

Mjerenje polarizacije. Mjerenje polarizacije temelji se na činjenici da se elektromagnetski val bilo kakve polarizacije može rastaviti na dvije ortogonalne komponente. Najčešće se upotrebljavaju dvije linearne antene pod pravim kutom, pomoću kojih se određuju odnosi amplituda i faza ortogonalnih komponenta polja. Mjerenje se može provesti i pomoću jedne lijevo i jedne desno polarizirane helikoidne antene, no točnost je u tom slučaju manja jer je vrlo teško izvesti identične ortogonalne kružno polarizirane antene.

Određivanje dobitka izvodi se uspoređivanjem primljene snage ispitivane antene sa snagom standardne antene poznatog dobitka. Da bi se izbjegle greške zbog nelinearnosti detektora, odn. prijemnika, ubacuje se između odašiljača i prijemnika precizni varijabilni atenuator. Za određeni razmak odašiljačke i prijemne antene, uz stalnu snagu odašiljača, dobije se određeni otklon na izlazu prijemnika. Kad se prijemna antena zamijeni standardnom, treba pomoću varijabilnog atenuatora postići isti otklon u prijemniku. Dobitak standardne antene zajedno s razlikom u gušenju atenuatora daje dobitak ispitivane antene:

$$g = g_0 + p_2 - p_1,$$

gdje je g_0 dobitak standardne antene u decibelima, p_2 očitavanje na atenuatoru ako je spojena ispitivana antena i p_1 očitavanje na atenuatoru ako je spojena standardna antena. Da bi se izbjegla greška, treba da snaga odašiljača za vrijeme cijelog mjerenja ostane nepromijenjena. Gušenje na atenuatoru treba podesiti tako da uz spojenu standardnu antenu očitavanje p_1 izraženo u decibelima bude bar jednako g_0 .

LIT.: H. Jasik et al., Microwave antenna theory and design, New York 1949. — J. D. Kraus, Antennas, New York 1950. — A. S. Schelkunoff, H. T. Friis, Antennas; theory and practice, New York 1952. — D. G. Kiely, Dielectric aeriels, London 1953. — L. Thourel, Les antennes, Paris 1956. — R. W. P. King, The theory of linear antennas, Cambridge, Mass. 1956. — Г. З. Аусенберг, Антенны ультракоротких волн, Москва 1957. — H. Jasik, Antenna engineering handbook, New York 1961. — E. C. Jordan, Electromagnetic theory and antennas, Oxford 1963. — R. C. Hansen, Microwave scanning antennas, New York 1954. — C. H. Walter, Traveling wave antennas, New York 1965. — J. W. Sjöbom, Antennen, Hamburg 1965. — L. V. Blake, Antennas, New York 1966. — E. A. Wolff, Antenna analysis, New York 1966. — V. Rumsey, Frequency independent antennas, New York 1966. — J. Budin, Antene, Ljubljana 1968. — Я. Н. Федько, Основы теории шелевых антенн, Москва 1968. — Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, К. С. Щелков, Теория изучения поверхностных антенн, Москва 1969. — E. Collin, F. J. Zucker, Antenna theory, New York 1969. — R. Kühn, Mikrowellen-Antennen, Berlin 1969. — Я. С. Шифрин, Вопросы статистической теории антенн, Москва 1970. — G. Rothe, E. Spindler, Antennenpraxis, Berlin 1971. — H. C. Mende, Fernsehantennenpraxis, München 1972. — E. Spindler, Antennen, Anleitung zum Selbstbau, Berlin 1972. — Д. И. Воскресенский, Антенны и устройства СВЧ, Москва 1972.

E. Zentner

RASPROSTIRANJE (ŠIRENJE) RADIO-VALOVA

Spektar elektromagnetskih valova vanredno je širok: on obuhvaća valove frekvencije od nekoliko herca do $\sim 10^{23}$ Hz. U ovom poglavlju članka o elektroničkim uređajima bit će govora o valovima iz onog dijela tog spektra koji se iskorištava za prijenos informacija u radiokomunikacijama, i to o njihovom širenju u odsutnosti posebnih sistema za upravljanje kao što su valovodi, sistemi s dva vodiča, koaksijalni kabeli i sl.

Elektromagnetski val je fizikalna pojava u kojoj učestvuju promjenljiva električna i magnetska polja, pri čemu promjene jednog polja uzrokuju nastanak drugog, tako da se izaziva val koji se, jedanput izazvan, širi konačnom brzinom (brzinom svjetlosti) ukoliko to dopušta medij kojim se širi. Zbog svoje velike brzine širenja i ostalih svojih svojstava, elektromagnetski je val vrlo prikladan za prijenos informacija. Pri tom on služi kao val nosilac na koji se modulacijom (vremenskom promjenom oblika, amplitude, frekvencije ili faze) »upišu« električni signali. Količina informacija koja se na taj način može prenijeti vrlo je velika. Ako se tome doda činjenica da se načinom modulacije može utjecati na količinu prenetih informacija, postaje jasno zbog čega je studij rasprostiranja elektromagnetskih valova za tehniku telekomunikacija izvanredno važan.

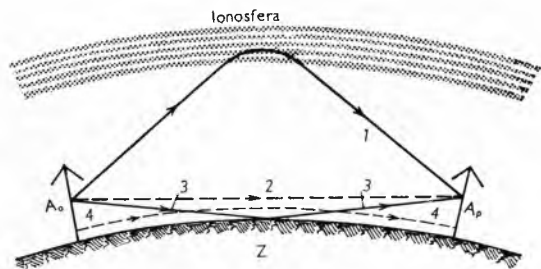
Dio frekvencijskog spektra koji se iskorištava u radiokomunikacijama za prijenos informacija postaje sve veći, te danas već obuhvaća široko područje bežičnog prijenosa između ~ 10 kHz i ~ 60 GHz. Elektromagnetski valovi iz pojedinih područja tog dijela frekvencijskog spektra imaju u pogledu rasprostiranja vrlo različite osobine.

Teorija rasprostiranja elektromagnetskih valova polazi od Maxwellovih jednadžbi (v. *Elektrotehnika*), prema kojima se elektromagnetski val u slobodnom prostoru širi pravocrtno i brzinom svjetlosti. Međutim, u teoretska razmatranja samo na osnovi Maxwellovih jednadžbi ne može se uključiti niz parametara koji su u prostoru i vremenu vrlo promjenljivi, pa se stoga pojava rasprostiranja elektromagnetskih valova predviđene na temelju takvih teoretskih razmatranja često znatno razlikuju od stvarno opaženih. U daljem izlaganju razmotreno je širenje elektromagnetskih valova različitim frekvencijskih područja pod realnim uvjetima u Zemljinj atmosferi i u gornjim slojevima Zemljine kore.

Faktori koji utječu na širenje radio-valova

Rasprostiranje elektromagnetskih valova pod stvarnim prilikama može se razmatrati sa stanovišta putanje kojom se valovi kreću, medija kojim se šire, fizikalnih utjecaja kojima su na svom putu izloženi i, konačno, sa stanovišta njihove frekvencije.

Podjela zračenih valova prema putanji kojom se kreću. Valovi što ih zrači izotropni radijator podjednako u svim smjerovima mogu stići do mjesta prijema različitim putovima, pa se prema tome različito nazivaju (sl. 1). *Površinski val* zove se elektromagnetski val koji se širi uz samu površinu Zemlje. *Reflektirani val* je elektromagnetski val koji se na svom putu reflektira od površine Zemlje. *Direktan val* širi se pravocrtno ili gotovo pravocrtno od odašiljačke antene prema mjestu prijema koje je u području njegove »vidljivosti«, tj. iznad radio-horizonta. *Prostorni val* usmjeren je prema gornjem dijelu atmosfere, odakle se pod određenim uvjetima vraća prema površini Zemlje. O troposferskom prostornom valu govori se kad val prodire samo kroz slojeve atmosfere (troposferu), o ionosferskom prostornom valu kad se probija kroz atmosferu i izlazi u svemirski prostor. O postojanju svake pojedine od tih vrsta valova na određenom mjestu prijema govori se dotle dok je jakost polja vala te vrste veća od jakosti polja valova druge vrste na istom mjestu.



Sl. 1 Vrste zračenih valova. 1 Prostorni val, 2 direktan val, 3 reflektirani val (od površine Zemlje), 4 površinski val; Z površina Zemlje, A_0 antena odašiljača, A_p antena prijemnika

Antena odašiljača nije izotropni radijator. Vertikalni dijagram zračenja za pojedine vrste antena različit (za linearne antene, npr., on ovisi o njihovoj električnoj duljini), pa sektori u kojima antene zrače najveći dio energije leže pod različitim elevacijama. Prema namjeni odašiljača bira se antena koja zrači najjače u željenom smjeru. Tako se, npr., za radiodifuzijske odašiljače biraju antene koje zrače pretežno površinski val, a za kratkovalne (visokofrekvencijske) odašiljače, kojima se održavaju radio-veze na velike udaljenosti, antene koje zrače pretežno prostorni ionosferski val pod najpovoljnijom elevacijom.

Medij kojim se šire radio-valovi od odašiljačke antene do mjesta prijema većinom je zemaljska atmosfera, ali se radio-valovi šire i kroz svemirski prostor, kroz vodu i kroz gornji sloj čvrste zemaljske kore.

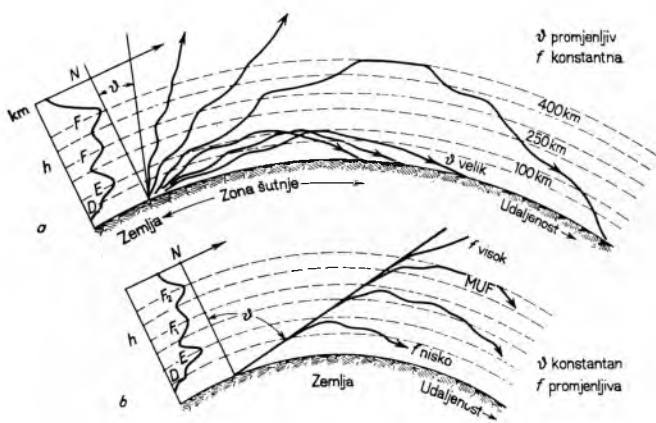
Atmosfera Zemlje može se podijeliti na troposferu i ionosferu.

Troposfera je najdonji sloj atmosfere. Ona se prostire od površine Zemlje do visine $8 \dots 11$ km u polarnim krajevima i na umjerenim geografskim širinama, u tropskim krajevima do visine $15 \dots 18$ km. Taj sloj sadrži 4/5 ukupne mase atmosfere i svu vodu paru koja se u atmosferi nalazi. U njemu se odvijaju meteorološke pojave (vjetar, oblaci, kiša itd., v. *Meteorologija*). Električna vodljivost tog sloja pod normalnim je meteorološkim prilikama neznatna. S visinom iznad površine Zemlje mijenjaju se gustoća (tj. tlak i temperatura) i vlažnost zraka u troposferi, a s njima i elektrodinamička svojstva, od kojih, opet, ovisi indeks loma (refrakcije) za elektromagnetske valove (v. dalje). Indeks loma troposfere neznatno odstupa od jedinice (indeksa loma vakuuma), ali zbog njegove promjenljivosti s visinom, u troposferi dolazi do refrakcije radio-valova svih frekvencija, tj. do povijanja njihovih putanja, obično prema površini Zemlje. U troposferi dolazi također do apsorpcije i rasipanja radio-valova.

Ionosfera je vanjski, električki vodljivi sloj zemaljske atmosfere. Proteže se od visine $60 \dots 80$ km nad površinom Zemlje pa do iznad 1000 km. (Prema mjerenjima na svemirskim letjeli-

camu gornja joj je granica tek kod $\sim 20\,000$ km.) Ionosfera predstavlja razrijeđenu plinovitu plazmu, tj. sastoji se od molekula i iona razrijeđenog plina u kojemu su prisutni u određenoj koncentraciji i slobodni elektroni. Do ionizacije plina i oslobađanja elektrona dolazi za vrijeme dana djelovanjem Sunčevog zračenja, uglavnom ultraljubičastog, u manjoj mjeri također rendgenskog i korpuskularnog. Rekombinacija slobodnih elektrona i iona (v. *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 672) u višim slojevima ionosfere je neznatna zbog njezine razrijeđenosti; u niskim slojevima, gdje je koncentracija iona i elektrona veća, ona je tako znatna da se u noćnim satima efekti ionizacije poništavaju.

Ekperimentalno je utvrđeno da u ionosferi postoji na različitim visinama nekoliko relativnih maksimuma ionizacije. Područje ionosfere u kojem se pojavljuje jedan od relativnih maksimuma ionizacije naziva se uslovno *slojem ionosfere*. Takav sloj obično nema oštiri granica; u praksi se granice iznad i ispod maksimuma običavaju izražavati na osnovi određene matematičke aproksimacije visinske raspodjele ionizacije u sloju (npr. na osnovi paraboličnog zakona). Razlikuju se ovi slojevi (v. sl. 2): *sloj D* (60 ... 90 km iznad površine Zemlje), *sloj E* (100 ... 150 km), *sloj F₁* i *sloj F₂* (iznad 200 km). Sloj D postoji samo za dana, po nastupu noćnog mraka on brzo nestaje. U tom se sloju valovi visokih i srednjih frekvencija apsorbiraju, a valovi niskih frekvencija reflektiraju. Sloj E je postojaniji od sloja D, ionizacija u njemu je noću slabija, ali po pravilu samo djelomično nestaje. U njemu dolazi do refleksije valova srednje frekvencije (noću i niske), ponekad i valova visoke frekvencije. Sloj F razdvaja se ljeti za dana na dva sloja, *F₁* i *F₂* (tj. u vrijeme kad postoji istovremeno i proces ionizacije i proces rekombinacije obrazuju se dva maksimuma ravnotežne koncentracije elektrona). U sloju *F₂* nosioci električnog naboja su uglavnom elektroni, on ima dosta jasno izraženu donju granicu i predstavlja glavni sloj refleksije za valove visoke frekvencije.



Sl. 2. Gustoća ionizacije na pojedinim visinama atmosfere i refrakcija radio-valova u ionosferi: a pri stalnoj frekvenciji odašiljanja i promjenljivoj kutu zračenja, b pri stalnom kutu zračenja i promjenljivoj frekvenciji; h visina ioniziranog sloja iznad zemlje, N gustoća ionizacije; D, E, *F₁*, *F₂* ionizirani slojevi; δ kut zračenja, MUF gornja granična frekvencija (v. str. 626)

Rasprostiranje valova u ionosferi ovisno je u znatnoj mjeri o stupnju ionizacije medija i o frekvenciji valova. Rasprostiranje radio-valova vrlo je promjenljivo u prostoru i vremenu u ovisnosti o djelovanju zemaljskog magnetizma i ciklusima Sunčeve aktivnosti. O ionosferskoj refrakciji i apsorpciji valova u ionosferi v. dalje.

Tlo i voda. Pri upadu radio-vala u vodu ili zemaljsko tlo jedan se dio vala reflektira, a drugi dio prodire u medij, gdje se njegova energija postepeno pretvara u toplinu. Dubina prodiranja raste s duljinom vala (odn. opada s frekvencijom), a obratno je razmjerna električnoj vodljivosti medija. Tako npr. metarski (vrlo kratki) valovi prodiru u tlo i vodu do neznatne dubine (0,1 ... 1 m), a mirijametarski (vrlo dugi) valovi do 100 m u tlo (što se iskorištava za geološka istraživanja) i do 15 m u morsku vodu (što omogućava npr. radio-vezu sa zaronjenim podmornicama).

U svemirskom prostoru, koji predstavlja krajnje razrijeđenu plazmu, radio-valovi se šire pravocrtno i bez dodatnog prigušenja.

Refrakcija, refleksija, difrakcija, disperzija i apsorpcija elektromagnetskih valova. Općenito o tim pojavama v. članak *Optika*. Ovdje će biti izloženo kako one djeluju na širenje radio-valova.

Refrakcija elektromagnetskih valova je promjena smjera širenja valova uzrokovana promjenom elektrodinamičkih svojstava medija. Elektrodinamička svojstva medija izražavaju se njegovim indeksom loma (refrakcije).

Veza između indeksa loma i elektrodinamičkih svojstava medija prikazana je jednadžbom $n = \sqrt{\epsilon \mu}$, gdje je ϵ dielektričnost, a μ magnetski susceptibilitet medija. Indeks loma je također omjer između brzine v_0 širenja vala u vakuumu i faze brzine v_m širenja tog istog vala u dotičnom mediju: $n = v_0/v_m$.

Relativni indeks loma između dva medija je omjer njihovih apsolutnih indeksa loma:

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}}{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}} = \frac{v_2}{v_1},$$

gdje se indeksi 1 i 2 odnose na medije.

Indeks loma ovisi o frekvenciji vala i o stanju medija (njegovoj temperaturi, tlaku, sastavu itd.). Kad se indeks loma medija kontinuirano mijenja, elektromagnetski se val pri prolazu kroz taj medij pod nekim kutom prema smjeru gradijenta brzine širenja savija, udaljavajući se od tog smjera ako se širi u smjeru u kojemu indeks loma opada. Ta se pojava zove *refrakcija*. Do *refrakcije u troposferi* dolazi zbog promjena temperature, tlaka i/ili vlažnosti zraka s promjenom visine iznad površine Zemlje. Budući da indeks loma atmosfere po pravilu opada s porastom visine nad Zemljom, refrakcijom se u troposferi val po pravilu savija prema Zemlji. *Ionosfersku refrakciju* uzrokuju slobodni elektroni u pojedinim slojevima ionosfere. Ona se tumači time da elektroni pod utjecajem elektromagnetskog polja vibriraju i uslijed toga djeluju kao sitne antene koje apsorbiraju energiju iz vala što nailazi i zrače je natrag pod određenim kutom uz promjenu faze. Rezultat čestog ponavljanja tog zbivanja je postepeno savijanje putanje (normalne na frontu) vala pri prolazu kroz ionizirani sloj. Zakrivljenost putanje to je veća što je veća koncentracija elektrona i što je niža frekvencija vala. Ako frekvencija nije veća od određene gornje granične, tzv. *kritične frekvencije* (30 MHz, povremeno i do 60 MHz), val se vraća na Zemlju; ako jest veća, val odlazi u svemirski prostor. Na frekvencijama iznad kritične elektroni se, naime, više ne pobuđuju na vibracije, pa valovi prolaze kroz ionizirane slojeve bez refrakcije.

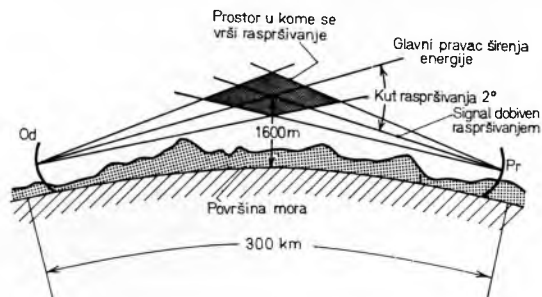
Do refrakcije površinskih radio-valova dolazi i pri *prelasku valova s mora na kopno* i obratno. To je tzv. *obalski efekt*, koji unosi greške u radio-smjerove određivane radio-goniometrima.

Refleksija elektromagnetskih valova. U općenitom slučaju na granici medija s različitim elektrodinamičkim svojstvima nastaje pored loma elektromagnetskog vala i njegovo odbijanje, refleksija, a pod određenim uvjetima refleksija prevladava. Tako se radio-valovi reflektiraju od ionosfere i inverznih slojeva troposfere, od površine Zemlje, od slojeva stijena pod površinom Zemlje, od različitih objekata na Zemlji, od antenskih reflektora, itd. Dvije paralelne granične plohe među medijima različitih elektrodinamičkih svojstava ili jedna granična ploha u mediju koje uzrokuje savijanje putanje radio-vala natrag do granične plohe od koje se je odbio, može djelovati kao prirodni valovod kojim se energija zračenja bez znatnijeg gušenja prenosi daleko za radio-horizont. Takvo se *valovodno širenje* visokofrekventnih valova opaža naročito u atmosferi nad morem. Prilikom refleksije radio-vala nastaje i promjena njegove faze. Refleksija ovisi, dakako, o frekvenciji vala i također o njegovoj polarizaciji.

Difrakcija ili ogib radio-valova na prepriki koja leži između odašiljačke i prijemne antene pojavljuje se pri širenju tih valova u troposferi. Uslijed ogibanja valova na radio-horizontu mogu se uspostaviti radio-veze i s prijemnicima iza tog horizonta. Pri ogibanju radio-vala objektima na površini Zemlje, npr. gorskim lancem, može se, uslijed interferencije izravnog i reflektiranog vala ispred prepreke i iza nje, dobiti na mjestu prijema i jače polje nego što bi na tom mjestu postojalo bez prepreke. Ova se pojava, međutim, već na srednjim udaljenostima ne može iskoristiti zbog toga što i male promjene atmosferskih prilika dovode do znatnijih kolebanja jakosti polja.

Raspršivanje (disperzija) elektromagnetskih valova. Kad se refrakcija, difrakcija i refleksija valova pojavljuju istovremeno na takav način da ih je nemoguće razdvojiti, kaže se da se energija

radio-valova raspršuje. To se događa naročito u donjoj troposferi zbog pojava turbulencije u njoj, koje uzrokuju nepravilne promjene indeksa loma u prostoru i vremenu. Uslijed raspršenja radio-valova u područjima turbulencije, jedan se dio energije tih valova vraća na Zemlju daleko iza radio-horizonta (sl. 3). Međutim, ener-



Sl. 3. Profil širenja radio-valova u vezi s troposferskim raspršivanjem

gija koja se vraća prema Zemlji i stiže na mjesto prijema samo je mali dio ukupno zračene energije, pa su za uspješno uspostavljanje radio-veze na osnovi te pojave potrebne velike zračene snage. S odašiljačima snage 1 ... 100 kW, jako usmjerenim antenama i radio-valovima frekvencije 350 ... 8000 MHz postižu se dometi od 300 ... 500 km. Takve se veze obično iskorištavaju za multiplexni prijenos. Zbog raspršivanja valova na oblacima, magli, oborinama i sl. nastaju u troposferi gubici energije elektromagnetskih valova.

Apsorpcija elektromagnetskih valova uzrokuje gušenje (slabljenje intenzivnosti) tih valova uslijed uzajamnog djelovanja između elektromagnetskog polja i materije, kojim se djelovanjem elektromagnetska energija pretvara u druge oblike energije. Pri širenju valova uz površinu Zemlje jedan se dio radio-valova apsorbira u tlu. U troposferi nastaje istovremeno s raspršivanjem radio-valova na oblacima, magli i oborinama također apsorpcija valova u njima. Apsorpcija radio-valova u troposferi jako se povećava s porastom frekvencije, a naročito je velika na frekvencijama u blizini vlastitih frekvencija titranja molekula plinova i vode u sva tri agregatna stanja (iznad 10 GHz). Tada nastaje rezonantna (selektivna) apsorpcija u molekulama; npr. molekule kisika imaju linije apsorpcije na 60 i 118,75 GHz, a vodena para na 22,2 i 183 GHz. U ionosferi dolazi naročito do apsorpcije valova niskih i srednjih frekvencija u slojevima D i E. Elektroni koje ti valovi uzbuđuju na titranje prenose energiju titranja prilikom kolizija na čestice plina umjesto da je zrače.

Širenje valova pojedinih frekvencijskih područja. Valovi frekvencije 10 do 100 kHz, tj. iz područja vrlo niskih i donjeg dijela niskih frekvencija (duljih mirijameterskih i kraćih kilometarskih valova) šire se kao površinski i prostorni val koji se reflektira s ionosfere na visini 60 ... 90 km. Jakost polja na određenoj udaljenosti od odašiljača zbroj je jakosti polja jednog i drugog vala, s time da do udaljenosti od ~ 300 km prevladava polje površinskog vala, koji se zbog troposferske refrakcije povija za zakrivljenošću Zemljine površine; već nakon ~ 400 km prevladava polje prostornog vala. Karakteristična je za te valove mala apsorpcija površinskog vala, postizanje velikih dometa i slabo izražen fading (engl. fading, rus. *замирания*, *zamiranja*). Apsorpcija u ionosferi ovisi o dobu dana i godine i o aktivnosti Sunca: apsorpcija je najmanja noću, zimi i za vrijeme smanjene Sunčeve aktivnosti (u ciklusu od 11 godina). Pri izlazu i zalazu Sunca nastaju poremećaji širenja valova.

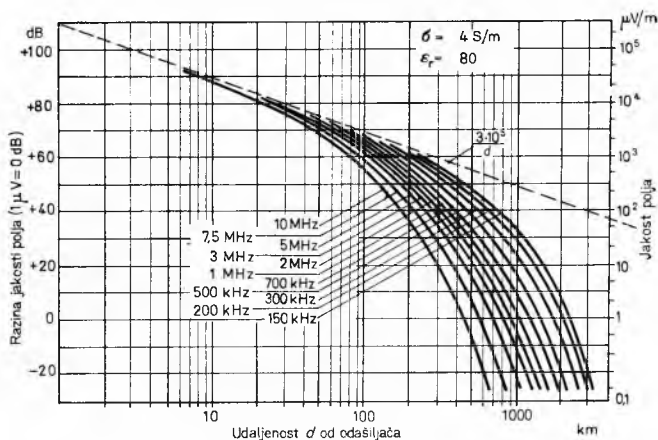
Valovi ovog frekvencijskog područja šire se između površine Zemlje i donje ionosfere kao u nekom sfernom valovodu; vrlo niskofrekventni valovi ispod 25 kHz mogu na taj način doseći vrlo visoke domete. S obzirom na to da je apsorpcija prostornog vala tih frekvencija (između 15 i 20 kHz) najmanja, takvi su (mirijameterski) valovi prikladni za veze na velike udaljenosti (npr. do 10 000 km), te se oni danas i primjenjuju u nekim najnovijim navigacijskim sistemima, npr. u sistemu Omega.

Valovi frekvencije 100 kHz do 10 MHz, tj. iz gornjeg dijela područja niskih, iz područja srednjih i iz najdonjeg dijela područja visokih frekvencija (kratkih kilometarskih, hektometarskih

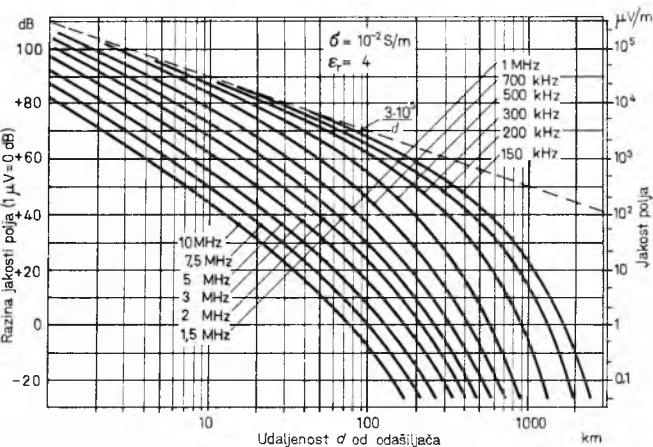
i dugih dekameterskih valova) šire se pretežno kao površinski val; taj uglavnom i služi za održavanje radio-veza. Njegov se domet s povećanjem frekvencije postepeno smanjuje od ~ 1000 km na najvišim frekvencijama do nekoliko stotina ili desetaka kilometara na najvišim. Prostorni val tih frekvencija u toku se dana uglavnom apsorbira u ionosferskim slojevima D i E. Noću, kad ti slojevi (jedan u cjelini, a drugi bar djelomice) nestaju, prostorni val koji se reflektira od sloja F ionosfere omogućuje i veće domete. Time se tumači i pojava da se danju mogu na srednjim frekvencijama primati samo lokalne i bliske radiodifuzijske stanice, a noću i vrlo udaljene.

Za frekvencijsko područje od 150 kHz do 10 MHz izradila je CCIR na osnovi provedenih mjerenja i računanja grafikone iz kojih se može očitati predvidljiva jakost polja valova određene frekvencije na određenoj udaljenosti od odašiljača. Sl. 4 prikazuje takav grafikone za rasprostiranje valova iznad kopna, a sl. 5 za rasprostiranje iznad mora.

U te dijagrame ulazi se s udaljenošću d na osi apscisa i ide se po okomici do presjecišta s krivuljom dane frekvencije. Tražena jakost polja očitava se kao ordinata tog presjecišta ili na lijevoj skali kao razina u decibelima u odnosu prema 1 μ V ili na desnoj skali izravno u mikrovoltima. Očitane jakosti polja vrijede za zračenu snagu odašiljača 1 kW s odašiljačkom antenom koja daje vertikalno polarizirani val i nije dulja od jedne četvrtine valne duljine. Jakost polja za druge snage zračenja dobije se množenjem rezultata dobivenog iz dijagrama s drugim korijenom zračene snage odašiljača u kilovatima.



Sl. 4. Dijagram za određivanje predvidljive jakosti polja za frekvencije 150 kHz do 10 MHz pri rasprostiranju valova iznad kopna (prema CCIR). Podaci vrijede za zračenu snagu 1 kW



Sl. 5. Dijagram za određivanje predvidljive jakosti polja za frekvencije 150 kHz ... 10 MHz pri rasprostiranju valova iznad mora (prema CCIR). Podaci vrijede za zračenu snagu 1 kW

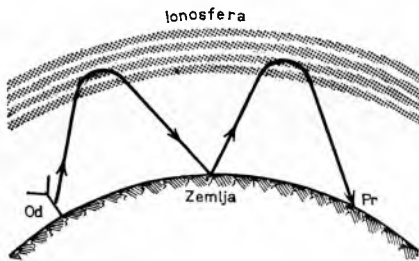
Krivulje na sl. 4 i 5 pokazuju dvije osnovne karakteristike: a) s porastom frekvencije smanjuje se domet površinskog vala i sve je veće odstupanje od pravca (na slici crtkanog) koji prikazuje to smanjenje izračunato na osnovi idelizirajućih pretpostavki; b) odstupanje od idealiziranog rješenja na višim je frekvencijama daleko manje za valove koji se rasprostiru nad morem nego za valove koji se rasprostiru nad kopnom. S porastom frekvencije ta razlika postaje sve manja i na 150 kHz više je nema.

Prijem valova srednje frekvencije podložan je fedingu i nelinearnim iskrivljenjima u ionosferi.

Valovi frekvencije od 10 do 30 MHz, tj. iz ostalog dijela područja visokih frekvencija (dekameterskih valova) imaju mali domet površinskog vala: nekoliko stotina kilometara na kraju nižih frekvencija, a nekoliko desetaka kilometara na suprotnom kraju područja. Stoga površinski val ne dolazi u obzir za održavanje veza pomoću tih valova. Ako je radna frekvencija valova pravilno odabrana, tj. ako je ona između donje granične frekvencije ispod koje je apsorpcija u ionosferi jaka i gornje granične (kritične) frekvencije iznad koje se valovi više ne vraćaju iz ionosfere, prostorni se val u tom frekvencijskom području nakon refrakcije u višim slojevima ionosfere vraća prema površini Zemlje, te je prikladan za prijenos informacija bežičnim putem na veće i najveće udaljenosti, i to relativno malom zračenom snagom. Stoga se u tom frekvencijskom području odvija velik dio ukupnog bežičnog saobraćaja, naročito među kontinentima, gdje se usmjerene veze ne mogu ostvariti.

Izbor frekvencije za premoštenje neke određene udaljenosti ovisi o geografskoj širini i razlici geografske duljine obaju mjesta između kojih se uspostavlja veza, o dobu dana, godine i solarnog ciklusa. Općenito će biti potrebne to više frekvencije što je geografska širina manja, što je podne bliže sredini putanje i što je maksimum Sunčeve djelatnosti bliži. Ionizacija ionosferskih slojeva ovisi, naime, o svim tim faktorima. Stoga je očito da će se zbog promjene gustoće slobodnih elektrona i zbog promjene visine ioniziranih slojeva pomicati i mjesto najboljeg prijema u ovisnosti o dobu dana i noći, odnosno, da će za zadržavanje veze između istih odašiljača i prijemnika biti potrebno u toku dana više puta mijenjati frekvenciju. Za sve te prilike postoji određena gornja granična (tj. još upotrebljiva) frekvencija (MUF, od engl. Maximum Usable Frequency) i donja granična frekvencija (LUF, od engl. Lowest Usable Frequency). Podatke o tim frekvencijama objavljuju unaprijed u nekim zemljama posebne službe koje se bave osmatranjem, praćenjem i prognozom događaja u ionosferi.

Za premoštenje srednjih udaljenosti dovoljan je jedan skok prostornog vala (v. sl. 1), za premoštenje najvećih udaljenosti primjenjuje se prostorni val koji se nakon povratka na površinu Zemlje s nje ponovo reflektira i zatim opet na nju vraća (sl. 6).



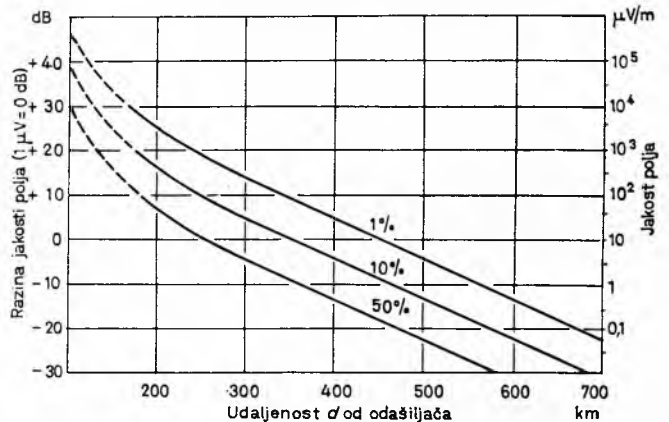
Sl. 6. Refleksija valova od ionosfere pri dvostrukom skoku

Udaljenost jednog skoka iznosi najviše 4000 km. Na taj način može val također obići Zemlju i doći na prijemnik po drugi put kao jeka. Za prijem valova tog frekvencijskog područja karakteristični su intenzivni fedinzi, uvjetovani slučajnim fluktuacijama elektrodinamičkih svojstava ionosfere, i postojanje tzv. zone šutnje između udaljenosti od odašiljača veće od dometa površinskog vala i udaljenosti manje od udaljenosti na kojoj se val vraća iz ionosfere do površine Zemlje.

Valovi frekvencije iznad 30 MHz, tj. iz područja vrlo visokih i ultravisokih frekvencija (metarskih, decimetarskih i centimetarskih valova) ne pobuđuju više elektrone u ionosferi na oscilacije, pa stoga bez refleksije prodiru kroz gornje slojeve atmosfere. Prostorni val tih frekvencija stoga za zemaljske veze nije upotrebljiv, ali dolazi u obzir za radio-veze koje se ostvaruju preko satelita (v. poglavlje Primjena elektronike u satelitskim komunikacijama) i u radio-astronomiji. Površinski val tih frekvencija vrlo brzo se apsorbira, domet mu je svega po koji kilometar. Zemaljske radio-veze s valovima tih frekvencija mogu se ostvariti samo direktnim i od površine Zemlje reflektiranim valom. Za tehničku realizaciju radio-komunikacija primjenjuje se, prema tome, val koji se širi

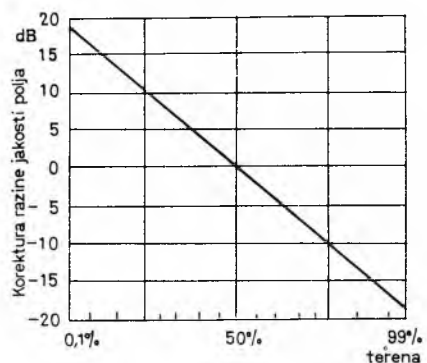
(praktično) pravocrtno u troposferi iznad Zemlje između mjesta odašiljanja i prijema. Osnovna je karakteristika takvog širenja da na mjestu prijema treba očekivati, osim direktnog, i reflektirani val, koji zbog različite duljine puta i zbog faznog skoka na mjestu refleksije nije uvijek u fazi s direktnim valom. Kako se polja obaju valova zbrajaju ne samo po veličini nego i po fazi, rezultantno polje na mjestu prijema može biti veće ili manje od polja izravnog vala. Kako razlika u duljini puta i fazi između direktnog i reflektiranog vala ovisi, osim o udaljenosti od odašiljačke do prijemničke antene, i o visini tih antena iznad površine Zemlje, te visine također ulaze u proračune predvidljive jakosti polja na mjestu prijema. (O tome više vidi na drugom mjestu u ovoj enciklopediji, gdje su obrađene usmjerene veze u radio-komunikacijama.) Na duljinu puta valova može utjecati troposferna refrakcija, a na jakost njihovog polja apsorpcija u magli, kiši i sl., za centimetarske valove i rezonantna apsorpcija molekula vodene pare i kisika.

Sve u svemu može se reći da predviđanja polja u području vrlo visokih frekvencija znatno ovisi i o slučajnim promjenama u prostoru i vremenu; stoga ona mogu biti samo statističke prirode, tj. mogu se dati samo kao vjerojatnosti, npr. kako to prikazuje



Sl. 7. Vjerojatna jakost polja u 1%, 10% i 50% vremena za 50% terena (prema CCIR)

sl. 7. Na osi ordinata dijagrama u toj slici nanese su razine jakosti polja u decibelima iznad $1 \mu V$, na osi apscisa nanesen je domet u kilometrima, a parametar je vjerojatnost. Dijagrami poput ovog izrađeni su za zračenu snagu odašiljanja 1 kW i visinu odašiljačke antene 300 m. (Pod visinom antene razumije se njezina visina iznad srednje visine terena na udaljenosti 3...15 km od točke odašiljanja.) Jakosti polja za druge visine antena mogu se dobiti ako se u isti dijagram uđe s korigiranim dometom prema formuli $d' = d + 70 - 4,1 \sqrt{h}$ [km], u kojoj d znači stvarni, a d' korigirani domet. U dijagramu očitana jakost polja može se



Sl. 8. Korektura vjerojatne razine jakosti polja za terena koji su različiti od 50% terena (prema CCIR)

očekivati na 50% terena s vjerojatnošću 1, 10 ili 50% (već prema tome koja se od krivulja u dijagramu upotrijebi za grafičko određivanje), tj. u 1, 10 ili 50% vremena. Ekstrapolacijom i intra-

polacijom mogu se dobiti i druge vjerojatnosti (postoci vremena). Pomoću dijagrama na sl. 8 mogu se dobiti korekcije za druge postotke terena. (O lokaciji i smještaju odašiljača na vrlo visokim frekvencijama v. u poglavlju Elektronički uređaji u radio-prijenosu.)

Valovi vrlo visokih frekvencija se na radio-horizontu difrakcijom ne rasprostiru daleko iza tog horizonta, ali se mogu, slijedeći zakrivljenost Zemljine površine, rasprostirati na udaljenost od nekoliko stotina kilometara kroz prirodne troposferne valovode koji nastaju pod posebnim meteorološkim uvjetima, a i na više od 1000 km refleksijom i difrakcijom na slojevitim tvorevinama u troposferi i raspršivanjem na turbulentnim nehomogenostima troposfere. Za uspostavljanje veza uz korištenje tih efekata potrebni su odašiljači velike snage, prijemnici velike osjetljivosti i oštro usmjerene antene. Prijem u tim vezama prate fedinzi zbog interferencije valova i fluktuacijâ u ionosferi.

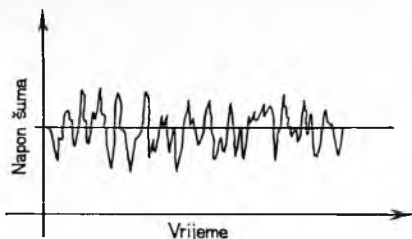
LIT.: D. E. Kerr, Propagation of short radio waves, New York 1951. — Л. А. Вайнштейн, Электромагнитные волны, Москва 1957. — П. П. Грудинская, Распространение ультракоротких волн, Москва 1960. — Р. Кинг, У Тай-Цзунг, Рассеяние и дифракция электромагнитных волн, Москва 1962. — F. Du Castel, Propagation troposphérique, Paris 1963. — G. Bronzi, Fondamenti di radiotrasmissioni, Roma 1963. — А. Г. Аренберг, Распространение дециметровых волн и сантиметровых волн, Москва 1966. — И. В. Крутецкий, Дифракция электромагнитных волн на проводящих телах в морской среде, Ленинград 1969. — I. Ranzi, Propagazione troposferica e ionosferica delle onde elettromagnetiche, Roma 1969. — О. Б. Черный, Распространение радиоволн, Москва 1972.

Z. Smrkic

ŠUM

Šum se zovu spontane električne fluktuacije koje se pojavljuju u električnim i elektroničkim (komunikacijskim) sistemima. Šum je nepoželjan jer ograničava moć i kviri kvalitet prijenosnih sistema.

Šum se može čuti i vidjeti. Na izlazu pojačala s velikim pojačanjem, kojemu na ulaz nije priveden nikakav signal, moći će se npr. registrirati fluktuacije napona prikazane na sl. 1. Ako



Sl. 1. Prikaz napona bijelog šuma

se na izlaz pojačala priključi zvučnik, čut će se iz njega šum. U televizijskim prijemnicima šum se reproducira na ekranu reproductorske cijevi zajedno s korisnim signalom, i kad je napon signala prenikak, vidi se kao smijeg.

S obzirom na izvor nastajanja, šum se dijeli na dvije grupe: na šum koji nastaje izvan sistema (kozmički, atmosferski, elektrostatički, od aparata i uređaja, itd.) i na šum koji nastaje unutar sistema (termički šum, šum u vakuumskim elektronkama, šum poluvodičkih komponenata, kontaktni šum i sl.). Ovdje će biti govora samo o šumu u sklopovskoj tehnici; s obzirom na to da je on neizbježan pratilac električnog signala, potrebno je poznavati i istraživati njegove osobine.

Objašnjenje pojmova

Pri razmatranju i analizi šuma susreću se neki specifični pojmovi, koje treba radi razumijevanja daljeg izlaganja najprije objasniti i definirati.

Ekvivalentni otpor šuma R_{eq} . Uslijed gibanja toplinski uzbuđenih elektrona u vodiču poteče u njemu struja, zbog koje se na njegovim krajevima pojavljuje razlika potencijala. Nyquist je pokazao da je aritmetička sredina kvadratâ napona šuma jednaka

$$\overline{e_s^2} = 4 k T \Delta f R_{eq}, \quad (1)$$

gdje je k Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T apsolutna temperatura, Δf širina frekvencijskog pojasa koji se promatra i R_{eq} ekvivalentni otpor vodiča.

Na temperaturi 27 °C (300 K) dobije se iz relacije (1) za ekvivalentni otpor u omima brojčana jednadžba

$$R_{eq} = 0,66 \cdot 10^{20} \frac{e_s^2}{\Delta f}$$

(e_s u voltima, Δf u hercima).

Na taj se način može bilo koji izvor šuma zamijeniti ekvivalentnim otporom šuma definiranim prema relaciji (1).

Širina frekvencijskog pojasa ili frekvencijskog opsega Δf je razmjerno uski pojas frekvencija (npr. propusni pojas nekog uređaja) raspoređen oko svoje središnje frekvencije f . Unutar tog pojasa snaga je šuma po jedinici frekvencije svugdje jednaka. Pojam širine frekvencijskog pojasa odnosi se uvijek na uređaj o kome je riječ, kojim se mjeri, itd.

Kad bi se pri izračunavanju šuma pojačala, filtera itd. upotrijebila kao širina frekvencijskog pojasa, što je inače uobičajeno, frekvencijski opseg B između dvije određene točke (npr. između točaka propuštanja pola snage), ne bi se redovito dobio dovoljno točan podatak za ukupno propuštenu snagu šuma. Stoga se — ako se želi veća točnost — uzima u račun zamišljena efektivna ili ekvivalentna širina pojasa šuma B_{eq} jednaka širini frekvencijskog pojasa idealnog filtra s propusnom frekvencijskom karakteristikom pravokutnog oblika (tj. s okomitim bokovima i vodoravnim gornjim dijelom) koji bi propuštao istu ukupnu snagu šuma kao krugovi promatranog uređaja. Ekvivalentna širina pojasa B_{eq} dobiva se iz širine pojasa B množenjem s faktorom koji je za različite slučajeve poznat i kojemu je vrijednost za uređaje s velikim brojem usklađenih krugova bliska jedinici.

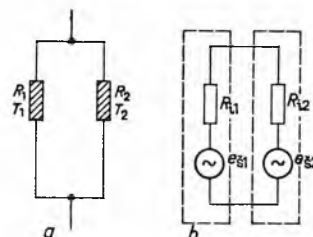
Temperatura šuma T_s je ona (pretpostavljena) temperatura pri kojoj bi na izlazu iz nekog uređaja snaga samo termičkog šuma bila jednaka snazi ukupnog stvarnog šuma na radnoj temperaturi. Ova veličina služi kao mjerilo šuma i iznosi npr. u stepenu miješanje radara 1200–2000 K, a u hladenom parametarskom pojačalu s varaktorskom diodom (v. Elektronika, uređaji mikrovalne tehnike, str. 577) samo ~ 30 K.

Ako je snaga šuma na izlazu iz uređaja P_s , a širina frekvencijskog opsega Δf , temperatura šuma iznosi (v. jedn. 4):

$$T_s = \frac{P_s}{k B_{eq}}. \quad (2)$$

Ako se uvrsti $P_{s1} = P_s/\Delta f$, tj. ako se snaga šuma karakterizira snagom po jedinici širine frekvencijskog opsega, dobije se jednadžba $T_s = P_{s1}/k$, a ako se uvrsti numerička vrijednost konstante k u jedinicama J/K, dobije se računaska formula $T_s = 7,25 \times 10^{22} P_{s1}$ (T_s u kelvinima, P_{s1} u W/Hz). Prema jedn. (2) temperatura šuma je funkcija frekvencije. (I snaga P_{s1} po jedinici širine frekvencijskog opsega ovisi, općenito, o frekvenciji. Šum kojemu je P_{s1} neovisan o frekvenciji zove se, u analogiji sa svjetlom, bijeli šum. Nasuprot tome su u obojenom šumu pojedine frekvencije ili pojedini frekvencijski opsezi naročito naglašeni.)

Ekvivalentna temperatura šuma T_{eq} . Ako su dva otpornika otpora R_1 i R_2 spojena paralelno, prema sl. 2, i ako je jedan



Sl. 2. Sheme za tumačenje ekvivalentne temperature šuma. a Shema sklopa, b nadomjesna shema

na temperaturi T_1 , a drugi na temperaturi T_2 , aritmetička je sredina kvadratâ napona šuma unutar dionog sklopa što ga tvore samo ti otpornici među sobom spojeni u seriji, s otporom $R_1 + R_2$, jednaka

$\overline{e_s^2} = 4 k T_1 R_1 \Delta f + 4 k T_2 R_2 \Delta f = 4 k T_{eq} (R_1 + R_2) \Delta f$, gdje je T_{eq} ekvivalentna temperatura šuma tog dionog sklopa de-