s komunikacijskih satelita u tom istom pojasu reda vrijednosti  $10^{-19} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ , dakle jači je  $10^4$  puta, odnosno 40 dB. U tabl. 2 navedeni su svemirski izvori zračenja s najmanjom spektralnom gustoćom toka  $6 \cdot 10^{-28} \text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ . To nisu najslabiji izvori koji se istražuju u radioastronomiji. Signali u radioastronomiji mogu biti ometani i do milijun puta jačim smetnjama, a to neposredno pokazuje na uvjete u kojima radioastronomija radi ako nema dovoljnu zaštitu od smetnji.

Signal se u radioastronomiji, neovisno o snazi i načinu na koji je nastao, ne razlikuje od onog što u prijarni sustav unosi antena i prijarnik kao šum. Razlog je tomu što fluktuacije signala i fluktuacije šuma imaju jednaka statistička svojstva. Snaga smetnji može biti i do 60 dB veća od snage signala, pa se on može odrediti samo ako se na izlazu iz prijarnika može mjeriti razlika stanja sa signalom (ulazak izvora u »vidno polje« antene) i bez njega. Radioastronomiju, za razliku od radiokomunikacija, ne zanima struktura promjene amplitude fluktuacija, nego srednja vrijednost gustoće toka ili temperature, odnosno razlika srednjih vrijednosti signala i šuma. U takvu će utvrđivanju srednja kvadratna vrijednost pogreške biti obrnuto razmjerna korištenju ukupnog vremena usrednjavanja (vrijeme integracije)  $t$ . Srednja vrijednost od  $N$  uzastopnih mjerenja s pojedinačnim trajanjem, npr. 1 s, bit će za  $\sqrt{N}$  točnija od jednog mjerenja istog trajanja. S dovoljno se uzoraka može mjeriti željenom

Tablica 2  
NEKI SVEMIRSKI IZVORI RADIOZRAČENJA

Naziv izvora	Astronomski poznati objekti	Zračena snaga W	Period s	Spektralna gustoća toka <sup>1)</sup> (na navedenoj frekvenciji) Jy	Udaljenost <sup>2)</sup> kpc	Opaska
<i>Galaktički izvori</i>						
<i>Netermalni</i>						
Kasiopeja A		3 · 10 <sup>28</sup>		11 000 (178 MHz)	3,400	Ostatak supernove
Puppis A	x		7 000 (100 MHz)	1,100	Ostatak supernove	
Rakova maglica	x		1 000 (1000 MHz)	0,360	Ostatak supernove	
Tychova supernova	x		134 (178 MHz)	1,000	Supernova (1572. god.)	
Keplerova supernova			80 (100 MHz)		Supernova (1640. god.)	
<i>Termalni</i>						
Labud X	x			5 000 (1,4 GHz)	1,000	
Maglica Omega	x			1 000 (1,4 GHz)	1,700	
Maglica S. Amerika	x			550 (1,4 GHz)	0,900	
Orionova maglica	x			520 (1,4 GHz)	0,500	
<i>Izvangalaktički izvori</i>						
Perzej A	x	10 <sup>35</sup>			55 000	NGC 1257 <sup>3)</sup>
Andromeda	x	10 <sup>32</sup>			613	Najbliži izvangalaktički izvor
Djevica A	x	10 <sup>35</sup>			11 000	Maglica 3 C 274
Centaur A	x	10 <sup>35</sup>			5 000	Maglica NGC 5 128
3 C 273 <sup>4)</sup>		10 <sup>37</sup>			475 000	Kvazar (67 Jy; 178 MHz)
3 C 47		10 <sup>37</sup>			1 300 000	Kvazar (20 Jy; 178 MHz)
Labud A	x	10 <sup>38</sup>			170 000	Dvostruka radiogalaksija
3 C 48		10 <sup>38</sup>			1 100 000	Kvazar (47 Jy; 178 MHz)
3 C 295		10 <sup>38</sup>			1 400 000	Dvostruka radiogalaksija
3 C 147		10 <sup>38</sup>			1 600 000	Kvazar (58 Jy; 178 MHz)
<i>Pulsari</i>						
PSR 0525 + 21			3,7454	0,093 (400 MHz)	1,9	Najdulji period
PSR 0329 + 59			0,7145	2,270 (400 MHz)	2,6	
PSR 0833 - 45			0,0892	2,800 (400 MHz)	0,5	Najjači izvor (Velax)
PSR 0531 + 21			0,0331	0,480 (400 MHz)	2	Odašilje i svjetlosne impulse
CP 1919 + 21			1,33735	0,056 (400 MHz)	0,4	Prvootkriveni pulsar (impuls 0,33s)
CP 1937 + 21			0,0015	0,056 (400 MHz)	2,4	Najkraći period

<sup>1)</sup>Jy je znak za jansky, nenormiranu jedinicu spektralne gustoće toka koja se primjenjuje u radioastronomiji, vrijednosti Jy = 10<sup>-26</sup> W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>.

<sup>2)</sup>kpc je znak za kiloparsec, decimalnu jedinicu od parsec, posebne jedinice duljine u astronomiji, vrijednosti pc ≈ 206264,8 astronomskih jedinica = 3,08572 · 10<sup>16</sup> m.

<sup>3)</sup>New General Catalogue of Nebulae and Clusters.

<sup>4)</sup>Znakovi kako se navode u katalogu radioizvora opservatorija u Cambridgeu (3 C).

točnošću. Snizi li se pri mjerenju fluktuacija šuma uzrokovana nestabilnošću uređaja na vrijednost nižu od signala, može se detektirati i slabi signal s negativnim omjerom signala i šuma. Broj se uzoraka povećava s vremenom promatranja i širinom frekvencijskog pojasa (u pojasu Δf moguće je mjeriti približno Δf uzoraka u sekundi). Ako se vrijeme integracije (promatranja) poveća, može N biti vrlo veliko, jer je N ≈ tΔf. Relativna je promjena snage signala

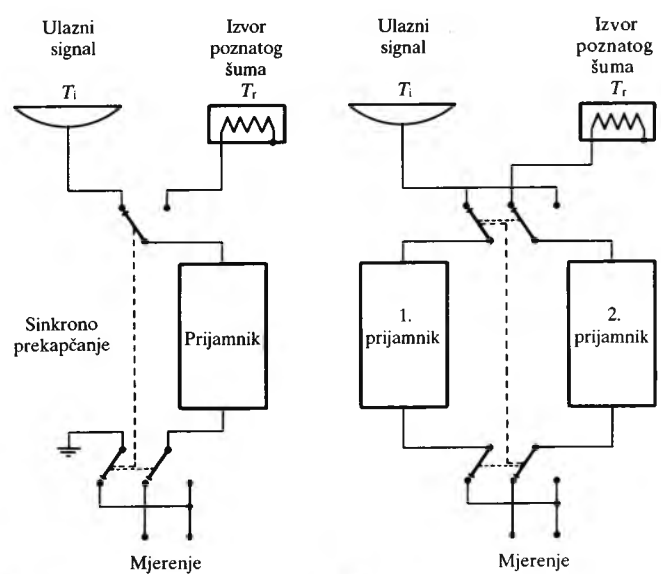
$$\frac{\Delta P}{P} \propto \frac{1}{\sqrt{t\Delta f}}, \quad (8a)$$

a mjera osjetljivosti

$$(\Delta T)_{\min} \propto \frac{1}{\sqrt{t\Delta f}}, \quad (8b)$$

gdje je T temperatura šuma prijemnog sustava (v. *Elektronika, uređaji. Satelitske komunikacije*, TE 4, str. 494). Pritom je (ΔT)<sub>min</sub> ≪ T, jer nazivnik u (8a i b) često iznosi 10<sup>4</sup> ili više. Ograničenje u točnosti mjerenja jest vrijednost funkcionalne relativne promjene pojačanja prijemnika ΔG/G, jer pogreška mjerenja ovisi o (ΔG/G)T.

Kako se potrebna stabilnost teško postiže običnim prijemnicima, tražena su bolja rješenja. Brzim prekapčanjem prijemnika na antenu ili na poznati izvor šuma koji se ostvaruje otpornikom na poznatoj temperaturi (sl. 15), dobiva se mjerenjem na sinkronom detektoru modulacija izlaznog napona razmjerna razlici temperature zračenja T<sub>i</sub> i temperature poznatog otpora T<sub>r</sub>, s pogreškom (ΔG/G)(T<sub>i</sub> - T<sub>r</sub>), umjesto (ΔG/G)T. Pogreška je to manja što je manja temperaturna razlika. Servopetljom se može ostvariti da je T<sub>r</sub> = T<sub>i</sub>, pa se temperatura mjeri tim stalnim izjednačavanjem. Zbog povezanosti prijemnika s antenom samo u polovini vremena, na raspolaganju je samo polovina snage ulaznog



Sl. 15. Blok-shema prekapčanja jednog prijemnika (a) ili dvaju prijemnika (b) na antenu ili na izvor poznatog šuma

signala. Taj se nedostatak može nadoknaditi spojem dvaju prijemnika (sl. 15b).

Osnovni odnosi u primljenom signalu vrijede općenito, samo s drugim veličinama. Za korelacijski prijemnik temperatura šuma bit će T = 0,5(T<sub>1</sub> + T<sub>2</sub>) + T<sub>sp</sub>, gdje su T<sub>1</sub> i T<sub>2</sub> temperature šuma na ulazu prijemnika iz dviju grana, koje ovise o veznim putovima (pretpojačala i vodovi s pripadnim gubicima), a T<sub>sp</sub> je temperatura šuma samog prijemnika. Kod

teleskopa sa sintetskim otvorom stanje je mnogo složenije, a rezultat ovisi o načinu sintetiziranja.

Radiovalovi kao nosioci informacija imaju komponente sa slučajno raspodijeljenim polarizacijama. Polariziranost koja je neodvojivo svojstvo antene uvjetovat će na izlazu antene postojanje polarizacijski prilagođene polovine raspoložive snage signala, a od ukupne gustoće toka  $S$  iskorištena je samo prilagođena polovica  $S_{pr} = S/2$ . Na izlazu iz antene raspoloživa je spektralna snaga

$$p = A_e S_{pr}, \quad (9)$$

gdje je konstanta proporcionalnosti  $A_e$  efektivna površina antene okomita na smjer izvora. Stvarna raspoloživa snaga

$$W = p \Delta f = A_e S_{pr} \Delta f \quad (10)$$

razmjerna je širini mjernog pojasa  $\Delta f$ , koji je, osim kod linijskih izvora, uži od pojasa zračenja.

Radioteleskopske antene najčešće imaju *rotacijsko paraboloidne reflektore*. Oni su karakterizirani promjerom, odnosno površinom otvora, dobikom ili usmjerenošću i dijagramom zračenja, koji vrijedi kad antena radi kao odašiljačka ili prijamna antena. Dijagram zračenja, obično rotacijski simetričan za antene s paraboloidnim reflektorom, čine mjesta vrhova Poyntingova vektora jakosti zračenja (dijagram snage). Karakteriziran je kutnom širinom snopa u kojoj je jakost zračenja jednaka polovini maksimalne jakosti. Usmjerenost  $D$ , dobitek  $G$  i efektivna površina  $A_e$  funkcije su kvadrata promjera otvora ili najveće udaljenosti između elemenata neprekidne površine reflektora, a među njima vrijedi odnos

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e, \quad (11)$$

odnosno

$$G = \eta_r D, \quad (12)$$

gdje je  $\eta_r$  faktor djelovanja antene koji predstavlja gubitke zbog omskog otpora antenskog sustava. Za polje jednoliko raspoređeno po antenskom otvoru, što gotovo nikad nije ispunjeno, vrijedi  $A_e < A$ , ako je  $A$  stvarna površina antenskog otvora. Pri stvarnoj uzbuđi ta je površina smanjena stupnjem djelovanja te uzbuđi, koji uz više drugih faktora daje ukupni faktor djelovanja antene  $\eta_a$ . On određuje efektivnu površinu o kojoj ovise ostali parametri. Za najveću (po azimutu i elevaciji) potpuno upravljivu radioastronomsku antenu na Effelsbergu (Njemačka) s promjerom otvora 100 m, a i za neke druge antene (sl. 16), ukupni je stupanj djelovanja  $\eta_a = 0,57$ . Do danas najveća antena, u Arecibu (Puerto Rico, SAD), ima nepomičan sferni reflektor (s promjerom otvora 305 m), pa je usmjerivanje u krugu polumjera  $11^\circ$  od zenita moguće pomicanjem uzbuđivača. Osim ekonomskih, gradnju

velikih antenskih reflektora otežava i više tehničkih problema, od točnosti izvedbe površine reflektora do svladavanja deformacija zbog toplinskih i gravitacijskih utjecaja.

Povećanje otvora reflektora posljedica je nastojanja da se prijamniku privede što veća snaga, ali i povećanja kutne diskriminacije promatranih predmeta ili njihovih dijelova, ili pak moći razlučivanja teleskopa, kojeg je antena dio. Rayleighov kriterij za razlučivanje (v. *Mikroskop*, TE 8, str. 537) traži da kutni razmak izvora, ako ih se želi vidjeti odvojeno, mora biti veći od polovine kuta između prvih nula dijagrama zračenja antene. Za jednolično pobuđeni otvor taj je kut

$$\delta_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D} \text{ rad} = 69,9 \left( \frac{\lambda}{D} \right)^\circ. \quad (13)$$

Kut kojim je određena širina glavnog snopa (ili glavne laticice dijagrama) između točaka koje označuju polovinu snage za jednolično pobuđeni otvor iznosi

$$2\delta = 1,02 \frac{\lambda}{D} \text{ rad} = 58,5 \left( \frac{\lambda}{D} \right)^\circ. \quad (14)$$

Na taj se drugi kut obično misli kad se govori o pretraživanju izvora, istraživanju rasporeda zračenja i izradbi »slike« istraživanog predmeta ili prostora, a često i onda kada je riječ o razlučivanju. Za istraživanje površine potrebno je da širina snopa bude najviše 1/10 kutne veličine predmeta. Za Sunce, primjerice, koje se vidi pod kutom oko  $30'$ , moralo bi biti  $2\delta < 3'$ . To bi značilo da promjer reflektora za  $\lambda = 0,21$  m (na toj se valnoj duljini obavljaju mnoga mjerenja) mora biti najmanje 246 m, a vrlo je teško zamisliti da bi se takvim reflektorom mogla pretraživati cijela površina Sunca. Iz toga slijedi da će kod rotacijski simetričnog snopa, s pretpostavkom da su radioizvori jednoliko raspodijeljeni po svim smjerovima, antena moći razlučiti broj objekata

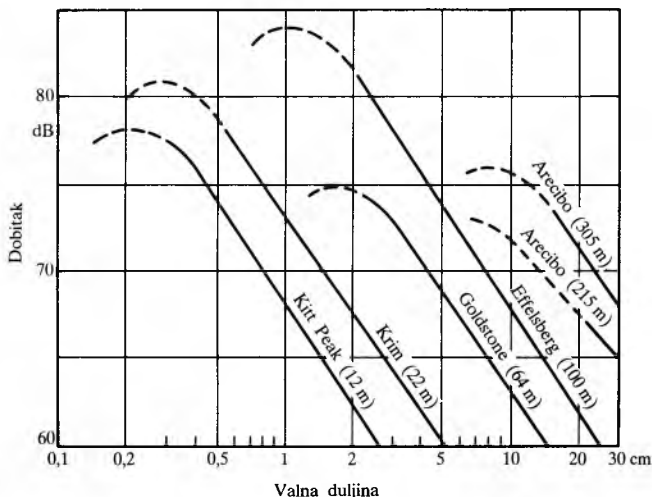
$$R = \frac{4\pi}{(2\delta)^2}, \quad (15)$$

uz  $\delta$  iskazan u radijanima, ali je taj broj barem za red vrijednosti veći od onoga koji pokazuje stvarne mogućnosti.

Radioteleskop, kao spoj antene i prijamnika, mjeri relativne veličine samo iz jednog smjera, pa je sličniji radiometru nego teleskopu. On može dati »sliku«, s pretpostavkom da ima dovoljnu moć razlučivanja, samo pretraživanjem i slaganjem tako dobivenih podataka. Iz izraza (13) do (15) slijedi da je mogućnost radioteleskopa u osiguranju veće snage prijamniku, dakle u »osjetljivosti« na snagu izvora, određena kvadratom najveće udaljenosti elemenata kontinuirane površine reflektora (za kružni je otvor to promjer  $D$ ), jer dovođenje snage prijamnika ovisi o veličini površine. Razlučivanje pak ovisi samo o prvom stupnju te udaljenosti. Iz toga slijedi da se dvije funkcije teleskopa mogu odvojiti, i da će, primjerice, razlučivanje dvaju elemenata svih površina udaljenih za  $D$  biti jednak krugu s promjerom  $D$ , uz uvjet da se pomoću elementarnih površina može osigurati snaga potrebna da se razlučivanje i provede. No, neovisno o tome, povećanje razlučivanja ovisi o povećanju udaljenosti elemenata sustava, a ne o odgovarajućem povećanju površine.

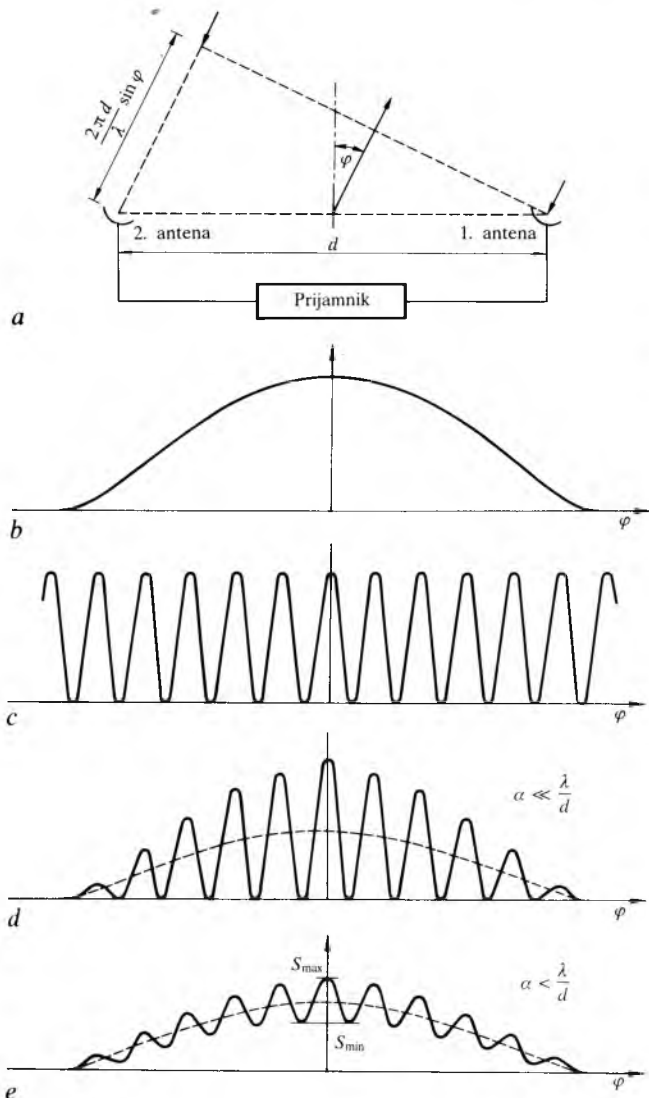
**Radiointerferometri.** Spoznaja da i neispunjeni antenski otvor može poslužiti za utvrđivanje raspodjele sjaja izvora bila je vrlo važna za razvoj radioteleskopa s velikim razlučivanjem, a posredno i s velikom površinom, a time i za ukupan razvoj radioastronomije. Niz malih antena može se shvatiti kao analogija optičkim rešetkama. On daje difrakcijski dijagram promjene snage, koji se sastoji od jednolično raspodijeljenih latica. Zbog male relativne širine pojasa  $\Delta f/f$  sve će laticice u nizu po obliku i širini biti kao i srednja, a ta će širina biti jednaka širini snopa punog reflektora kojeg je promjer jednak duljini niza. Izrazi latica i snop upozoravaju na očekivanu razliku u razlučivanju u smjeru linije niza i okomito na taj smjer. Osim toga, razlučivanje u tom drugom smjeru određeno je izmjerama elemenata niza u tom smjeru.

Niz elemenata s pripadnim prijamnikom naziva se *radiointerferometrom*, a metode mjerenja radiointerferometrijom.



Sl. 16. Dobitak nekih radioastronomskih antena prema valnoj duljini (u zagradi su promjeri otvora antena)

Veći se dio djelovanja, i kad se radi o složenim nizovima, može svesti na jednostavan radiointerferometar s dva elementa (sl. 17a), koji daje mogućnost utvrđivanja osnovnih karakteristika (v. *Elektronika, uređaji. Antene*, TE 4, str. 609).



Sl. 17. Radiointerferometar s dva elementa (dvije antene). a shema, b dijagram usmjerenja antena, c idealna snimka zračenja točkastog izvora koji prolazi vidnim poljem radiointerferometra, d snimka pomoću stvarnih antena, e snimka plošnog izvora pomoću točkastih antena

Karakteristika zračenja stvarnih antena (sl. 17b) uzrokuje da je idealna snimka pomičnog izvora (sl. 17c) uobličena karakteristikom stvarne antene, i to različito za točkasti izvor (sl. 17d) i za plošni izvor (sl. 17e) kutne izmjere  $\alpha < \lambda/d$ . Omjer  $(S_{\max} - S_{\min}) / (S_{\max} + S_{\min})$  naziva se vidljivost, odnosno funkcija vidljivosti ako se korigira za  $\lambda/d$ . Za niz od  $n$  radijatora (elementarnih antena) razmaknutih za  $d$ , širina pojedine latice u dijagramu rešetke, tzv. Rayleighova širina između prvih nula, dana je kao

$$\delta_0 = \frac{2\lambda}{L} \text{ rad} = 114,6 \left( \frac{\lambda}{L} \right)^\circ, \quad (16)$$

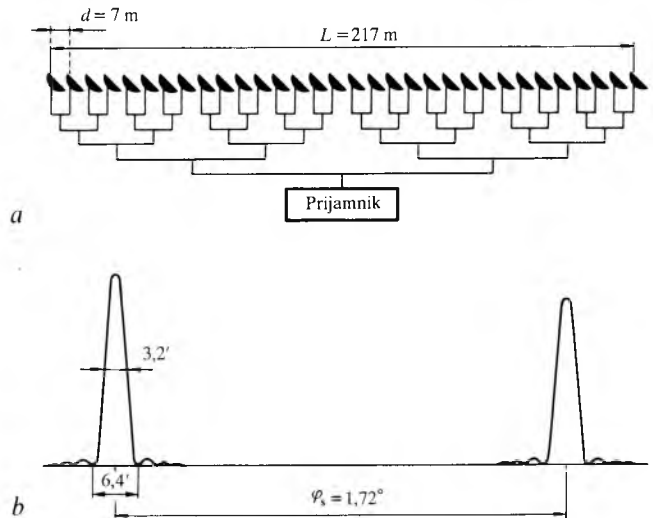
a širina latice na polovini snage (približno  $\delta_0/2$ )

$$2\delta = 57,3 \left( \frac{\lambda}{L} \right)^\circ, \quad (17)$$

gdje je  $L$  duljina niza koja mora biti tolika da se bez veće pogreške može postaviti da je  $L = nd$ . Razmak je glavnih latica

$$\alpha = 57,3 \left( \frac{\lambda}{d} \right)^\circ. \quad (18)$$

Interferometar s 32 elementa (paraboloidni reflektori promjera otvora 1,83 m) jednolično raspodijeljena s razmakom 7 m, za valnu duljinu  $\lambda = 0,21$  m, prikazan je na sl. 18. Označene su širine snopa, razmak latica i lučni promjer Sunca  $\varphi_s$ . Kako se Zemlja okreće oko osi, promatrani izvori prolaziti će redom kroz pojedine latice, a interferometarski teleskop više će puta pojedinačno pretražiti izvor. Isti se rezultati mogu postići i mehaničkim, odnosno električnim (faznim) pretraživanjem.



Sl. 18. Radiointerferometar s 32 elementa (antene). a raspored elemenata, b dijagram usmjerenja antenskog niza

M. Ryle je 1952. godine u radiointerferometriju uveo korelacijski princip konstruiranjem *korelacijskog teleskopa* s faznim prekapčanjem i izlaznim signalom kao umnoškom napona što ih dovodi pojedinačna antena. U granu običnog interferometra s dva elementa Ryle je ugradio poluvalni element koji se može ukapčati i iskapčati s frekvencijom od nekoliko stotina herca. Snaga je razmjerna izrazu  $(U_1 + U_2)^2$  ako se doprinosi antena slažu u fazi, a izrazu  $(U_1 - U_2)^2$  ako su doprinosi protufazni. Razlika je tih kvadrata  $4U_1U_2$ , a razmjerna je umnošku doprinosa. Modulacija ukupne snage mjeri se faznoosjetljivim detektorom. U zapisu rezultata nema šuma jer se pojavljuje samo umnožak komponenata koje su u korelaciji. Tako je dobiven osjetljiviji radioteleskop s velikim razlučivanjem i malim pojedinačnim antenama. Danas su češće u upotrebi suvremeniji prijamnici, ali je princip rada ostao nepromijenjen. Signal je obično malen prema snazi neželjenog šuma u sustavu, pa je u prijamniku koji mjeri ukupnu snagu iz jedne antene potrebna vrlo velika stabilnost pojačanja, jer i male promjene neželjenog šuma na izlazu mogu pokriti promjenu koju unosi izvor prolazeći pred antenom.

Razlučivanje u smjeru okomitom na smjer osnove radiointerferometra može se povećati upotrebom većih pojedinačnih antena čime se povećava i osjetljivost, ali i drugim parom ili nizom antena, okomitim na prvi. Ako se upotrijebe dva niza, dijagram zračenja pojedinačnog niza bit će uzak i izduljen, sa širinom prema izrazu (16). Izlaz iz dvaju nizova dovodi se na korelacijski prijamnik, a rezultat je umnožak koherentnih komponenata iz zajedničkog dijela dijagrama, koji je vrlo uzak jer razlučivanje odgovara popunjenoj anteni s promjerom jednakim duljini niza. Kombinacija ukrštenih nizova i korelacijskog prijamnika omogućila je i izdvajanje slabijih točkastih izvora, uz prisutnost mnogo većih snaga iz pozadine i šuma prijamnoga dijela.

Sličan rezultat može dati i samo jedan radiointerferometar ako se okretanje Zemlje oko osi iskoristi za njegovo dovođenje u drugi položaj. Na tome se osnivaju radiointerferometri sa sintetskim otvorom, uz primjenu okretanja Zemlje.

*Radioteleskop sa sintetskim otvorom* osniva se na činjenici da u informacijama što ih skuplja radioteleskop s jednim

otvorom ima nepotrebnih informacijskih zaliha, pa bi bilo dovoljno izgraditi samo dio otvora. S druge strane, potrebno je da i manji dio informacija bude prisutan u svako doba. Potrebne se informacije mogu pribaviti mjerenjem pomoću manjih antena ako one mogu pomicanjem postići sve razmake i smjerove u željenom otvoru. Tako stvoreni radioteleskop može biti upotrijebljen samo za istraživanje onih izvora koji se za vrijeme istraživanja mnogo ne mijenjaju.

Bitno je svojstvo radioteleskopa sa sintetskim otvorom da daje prikaz (tzv. mapu) distribucije radiosjaja (ili odgovarajuće karakteristične veličine). Odnos između radiosjaja i odziva korelacijskog radiointerferometra dan je Fourierovom transformacijom. Raspodjela radiosjaja dobiva se naknadnim računanjem mjerenih transformacija, Fourierovom inverzijom ili drugim postupcima inverzije. Složena obradba podataka i velika računala koja to mogu izvršiti karakteristika su moderne radioastronomije.

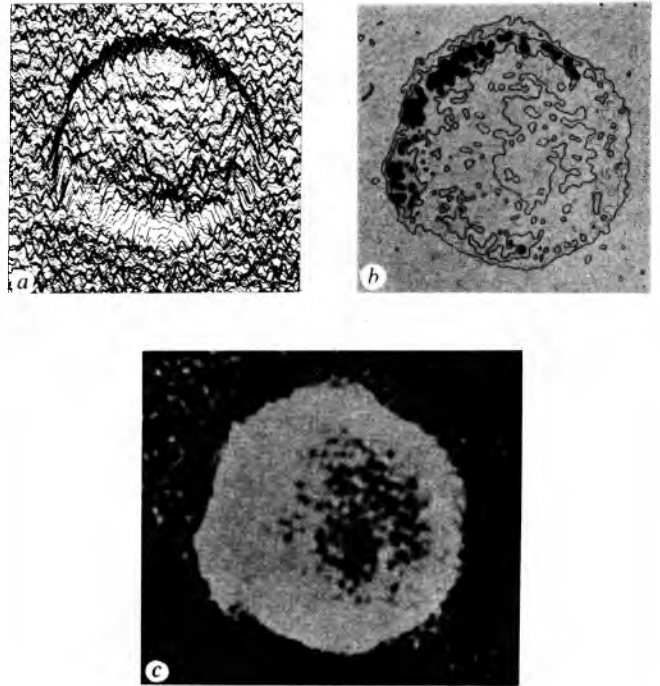
U Velikoj Britaniji je 1967. pomoću dvaju radioteleskopa udaljena 127 km napravljen pokus koji je s valnom duljinom 0,21 m dao razlučivanje reda vrijednosti 0,1', a zatim, s valnim duljinama 0,11 i 0,06 m, razlučivanja reda vrijednosti 0,05' i 0,025', što je prelazilo mogućnosti optičkog razlučivanja. Oba su dijela radiointerferometra bila povezana usmjerenom radiovezom. Kasnije je na isti način u sustav uključeno šest radioteleskopa udaljenih 6...134 km, s 15 pojedinačnih radiointerferometara. Centar Socorro (Novi Meksiko) ima 27 antena, s promjerom otvora 25 m, postavljenih na tračnice u obliku slova Y, s krakovima dugačkim 21 km. To su tzv. *vrlo dugački nizovi antena* (engl. Very Large Array, VLA). Pojedine se antene mogu zaustaviti na određenim mjestima i valovodima povezati sa centrom. To skupo rješenje sa 60 km valovoda ne može se primijeniti za radiointerferometre ili elemente ekstremno velikih sintetskih otvora na različitim kontinentima. Tehnički napredak i primjena takve opreme ostvareni su uz vrlo velike mogućnosti točnog mjerenja vremena (vodikov maser, cezijev i rubidijev etalon vremena), što dopušta održavanje koherentnosti nezavisnih oscilatora radioteleskopa u mreži. Tomu treba pridodati uređaje za magnetsko zapisivanje velike količine podataka dovoljno velikom brzinom i računala velikog kapaciteta. Vrpce, koje osim informacija dobivenih iz radioteleskopa nose i signal vremenskog etalona, prenose se u centar za obradbu. Da bi se osigurala koherencija, oscilator mora na određenoj frekvenciji  $f$  u toku promatranja zadržati isto vrijeme unutar najmanje  $1/f$ .

Prvi radiointerferometar na tom principu izgrađen je 1967. u Kanadi s osnovnom duljinom 3074 km. Bio je to tzv. *interferometar s vrlo dugom osnovnom linijom* (engl. Very Long Baseline Interferometer, VLBI). S jednom antenom u Goldstoneu (Kalifornija), a drugom u Canberri (Australija) i s osnovom 10592 km postignuto je, uz  $\lambda = 0,13$  m, razlučivanje od 0,001'. Nakon toga ostvareni su s razlučivanjima manjim od lučne milisekunde i svjetski sustavi s elementima u SSSR, Zapadnoj Europi, SAD, Kanadi i Australiji.

Sateliti su u radioastronomiju unijeli nove mogućnosti rada. Oni su poslužili za raspodjelu točnog vremena kao elementi sustava VLBI te kao zamjena za mehanički prijenos podataka (na magnetskim vrpčama) od tih elemenata u centar za obradbu. Tamo se podaci usklađuju i pretvaraju u prikladan oblik za istraživanje, i to u realnom vremenu. Radioteleskop mora tada imati na raspolaganju i satelitsku zemaljsku stanicu.

Mape ili snimke promatranog područja ili pojedinačnog izvora zračenja iz svemira mogu imati različite oblike. Iz obrađenih i usklađenih podataka mogu se izabrati oni koji odgovaraju jednokratnom pretraživanju, kao linija na kojoj razlike od pravca crtanja predočuju mjerene veličine. Slaganje sukcesivnih linija po visini daje prividno trodimenzijsku sliku (sl. 19a). Drugi je oblik povezivanje u površine omeđene krivuljama koje spajaju s jednakim vrijednostima mjerene veličine (sl. 19b), a u trećem se obliku vrijednost svake točke prikazuje svjetlosnom jakosti (sl. 19c) i prenosi na film kao radiofotografija.

Sateliti mogu biti opremljeni i radioteleskopima pa tako povećati osnovu i razlučivanje mnogo iznad mogućnosti koje postoje na Zemlji. U ostvarenju je međunarodni projekt QUASAT, kojemu je osnovni zadatak istraživanje kvazara. Radi se o satelitu koji može mijenjati visinu svoje putanje i povećati osnovu na 50000 km, a razlučivanje, s valnom duljinom 0,0136 m, na  $50 \cdot 10^{-6}$  lučnih sekunda. U pripremi je RADIOASTRON u Rusiji s još većim razlučivanjem zbog vrlo izduljene eliptične putanje. U Japanu se priprema projekt VSOP (engl. VLBI Space Observatory Project, VLBI projekt svemirskog opservatorija) koji može biti komplementaran projektu QUASAT jer je sličan, a satelit je na različitoj putanji.



Sl. 19. Prikazivanje rezultata mjerenja radioteleskopom. *a* prividno trodimenzijska slika, *b* površine omeđene krivuljama točaka jednakih vrijednosti, *c* svjetlosna jakost pojedinih mjesta slike ovisna o vrijednosti mjerene veličine

Sateliti se u radioastronomiji pojavljuju i s jednim novim zadatkom: dobivanje podataka na nižim frekvencijama, za koje je ionosfera nepropusna. Radi se o projektu LFSA (engl. Low Frequency Space Array, niz niskofrekventnih svemirskih antena) koji bi u području valnih duljina kraćih od metarskih valova proučavao pulsare s impulsima trajanja nekoliko milisekunda, ostatke supernova, Sunce i Jupiter. Četiri satelitske platforme sa snopovima linearnih antena kružile bi različitim brzinom na malo različitim visinama, sve  $\sim 11000$  km, i činile niz duljine 2...350 km. Postupno širenje niza omogućivalo bi simuliranje radioteleskopa izvanredno velikih izmjera. Položaj i rad platformi bili bi kontrolirani sa Zemlje, na koju bi rezultati opažanja dolazili radiovalovima na obradbu. Ti novi projekti oslobodili bi radioastronomiju od ograničenja koja su unosili tzv. prozori u atmosferi i podjela spektra elektromagnetskog zračenja iz svemira na optički dio i radiovalove. U radioastronomiji se, u stvari, u cijelom spektru elektromagnetskog zračenja mjeri energija prispjelih fotona. Na jednom su kraju spektra fotoni s energijama od nekoliko pikoelektronvolta, a na drugome kraju s energijama reda veličine gigaelektronvolta. Za tako velik raspon energija ( $\sim 10^{21}$ ) potrebni su i različiti postupci mjerenja. Najudaljeniji izvori slabi su izvori fotona s velikom energijom. Radiofotona bi za jednaku energiju bilo mnogo više, što ide u prilog radioastronomiji kad se radi o vrlo udaljenim objektima. Tako bi na raspolaganju ostalo mnogo više fotona za važna mjerenja, što znači da radioastronomija

ostaje jedina mogućnost istraživanja najudaljenijih dijelova svemira.

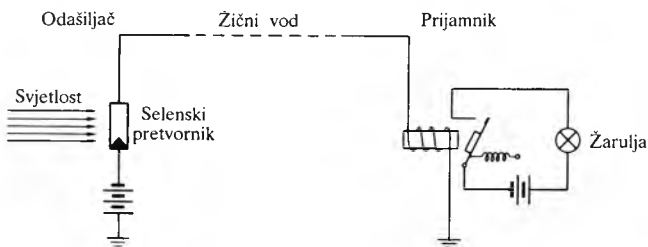
LIT.: J. L. Pawsey, R. N. Bracewell, Radio Astronomy, Clarendon Press, Oxford 1955. – R. Galić, Telekomunikacije satelitima. Školska knjiga, Zagreb 1982. – T. Kennie, M. Mathews, Remote Sensing in Civil Engineering. Surrey University Press, Glasgow 1985. – J. D. Kraus, Radio Astronomy. Cygnus-Quasar Books, Powell, Ohio 1986.

R. Galić

**TELEVIZIJA U BOJI** (kromatska televizija, kolortelevizija), tehnika elektroničkog snimanja, obradbe, prijenosa i reprodukcije pokretnih slika u boji. Nastala je razvojem crno-bijele televizije (v. *Elektronika, uređaji. Televizija*, TE 4, str. 669), u nastojanju da slika po bojama bude što vjernija originalu. Osim obojenosti slike, televizija u boji odlikuje se i mnogim drugim poboljšanjima slike, kao što su oština, razlučivanje, kontrast, brzina praćenja predmeta i dr. Uz nju su se također razvijale i druge tehničke mogućnosti elektroničke obradbe slike, npr. miješanje, sintetiziranje, deformiranje i dr. Takva je usavršena televizija osnova suvremenoga svjetskog sustava za brz prijenos informacija (satelitska televizija, povezivanje regionalnih, državnih i kontinentalnih mreža). Njome se, osim osnovne televizijske informacije u obliku slike i zvuka, istodobno prenose i druge, potpuno neovisne informacije (teletekst).

Prijenos električnih signala putem prvog praktično upotrebljivog električnog telegrafa (S. Morse, 1843. godine) bio je tehnička osnova i za prijenos drugih oblika informacija, govora i slike. Prvi je prijenos slike pomoću električnih signala ostvario Francuz Caselli 1862. između Amiensia i Pariza. Mali su dijelovi slike u obliku polaganog slijeda električnih impulsa prenošeni telegrafskom linijom u sekvencama. Na prijamoj su se strani ti impulsi rekonstruirali u sliku.

J. May je 1873. otkrio, a W. Smith naknadno objavio, da je električna provodnost metalnog selena ovisna o osvjetljenju (v. *Električna mjerenja*, TE 3, str. 642). To je svojstvo selena primijenio Amerikanac G. R. Carey za električni prijenos slike (sl. 1). Na odašiljačkoj je strani njegova uređaja bio selenski element, a na prijamoj strani relej koji je uključivao strujni krug žaruljice. Takav krug funkcionira digitalno: žaruljica svijetli samo ako je selenski element osvjetljen. Ploha na koju se optički projicirala slika bila je pokrivena mrežom selenskih elemenata, a ploha na kojoj se promatrala slika nizom žaruljica. Svjetleće su žaruljice prikazivale obrise slike. Osim što je taj sustav prenosio samo dva stupnja svjetloće, nedostatak mu je bio i velik broj električnih vodova za povezivanje selenskih elemenata i žaruljica. Iako se ta zamisao osnivala na rastavljanju slike na dijelove, to je rastavljanje bilo statičko.



Sl. 1. Osnovni krug za prijenos jednog elementa slike električnim putem

Dinamičko rastavljanje slike na niz dijelova ostvario je Nijemac P. Nipkow 1883. pomoću rotirajućeg diska sa spiralno poredanim rupicama (sl. 2). Informacije o osvjetljenosti pojedinih dijelova slike slijede u vremenskom nizu. Na prijamoj je strani potreban takav jednaki disk koji sinkrono rotira s onim koji analizira sliku. U promatračevo oko dolazi slijed svjetlosnih impulsa. Ako se diskovi vrte dovoljno brzo, uslijed perzistencije oka promatrač ima dojam cjelovite slike sastavljene od svijetlih ili tamnih elemenata.

Dinamičko analiziranje slike i pretvaranje u uređeni vremenski slijed impulsa, uz druge tehničke izvedbe, osnova je i današnjoj televiziji, iako se to postiče drugim, znatno savršenijim uređajima i složenijim postupcima.

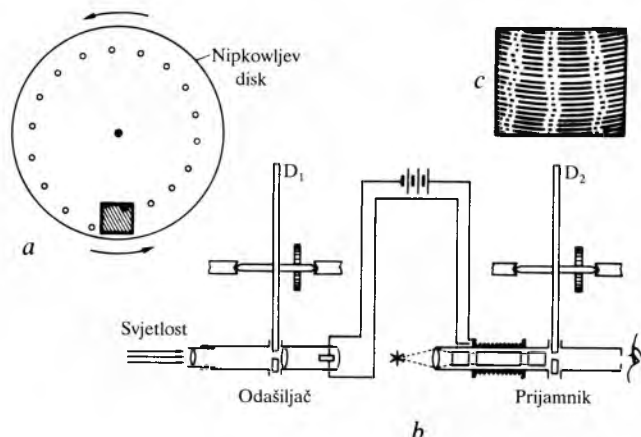
Katodnu cijev, prethodnicu današnjeg kineskopa, konstruirao je K. F. Braun 1897. Time je omogućena pretvorba informacije iz električnog oblika (slijeda impulsa) u vizualni oblik (optičku sliku) na fluorescentnom ekranu.

Prvi je televizijski prijenos na veću udaljenost ostvaren pomoću Nipkowljevih rotirajućih diskova 1923–27. Prijenos je između Washingtona i New Yorka (462 km) bio ostvaren dvožičnim zračnim telefonskim vodom, a između New Yorka i Whippanyja (56 km) radijskom vezom.

Na istoj su osnovi pokuse s analiziranjem i rekonstruiranjem slike obavljali 1924–25. godine Ch. F. Jenkins u SAD te J. L. Baird u Velikoj Britaniji.

Slijedeći važan izum u razvoju televizije načinio je ruski fizičar V. K. Zworykin. On je 1926. godine rađajući u tvrtki Westinghouse (SAD) konstruirao

ikonoskop, elektronsku cijev kojom je pretvarao optičku sliku u niz električnih impulsa. Osnova je ikonoskopa pločasta elektroda s finim mozaikom naparenog metala na keramičku podlogu, na koju se projicira optička slika. Ta se slika analizira pomoću elektronskog snopa. Zworykin je usavršio i katodnu cijev na kojoj se promatra slika u prijamniku.



Sl. 2. Shematski prikaz Nipkowljeva uređaja za dinamičko analiziranje, prijenos i rekonstrukciju slike. a Nipkowljev disk s nizom spiralno raspoređenih rupica, b sustav za prijenos ( $D_1$  i  $D_2$  sinkronizirajući diskovi), c promatračevo vidno polje

Tako su bile ostvarene osnove televizije. Slika se na odašiljačkoj strani u ikonoskopu (danas u drugim usavršenim analizirajućim cijevima) dinamički analizira i pretvara u vremenski slijed električnih impulsa. Zatim se kao električni signal prenosi radijom ili kabelom, a na prijamoj se strani u katodnoj cijevi pretvara u vidljivu sliku na fluorescentnom zaslonu, ekranu. U tom se lancu nalaze brojni drugi uređaji za obrađivanje i prenošenje slike.

Prijenosom televizijske slike u boji eksperimentiralo se upotrebom obojenih filtera i fotočelija osjetljivih na pojedine boje na odašiljačkoj strani. U prijamniku su upotrijebljene tri skupine cijevi koje emitiraju obojenu svjetlost (crvenu, modru i zelenu). Propuštanjem kroz polupropusna zrcala te aditivnim miješanjem boja u oku promatrača nastaje utisak obojene slike.

Radiodifuzijsko emitiranje televizijskog programa započelo je u SAD i Velikoj Britaniji 1929. godine. Bairdova je tvrtka u Velikoj Britaniji stavila 1929. na tržište televizijski prijamnik pod komercijalnim nazivom *televizor*. Ista je tvrtka 1931. ostvarila i prvi televizijski prijenos u boji, a 1938. stavila je na tržište prvi odašiljač za televiziju u boji.

Prvi je prijenos televizijskog programa u nas demonstrirala tvrtka Philips 26.–28. kolovoza 1939. u okviru Zagrebačkog zbora. U Zagrebu je prvi prijenos akromatske televizije ostvaren 15. svibnja 1956. na tridesetogodišnjicu Radio-Zagreba te se to smatra početkom televizije u Hrvatskoj. Televizija u boji postupno je u nas uvedena 1970-ih godina, a nakon toga se sav televizijski program nastavio emitirati u boji.

## OPĆI POJMOVI O TELEVIZIJI

**Razlučivanje.** Spособnost razlikovanja dviju susjednih točaka različite svjetljivosti (luminancije) na televizijskoj slici naziva se razlučivanje (rezolucija). Razlučivanje se procjenjuje prema različitoj svjetljivosti točke i linije. Razlikuju se horizontalno i vertikalno razlučivanje, te razlučivanje u sredini i na krajevima televizijske slike. Na razlučivanje utječe frekvencijska širina kanala. Naime, za točke razlučivanja koje se nalaze u horizontalnom smjeru na liniji razlaganja granica razlučivanja nastaje onda kad se na jednoj liniji razlaganja još opaža minimalna razlika svjetljivosti dviju točaka (v. *Mikroskop*, TE 8, str. 537).

Prilikom snimanja na razlučivanje utječe televizijska kamera i njezina mogućnost razlučivanja detalja scene. Kako se kamera sastoji od više dijelova, svaki od njih utječe na razlučivanje detalja. To su u prvom redu analizirajuća cijev ili cijev za analiziranje slike, te njeni elektronički sklopovi, optički sustav objektivna i prizme, mehanička preciznost optičkog sustava, ujednačenost otklonskih sustava i kvaliteta prvog pretpojačala.

U tom je lancu najbitnije razlučivanje analizirajuće cijevi a određuju ga dva parametra. Prvi je razlučivanje samog fotovodljivog sloja koje ovisi o njegovu sastavu, debljini i površini, o čemu neposredno ovisi udjel apsorbiranog i raspršenog svjetla. Drugi je parametar elektronski snop (elektronska zraka ili mlaz), i to njegov promjer, ujednačenost brzine elektrona u snopu, elektronsko-optička svojstva cijevi, savijanje snopa, oblik presjeka snopa i prihvaćanje elektrona dospjelih na fotovodljivi sloj. Što je promjer snopa manji a