

SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU

RADNI MATERIJALI

Prof. dr. sc. Danko Kezić

***OSNOVE RADIOTEHNIKE ZA POMORSKE
NAUTIČARE***

Split, kolovoz 2008.

SADRŽAJ:

1. UVOD

2. VRSTE RADIOKOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA

3. ELEKTROMAGNETSKI VALOVI

3.1 Opći pojmovi

3.1.1 Osnovne karakteristike elektromagnetskog vala

3.2 Karakteristike rasprostiranja elektromagnetskih valova

4. NAČINI RASPROSTIRANJA ELEKTROMAGNETSKIH VALOVA

5. IONOSFERSKO RASPROSTIRANJE PROSTORNOG VALA

5.1 Procesi stvaranja ioniziranih područja u atmosferi

5.2 Znakovite frekvencije

5.3 Iznimni uvjeti rasprostiranja

6. TROPOSFERSKO RASPROSTIRANJE

6.1 Prostorni val i rasprostiranje visokofrekvencijskih valova

6.2 Visina antene, kut zračenja i polarizacija

6.3 Troposferska temperaturna inverzija

7. OSNOVNE DEFINICIJE RADIOTEHNIKE

8. OSNOVE PREDAJNIKA (ODAŠILJAČA)

8.1. Općenito o konstrukciji odašiljača

8.2. Osnovne značajke odašiljača

8.3 Smetnje koje izazivaju odašiljači

8.4 Elektronički sklopovi odašiljača

8.4.1 Odašiljač s translacijom ili bez nje

8.4.2 Način rada pojedinih stupnjeva odašiljača

9. OSNOVE PRIJAMNIKA

9.1. Općenito o konstrukciji prijamnika

9.2 Osnovne karakteristike prijamnika

9.3 Superheterodionski prijamnik

9.4. Elektronički sklopovi prijemnika

9.4.1 Blok sheme

9.4.2. Način rada pojedinih stupnjeva

10. MODULACIJA

10.1 Amplitudna modulacija – AM

10.2. Frekvencijska FM i fazna PM modulacija

10.3. Impulsne modulacije

10.4. Način označavanja vrste modulacija

10.4.1. Primjeri označavanja radioemisije

10.4.2. Stare oznake za označavanje radioemisije

10.4.3 Grafički prikaz spektra moduliranih signala za razne vrste radioemisija

10.5 Modulacije koje se koriste u pomorstvu

11. ANTENE

11.1. Općenito o antenama

11.1.1 Duljina antene

11.1.2. Dijagrami zračenja

11.1.3. Kut zračenja

11.1.4. Usmjerenost antene

11.2 Primjeri antena

11.2.1. Poluvalni dipol napajan u sredini

11.2.2. Trap-dipol (W3DZZ-antena)

11.2.3 Savijeni dipol

11.2.4. Vertikalna antena

11.2.5 GP antena na stupu

11.2.6. Antena s napajanjem na kraju

10.2.7. Troelementna snop-antena

10.2.8. Kvad-antena W9LZX

10.2.9 Parabolična antena

11.3. Brodske antene

11.3.1 Brodska VHF antena

11.3.2 METZ antena

11.3.3 MF/HF antene

11.4. Održavanje antena

1. UVOD

RADIOKOMUNIKACIJE I TELEKOMUNIKACIJE su područje znanosti i komunikacijske tehnike koji se bave odašiljanjem, prijenosom i prijamom poruka (tona, slike, podataka) elektromagnetskim valovima uz upotrebu elektroničkih elemenata i sklopova potrebnih za taj proces. Radiokomunikacije prate razvoj radiotehnike, a danas se radioenergija upotrebljava i izvan područja komunikacija u ograničenom prostoru, ali ta upotreba ne ulazi u okvir radiokomunikacija. Bitna je značajka radiokomunikacija da rade u velikom rasponu frekvencija i snaga te upotrebljavaju raznolike uređaje. U okviru radiokomunikacija proučavaju se problemi zračenja (antene) i rasprostiranja elektromagnetskih valova. Radiokomunikacijski uređaji tehnička su osnova svih radiokomunikacijskih službi kao što su zemaljske usmjerene veze (radiorelejne veze), pokretne radiokomunikacijske službe (zemaljske, pomorske i zračne), satelitske radiokomunikacijske službe, radiodifuzija, radioastronomija, radar, radiolokacija, daljinsko upravljanje, a slični se uređaji upotrebljavaju i u elektromagnetskom mjerenju električnih i neelektričnih veličina, te u primjeni visokih frekvencija u industriji i medicini. Elektronički elementi i sklopovi služe u radiokomunikacijama za generiranje signala (oscilatori), procesiranje signala (modulacija), miješanje i transpoziciju frekvencija te pojačanje i detekciju. Sve se to radi u analognom ili digitalnom obliku. Optičke komunikacije srodno su granično područje radiokomunikacija, a rade u frekvencijskom području iznad onoga za radiokomunikacije.

Danas se u radiokomunikacijama upotrebljavaju elektromagnetski valovi frekvencija od 3 kHz do 400 GHz, pri čemu dio ispod 9 kHz i iznad 275 GHz nije još raspodijeljen. Gornja granica frekvencije za radiokomunikacije od 3000 GHz nije još dostignuta, a moguća upotreba područja iznad 275 GHz osim u dijelu do 381 GHz u kojem eksperimentalno rade pasivne službe, ovisi o tehnološkom napretku. Odašiljači mogu doseći zračenu snagu od nekoliko gigavata, a prijammnici u radioastronomiji primaju snage signala reda 10^{-20} W. Budući da se radi o velikom rasponu snaga i da se elektromagnetski valovi u načelu neograničeno šire postoji problem međusobnog *ometanja radiokomunikacijskih sustava* između vrlo udaljenih dijelova Zemlje. Zbog toga se frekvencije i dopuštene snage odašiljača određuju na međunarodnoj razini. To se odvija u Međunarodnom savezu za telekomunikacije (franc. Union International des Telecommunications, UIT, odnosno engl. International Telecommunication Union, ITU) unutar kojeg djeluje Međunarodni savjetodavni odbor za radiokomunikacije (franc. Comite Consultat International des Radiocommunications, CCIR) i Međunarodni odbor za registraciju frekvencija (engl. International Frequency Registration Board, IFRB). Spomenuti međunarodni odbori donose preporuke i mišljenja koji vrijede za sve zemlje članice a temelje se na znanstvenim istraživanjima i usuglašavanjima u studijskim grupama CCIR-a. Rad se odvija u 13 studijskih grupa koje obuhvaćaju pojedina područja radiokomunikacija. U pojedinim zemljama članicama brigu oko održavanja preporuka vode organizacije kojima je povjerena ta dužnost.

Prva istraživanja u oblasti radiokomunikacija započeli su još u prvoj polovici XIX st. M. Faraday i J. Henry (1843), a J.C. Maxwell matematički je formulirao elektromagnetsku teoriju, kojoj je valjanost eksperimentalno dokazao H. Hertz. On je (1888) konstruirao odašiljač iskrištem koje je pomoću antene generiralo elektromagnetske valove valne duljine od 60 cm (500 MHz) i prijammnik s petljom, odnosno dipolom iskrištem. J.J. Thomson (1893)

utvrdio je mogućnost širenja elektromagnetskih valova kroz šuplje metalne cijevi, što se može smatrati početkom valovodne tehnike a 1895. g. V. Von Lang je eksperimentalno dokazao mogućnost širenja elektromagnetskih valova kroz valovod, pa je tako utemeljena mikrovalna tehnika. Zbog manjeg prigušenja elektromagnetskih valova velikih valnih duljina i mogućnost da se za njih izgrade jaki generatori, mogli su se valovi širiti na velike daljine i bili su vrlo dugo jedino sredstvo komuniciranja. Tek dvadesetih godina našeg stoljeća počinje primjena kratkih valova, a zatim i sve kraćih.

Prvu praktičnu primjenu radiovalova i prijenos poruke Morseovim znakovima ostvario je G. Marconi (1901) odašiljačem snage 15 kW, elektromagnetskim valovima valne duljine od 366 m. Nakon toga naglo se razvijaju elektronički elementi i sklopovi za potrebe radiokomunikacija. Prvi kristalni detektor konstruirali su neovisno H. Dunwoody i G. Pickard (1906). Iste je godine (24. prosinca) uspješan prijenos govora i glazbe ostvario R. Fessenden u SAD-u. Odašiljač s rotirajućim generatorom radio je na frekvenciji od 50 kHz, a snaga mu je bila 1 kW. Modulacija je izvedena u krugu antene pomoću mikrofona. Razdoblje suvremenih elektroničkih sklopova započinje 1907, kad je L. De Fa konstruirao vakuumsku triodu. Početne su nedostatke otklonili H.D. Arnold (1912) i A. Wehnelt.

Prva radiostanica koja je odašiljala obavijesti za javnost već sredinom 1913. bila je stanica Sveučilišta u Wisconsinu (SAD). Posebnu je pozornost izazvala radiostanica koja je nešto kasnije bila postavljena u Arlingtonu (SAD). Odašiljač joj se sastojao od 500 paralelno spojenih trioda. Prenosila je i koncert a mogla se čuti u Parizu i Honolulu. Prve javne radiofonske emisije osvarilo je F. Conrad (1920) u Pittsburgu uz odobrenje američke vlade. Paralelno s time razvijale su se pokretne radiokomunikacije, tako da je američka flota već 1914. imala 50 radiostanica na kopnu i 250 na brodovima. Pokretne radiokomunikacije na kopnu bilo je teže ostvariti zbog glomaznosti uređaja. Policija u Detroitu (SAD) uspjela je 1928. nakon sedmogodišnjih nastojanja, ostvariti jednosmjerne veze od bazne stanice prema prijateljima u automobilima na cijelom gradskom području. Prva prava dvosmjerna pokretna radioveza ostvarena je tek 1933. godine na frekvenciji 33,1 MHz.

Prva međunarodna konferencija o radio-telegrafiji održala se 1906. godine. Strane ugovornice su se tada obvezale povezati obalne radio postaje s međunarodnom telegrafskom mrežom, uz davanje apsolutnih prioriteta svim porukama pogibelji.

Od tada održavaju se međunarodne konferencije koje svojim odredbama unaprijeđuju sigurnost ljudskih života i imovine na moru, obvezivanjem svojih članica na ugradnju suvremene radijske opreme na brodove.

Značaj brodske radijske postaje za sigurnost ljudskih života i imovine na moru najbolje se vidi na događaju koji se zbio 23. siječnja 1909. godine. Tada je po prvi put upućen signal pogibelji SOS Morzeovom abecedom (...---...) i to sa broda «Republica» koji se u gustoj magli sudario sa parobrodom «Florida». Čim je radio časnik sa broda emitirao znak pogibelji obalna postaja ga je primila i prenijela dalje, te je posada broda «Baltic» uspješno spasila 1700 ljudi sa oba broda.

Lansiranjem u orbitu 1962. godine prvog svjetskog komunikacijskog satelita omogućen je visokokvalitetni prijenos govora i TV slike između velikog broja mjesta na Zemlji.

Prednost u komuniciranju preko satelita, osobno za pomorstvo, veoma je brzo uočila Međuvladina pomorska organizacija (International Maritime Organization – IMO).

Satelitske komunikacije, što je posebno značajno, nude velike prednosti u uzbunjivanju i lociranju brodova u slučaju pogibelji ili nužde, olakšavajući operacije traganja i spašavanja, te dostavu sigurnosnih i hitnih poruka. IMO je 1971. godine u suradnji sa Međunarodnim savezom za telekomunikacije (International Telecommunications Union – ITU), sa sjedištem u Ženevi, započeo pripreme za uvođenje satelitskog komunikacijskog sustava namjenjenog isključivo pomorstvu.

Konvencija o osnivanju Međunarodne pomorske satelitske organizacije (International Maritime Satellite – INMARSAT) usvojena je 1976. godine, a INMARSAT je započeo rad 1. veljače 1982. godine. Sjedište INMARSAT-a je u Londonu. Osnivanje INMARSAT-a kao neovisne međunarodne organizacije označava bitan pomak u pomorskim komunikacijama. Prvi put pomorstvo je dobilo komunikacijski sustav namjenjen isključivo vlastitim potrebama, a koji omogućuje kvalitetan prijenos poruka vezanih za trgovačke operacije, medicinske savjete i pomoć, meteorološke izvještaje i upozorenja, izvještaje o pozicijama brodova, i, što je s motrišta IMO-a najvažnije, unaprijeđenje komunikacija za sigurnost i pogibelj.

2. VRSTE RADIOKOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA

Radiokomunikacijski sustavi se mogu razvrstati prema dijelu frekvencijskog spektra u kojem rade i prema namjeni. Porukama se za prijenos uvijek daje oblik električnog signala (modulacijski signal) jer su oni u svojem izvornom obliku redovito akustički ili svjetlosni valovi. Budući da su modulacijski signali analogni ili digitalni, a radiofrekvencijski signali obuhvaćaju golem broj frekvencija, u radiokomunikacijskim se uređajima upotrebljavaju mnogi različiti elektronički elementi i sklopovi kojima se rad osniva na različitim fizikalnim osnovama. Zbog zahtjeva za proširenjem frekvencijskog spektra za potrebe radiokomunikacija, razvilo se i posebno područje elektronike na višim frekvencijama. U tome se razvoju dešavaju suštinske promjene u konstrukciji elektroničkih elemenata. Od tehnike centraliziranih prešlo se na tehniku raspodijeljenih parametara projektiranja vodova, koaksijalnih vodova i valovoda. Od mehaničke izradbe elemenata i sklopova na fotokemijske postupke. Osim toga, da bi se što bolje koristio frekvencijski spektar, pojavio se niz novih modulacijskih postupaka, a za to su potrebni odgovarajući elektronički sklopovi. Sve je veće uvođenje digitalnih modulacijskih postupaka, u kojima su komponente u spektru dosta udaljene od frekvencije vala nosioca i imaju znatnu amplitudu, a to sprečava mogućnost ometanja drugih sustava. Digitalni modulacijski postupci, međutim, omogućuju veći protok informacija i tako bolje iskorištenje frekvencijskog spektra.

Prema Pravilniku o radiokomunikacijama odašiljanje ili primanje elektromagnetskih valova za posebnu upotrebu u telekomunikacijama naziva se radiokomunikacijskim službama. Sve se službe razvrstavaju prema svojim svojstvima na zemaljske i satelitske, zatim na stalne i pokretne, na aktivne i pasivne, te na obostrane i jednostrane.

Prema Pravilniku iz 1982. a obnovljenom 1986. sve su službe zemaljske, ako to nije drugačije određeno. Definirane su 34 službe, od kojih su većina i zemaljske i satelitske. Neke se službe dalje razvrstavaju na podslužbe. Za opću su primjenu važne: stalne službe (zemaljske i satelitske), pokretne službe na kopnu, moru i u zraku (zemaljske i satelitske), radiodifuzijske službe (zemaljske i satelitske), radionavigacijske službe i njima srodne službe (zemaljske i satelitske), služba daljinskog istraživanja zemljine površine i zračnog omotača (satelitska

pasivna), meteorološka služba (satelitska pasivna), radioastronomija (pasivna), radioamaterska služba (zemaljska i satelitska).

Radiovalovi u frekventijskom području 9 kHz - 275 GHz raspoređeni su za upotrebu u pojedinim službama prema detaljnom međunarodnom dogovoru. U svrhu raspodjele pojedinih frekvencijskih opsega svijet je podijeljen na tri geografska područja, tzv. regije. Frekvencijski su opsezi dodijeljeni pojedinim službama, bilo isključivo samo za tu službu, bilo podijeljeno s drugim službama. Dodjela može vrijediti za jedno, dva ili tri geografska područja.

Radiodifuzija obuhvaća prijenos tona, slike ili određenih podataka. Ona pokriva velika geografska područja korisnim signalom i služi za jednosmjerni prijenos od jednog ili više odašiljača na zemljinoj površini ili na satelitu do mnogo prijarnika.

Usmjerene radiokomunikacije ostvaruju se između dvaju mjesta koja mogu biti po volji udaljena, a prenose višekanalnu telefoniju, radiodifuzne signale ili podatke. Ako je udaljenost prevelika za izravno komuniciranje, bilo zbog reljefa, bilo zbog gubitka rasprostiranja, postavljaju se posredne, tzv. radiorelejne stanice. Ako se veza na veće udaljenosti želi uspostaviti bez relejnih stanica, primjenjuje se troposfersko raspršivanje elektromagnetskih valova kojim se mogu premostiti i udaljenosti od nekoliko stotina kilometara. Za još veće udaljenosti mogu se pomoću tri geostacionarna satelita, razmaknuta za 120°, povezati bilo koja dva mjesta na Zemljinoj površini, ako se nalaze na geografskim širinama unutar 81°N i 81°S.

Pokretni radiokomunikacijski uređaji kojima se služe pokretne radiokomunikacijske službe osiguravaju dvosmjerne veze između stalnih stanica i onih u vozilima na kopnu, moru i u zraku.

Radarski i radionavigacijski sustavi ubrajaju se također među radiokomunikacijske sustave. Istraživanju svemira namijenjene su radioastronomske službe. Iako se u daljinskom istraživanju zemlje pomoću satelita te u satelitskoj meteorologiji radiokomunikacijama odašilju informacije na zemlju, te se službe, kao i radioastronomija, ubrajaju u pasivne radiokomunikacijske službe.

3. ELEKTROMAGNETSKI VALOVI

3.1 Opći pojmovi

Svaka se radiokomunikacija temelji na rasprostiranju radiovalova (propagaciji radiovalova), kroz Zemljinu atmosferu.

Elektromagnetski val je fizikalna pojava u kojoj učestvuju promjenjiva električka i magnetska polja, pri čemu promjene jednog polja uzrokuju nastanak drugog, tako da se izaziva val koji se, jedanput izazvan, širi konačnom brzinom (brzinom svetlosti) ukoliko to dopušta medij kojim se širi. Zbog svoje velike brzine širenja i ostalih svojstava, elektromagnetski val je vrlo prikladan za prijenos informacija. Pri tome on služi kao val nosioc na koji se modulacijom (vremenskom promjenom oblika amplitude, frekvencije ili faze) «upišu» električni signali koje nose informacije. Količina informacija koja se pri tome može prenjeti vrlo je velika i direktno je proporcionalna frekvenciji vala nosioca. Što je veća frekvencija, veća se količina informacija može prenjeti.

Radiovalovi su po svojoj prirodi elektromagnetski valovi koji su za primjene komunikacije među ljudima zračeni iz antene napajane iz izlaznog stupnja nekog odašiljača strujama radijskih frekvencija (RF). Iz teoretski zamišljene, točkaste izotropne antene, elektromagnetski valovi se rasprostiru u obliku koncentričnih, stalno rastućih kugla, čije plohe slijede jedna za drugom s međusobnim razmakom od jedne valne duljine. Plohe tih teoretski zamišljenih kugla zračene energije, fronte vala, rasprostiru se najvećom mogućom brzinom, koja je jednaka brzini svjetlosti od približno 300 000 000 m/s (točnije 299, 793 077 m/s). Ta vrijednost brzine rasprostiranja vrijedi za prazan prostor (vakuum).

Brzina rasprostiranja elektromagnetskog vala kroz neko sredstvo uvijek je manja od one u praznome prostoru, a ovisi o dielektričnosti sredstva. Ako je to zrak, smanjenje brzine rasprostiranja vala se može zanemariti u odnosu na brzinu u praznome prostoru, posebice za valove frekvencija nižih od 30 MHz. Kod viših frekvencija, u VHF području, temperatura i sadržaj vlage u zraku jako utječu na tu brzinu. U čvrstim izolacijskim materijalima brzina rasprostiranja je znatno manja. U destiliranoj vodi (koja je dobar izolator), brzina rasprostiranja radiovala je samo 1/9 od one u slobodnome prostoru.

U materijalima koji su dobri vodiči, brzina vala je toliko smanjena da se polja međusobno poništavaju, pa na taj način kovine služe kao dobra zaštita za elektroničke sklopove koji rade na radijskim frekvencijama.

Kako se ploha kugle, šireći se, stalno povećava, njena zakrivljenost se smanjuje i na određenoj udaljenosti od izvora kuglasti val postaje ravni val. Amplituda radiovala se s povećanjem udaljenosti od izvora smanjuje, a radioval zadržava svoje fazno stanje, tj. faza mu ostaje jednaka onoj izvornoj fazi RF struje koja je i prouzročila elektromagnetsko polje toga vala i njegovo rasprostiranje iz antene kao izvora.

Ako je to bila npr. struja frekvencije 10 000 000 Hz, dužina periode traje 0,1 μs ($T = \frac{1}{f}$).

Dakle, vrijeme 1/10 μs je potrebno da elektromagnetski val dostigne razmak od 30m od antene s fazom jednakom onoj RF vala struje koji je upravo prije (1/10) μs završio svoju periodu. Dvije periode ranije, tj. prije (2/10) μs završio je RF val u anteni, koji je prouzročio

elektromagnetski val, sada već na 60m od antene i tako redom. Prije (3/10) μ s odaslani val je dostigao udaljenost od 90m, a onaj val odaslani prije 1 μ s već je na 300m od antene. Razmak između ploha kugli rasprostirućega vala frekvencije $f = 10\text{MHz}$ iznosi 30m, a to je valna duljina, koja se označava grčkim slovom λ .

U tablici 1.1 prikazana je podjela i primjena radiovalova:

Naziv	Oznaka	Frekvencija	Valna duljina	Primjena 
Extremely low frequency (ekstremno niske frekvencije)	ELF	3 to 30 Hz	10,000 km to 100,000 km	čujne frekvencije kada se pretvore u zvuk, jednosmjerna komunikacija s podmornicama
Super low frequency (super niske frekvencije)	SLF	30 to 300 Hz	1,000 km to 10,000 km	čujne frekvencije kada se pretvore u zvuk, elektrodistribucija (50 Hz, 60 Hz)
Ultra low frequency (ultra niske frekvencije)	ULF	300 to 3000 Hz	100 km to 1,000 km	čujne frekvencije kada se pretvore u zvuk, komunikacija u rudarstvu
Very low frequency (vrlo niske frekvencije)	VLF	3 to 30 kHz	10 km to 100 km	čujne frekvencije kada se pretvore u zvuk
Low frequency (niske frekvencije)	LF	30 to 300 kHz	1 km to 10 km	međunarodni radioprijenos, navigacijske i radi far,
Medium frequency (srednje frekvencije)	MF	300 to 3000 kHz	10 m to 1 km	navigacijski radio far, AM radioprijenos , pomorske i zračne komunikacije
High frequency (visoke frekvencije)	HF	3 to 30 MHz	10 m to 100 m	kratki val, CB radioprijenos
Very high frequency (vrlo visoke frekvencije)	VHF	30 to 300 MHz	1 m to 10 m	FM radioprijenos , TV prijenos, zrakoplovstvo
Ultra high frequency (ultra visoke frekvencije)	UHF	300 to 3000 MHz	10 cm to 100 cm	TV prijenos, mobilna telefonija, bežične mreže, mikrovalna pečnica
Super high frequency (super visoke frekvencije)	SHF	3 to 30 GHz	1 cm to 10 cm	bežične mreže, satelitske veze, mikrovalne veze, satelitska televizija,
Extremely high frequency (ekstremno visoke frekvencije)	EHF	30 to 300 GHz	1 mm to 10 mm	Mikrovalni prijenos podataka, radio astronomija, udaljena detakcija, napredna oružja, napredni protuprovalni sustavi

Tablici 1.1 Podjela i primjena radiovalova

Općenito vrijedi odnos

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

gdje je c brzina rasprostiranja vala, a f frekvencija.

Kako se često frekvencije izražavaju u decimalnim jedinicama (kilohercima, megahercima, gigahercima) prikladne su prilagođene brođane jednadžbe, u koju se uvrštavaju samo brođane vrijednosti pojedinih veličina (bez mjernih jedinica). Tako se valna duljina dobije u metrima, ako se frekvencija uvrsti u megahercima iz jednadžbe

$$\lambda(m) = \frac{300}{f(MHz)}$$

Dio frekvencijskog spektra koji se iskorištava u radiokomunikacijama za prijenos informacija obuhvaća široko područje prikazano u tablici. Elektromagnetski valovi iz pojedinih područja tog dijela spektra imaju u pogledu rasprostiranja vrlo različite osobine.

3.1.1 Osnovne karakteristike elektromagnetskog vala

Polarizacija elektromagnetskog vala

Polarizacija vala određena je pravcem silnica električnog polja. Ako su silnice električnog polja okomite na površinu tla tada je to vertikalna polarizacija elektromagnetskog vala, a ako su te silnice paralelne u odnosu na Zemljinu površinu govorimo o horizontalnoj polarizaciji. Vertikalna i horizontalna polarizacija su linearne polarizacije. Linearna polarizacija može biti ne samo čvrsto vertikalna i horizontalna, već svaka između tih dviju, koje inače karakteriziraju širenje površinskog vala. U slobodnom prostoru gubi se smisao horizontalnoga i vertikalnoga. Za svemirske komunikacije koristi se kružna ili cirkularna polarizacija vala.

Jakost polja elektromagnetskog vala

Energija vala koji se rasprostire smanjuje se povećanjem udaljenosti od izvora, jer se raspoređuje na sve veću površinu. To najbolje pokazuje jakost polja tog vala.

Jakost polja elektromagnetskog vala mjeri se kao napon između dviju točaka koje leže na jednoj električnoj silnici polja u ravnini valne fronte. Usporedbeni napon je induciran u žici duljine jednog metra, izraženo u voltima po metru (V/m).

Kako je napon u nekom valu obično vrlo malen, jakost polja se izražava u milivoltima po metru (mV/m) ili mikrovoltima po metru ($\mu\text{V/m}$). U slobodnom prostoru jakost polja se mijenja obrnuto proporcionalno udaljenosti od izvora vala. Ako je, npr. na udaljenosti od 1 km od antene jakost polja iznosila 100 mV/m, na udaljenosti od 2 km od antene jakost polja će biti 50 mV/m.

Gustoća snage elektromagnetskog vala

Omjer kvadrata jakosti polja i gustoće snage p je impedancija Z slobodnog prostora koja iznosi 377 ohma, pa je gustoća snage $p = \frac{E^2}{Z}$. Jakost polja od 1 V/m odgovara gustoći snage od 2,65 mW/m². gustoća snage opada s kvadratom udaljenosti od izvora. Ako je npr. na udaljenosti od 1 km od antene gustoća snage nekog elektromagnetskog vala iznosila 4 mW/m², na udaljenosti od 2 km gustoća snage će biti 1 mW/m².

3.2 Karakteristike rasprostiranja elektromagnetskih valova

Elektromagnetski valovi se u svemiru šire pravocrtno. U zemljinoj atmosferi na rasprostiranje radiovalova utječu mnogi čimbenici, kao što su meteorološke osobine nižih slojeva atmosfere (troposfere), električna svojstva tla i njegova fizička konfiguracija, stanje ionosfere i drugi čimbenici s manjim ili većim utjecajem na rasprostiranje radiovalova u različitim frekvencijskim područjima.

Atmosfera zemlje se može podijeliti na troposferu i ionosferu.

Troposfera je donji sloj atmosfere. Ona se prostire od površine zemlje do 8-11 km u polarnim krajevima i umjerenim širinama, a u tropskim krajevima do 15-18 km. Taj sloj sadrži 4/5 ukupne mase atmosfere i svu vodenu paru atmosfere. U njemu se odvijaju sve meteorološke pojave (vjetar oblaci, kiša ..). Električna vodljivost tog aloja je u normalnim prilikama neznatna. S visinom iznad površine zemlje mijenjaju se gustoća (tlak i temperatura) i vlažnost zraka u troposferi, a o njima ovise elektrodinamička svojstva zraka od kojih opet ovisi indeks loma ili refrakcije elektromagnetskih valova. Indeks loma troposfere neznatno odstupa od jedinice (indeks loma vakuma), ali zbog njegove promjenjivosti sa visinom, u troposferi dolazi do refrakcije radio valova svih frekvencija, tj do povijanja njihovih putanja prema zemlji. U troposferi dolazi takođe do apsorpcije i rasipanja radio valova.

Ionosfera je vanjski, električni vodljivi sloj zemljine atmosfere. Proteže se od 60-80 km pa do 1000 km iznad zemlje – prema podacima sa satelita gornja granica je ~20000 km. Ionosfera predstavlja razrijeđenu plinovitu plazmu, tj sastoji se od molekula iona i plina u kojemu su prisutni u određenoj koncentraciji i slobodni elektroni. Do ionizacije plina i oslobađanja elektrona dolazi uglavnom tijekom dana za vrijeme dok traje sunčevo zračenje (uglavnom ultraljubičasto i rengencko zračenje). Ionosfer se dijeli na tri sloja: D, E, F. Pod određenim uvjetima ti se slojevi mogu podijeliti u podslojeve, npr. sloj F dijeli se na sloj F₁ i F₂.

Usljed utjecaja atmosfere dolazi do slijedećih pojava prilikom rasprostiranja elektromagnetskih valova:

- **apsorpcija (gušenje),**
- **refrakcija (lom),**
- **refleksija (odbijanje)**
- **difrakcija (ogib)**
- **disperzija (raspršivanje)**

Apsorpcija (gušenje)

Apsorpcija (slabljenje intenzivnosti) elektromagnetskog vala dolazi uslijed uzajamnog djelovanja između elektromagnetskog polja i materije, kojim se djelovanjem elektromagnetska energija pretvara u druge oblike energije. Apsorpcija elektromagnetskih valova jako se povećava sa porastom frekvencije, a naročito je velika na frekvencijama u blizini vlastitih frekvencija titranja molekula plina i vode u sva tri agregatna stanja (iznad 10 GHz). Molekule kisika najviše apsorbiraju elektromagnetski val na 60 i 118,75 GHz, a vodena para na 22,2 i 183 GHz. U praksi slabljenje energije vala je često znatno veće nego što se teoretski pokazuje po zakonu obrnuto proporcionalno sa udaljenosti. U ionosferi dolazi naročito do apsorpcije niskih i srednjih frekvencija u slojevima D i E.

Refrakcija (lom)

Refrakcija je promjena smjera širenja vala uzrokovana promjenom elektrodinamičkih svojstava medija (dielektričnost, magnetska susceptibilnost). Elektrodinamička svojstva medija izražavaju se njegovim indeksom loma (indeksom refrakcije). Indeks loma ovisi o frekvenciji vala i o stanju medija kojim se prenosi (temperatura, tlak, sastav ...).

Veza između indeksa loma i elektrodinamičkih svojstava medija prikazana su jednačinom:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$

gdje je :

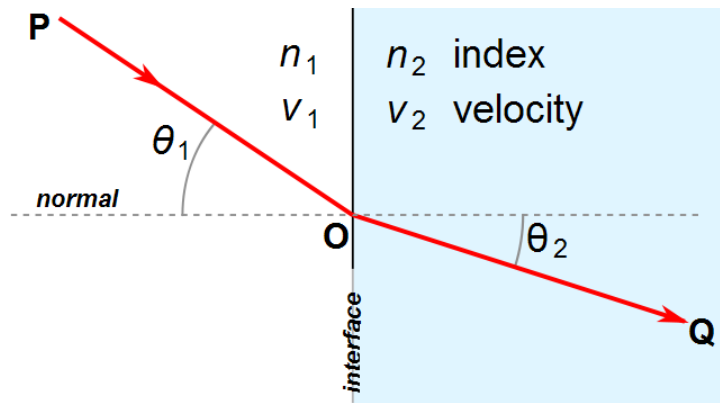
ϵ - dielektrična konstanta

μ - magnetska susceptibilnost

Indeks loma je također omjer između brzine vala u vakumu v_v i brzine širenja vala u dotičnom mediju v_m pa se može napisati:

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{\mu_1\epsilon_1}}{\sqrt{\mu_2\epsilon_2}} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

gdje se indeksi 1 i 2 odnose na medije kroz koje se val rasprostire, a kutovi θ_1 i θ_2 su upadni i izlazni kutovi uz medija sa indeksom loma n_1 u medij s indeksom loma n_2 . Na slici 1 prikazana je refrakcija elektromagnetskog vala u slučaju kada je $n_2 > n_1$. Budući da je brzina vala $v_2 < v_1$, kut $\theta_2 < \theta_1$. Na slici 3.1 prikazan je primjer refrakcije elektromagnetskog vala.



Slika 3.1. Primjer refrakcije

Elektromagnetski val se u visinama troposfere savija prema zemlji. U ionosferi dolazi do elektromagnetski val izaziva vibriranje elektrona koji tada djeluju kao sitne antene koje apsorbiraju energiju elektromagnetskog vala i zrače je nazad u pravcu zemlje uz određenu promjenu faze (ionosferska refrakcija).

Do refrakcije površinskih radio valova dolazi i pri prelasku valova s mora na kopno i obratno. To je takozvani obalski efekt koji unosi greške u kod određivanja radio smjerova uz pomoć radio-goniometara.

Refleksija (odbijanje)

U općenitom slučaju na granici medija s različitim elektrodinamičkim svojstvima nastaje pored loma (refrakcije) elektromagnetskog vala i njegovo odbijanje (refleksija). Radio valovi se reflektiraju od ionosfere, inverznih slojeva troposfere, od površine zemlje, od slojeva stijena pod površinom ispod zemlje, različitih objekata na zemlji i od antenskih reflektora. Prilikom refleksije vala dolazi i do promjene njegove faze. Intenzitet refleksije ovisi o frekvenciji vala i takođe o njegovoj polarizaciji.

Difrakcija (ogib)

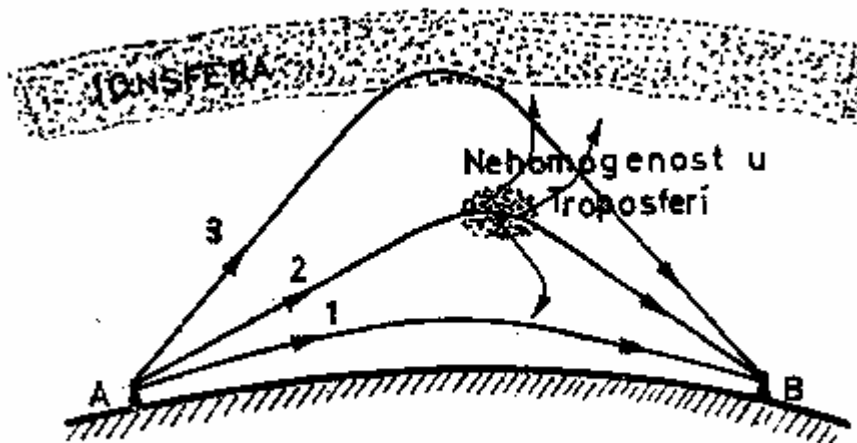
Difrakcija ili ogib radio valova na rubu prepreke koja leži između odašiljačke antene i prijemne antene pojavljuje se prilikom širenja tih valova u troposferi. Pojava ogiba radiovalova može nastati pri prijelazu valova iznad neke čvrste zapreke što sprječava potpunu radiotišinu u području iza zapreke. Naime, na rubu prepreke dolazi do ogibanja valova, tako da dio elektromagnetskog vala skreće sa pravocrtne putanje i ogiba se iza prepreke. Na taj način se mogu primiti radio valovi i iza prepreke (naprimjer otoka ili gorskog lanca) iako ne postoji optička vidljivost prijemne i odašiljačke antene. Tako na primjer brod može imati VHF vezu sa obalnom stanicom iako se nalazi iza otoka koji zaklanja prolaz elektromagnetskog vala odaslanog sa obalne stanice.

Disperzija (raspršivanje)

Kada se refrakcija, refleksija i difrakcija pojavljuju istovremeno na način da ih je nemoguće razdvojiti govorimo o raspršivanju radiovalova ili disperziji. To se događa naročito u donjoj

troposferi zbog pojava turbulencije u njoj koji uzrokuju nepravilne promjene indeksa loma u prostoru i vremenu. Uslijed pojave disperzije, jedan manji dio energije radio valova se vraća na zemlju a drugi se rasprši u prostor.

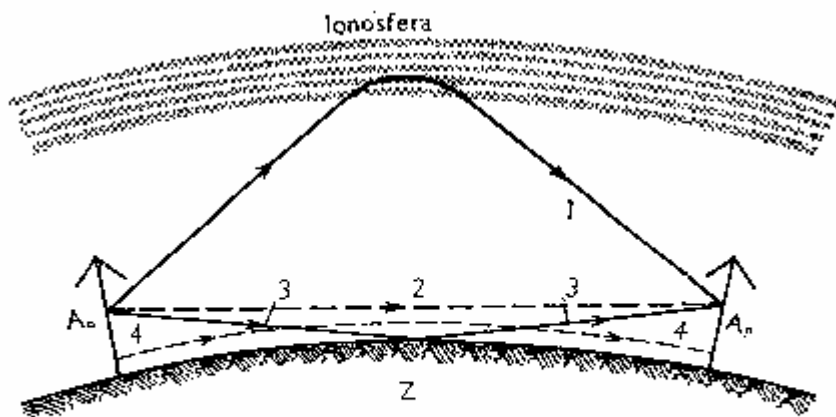
Rasprostiranje radiovalova je gotovo uvijek praćeno svim navedenim pojavama te od njihovog utjecaja bitno ovisi doseg neke radioveze. Na slici 3.2 prikazana je ionosferska refrakcija (3), troposferska refrakcija (1) i disperzija (2).



Slika 3.2 Ionosferska refrakcija (3), troposferska refrakcija (1) i disperzija (2)

4. NAČINI RASPROSTIRANJA ELEKTROMAGNETSKIH VALOVA

Elektromagnetski val se rasprostire *prostornim, direktnim, reflektiranim i površinskim* valom. Načini rasprostiranja radio valova prikazani su na slici 3.3



Vrste zračenih valova. *I* Prostorni val, *Z* direktan val, *3* reflektirani val (od površine Zemlje), *4* površinski val; *Z* površina Zemlje, *A_o* antena odašiljača, *A_p* antena prijemnika

Slika 3.3. Načini rasprostiranja elektromagnetskog vala

1. Prostorni val. Prostorni val usmjeren je prema gornjim djelovima atmosfere i odatle se pod određenim uvjetima vraća na zemlju. O *troposferskom* prostornom valu govorimo kada se val prostire samo kroz niže slojeve atmosfere (troposferu), o *ionosferskom* prostornom valu govorimo kad se širi kroz visoke slojeve atmosfere (ionosferu), o *svemirskom* prostornom valu kad se probija kroz atmosferu i odlazi u svemirski prostor.

2. Direktni val. Direktni val širi se pravocrtno ili gotovo pravocrtno od odašiljačke antene prema mjestu prijema koji je u mjestu njegove «vidljivosti» tj. iznad radio horizonta.

3. Reflektiranim val. Reflektirani val je elektromagnetski val koji se na svom putu reflektira od površine zemlje.

4. Površinskim val. Površinski val zove se elektromagnetski val koji se širi uz samu površinu zemlje. Rasprostiranje površinskim valom je glavni način rasprostiranja radiovalova za frekvencije do 2 MHz. Val prati zemljinu površinu ne napuštajući je od odašiljačke do prijemne antene i na njega manje utječu promjene u atmosferi i doba dana nego na druge načine rasprostiranja. Apsorpcija površinskog vala je vrlo mala na vrlo niskim frekvencijama (ispod 500 KHz), tako da se na tim frekvencijama može ostvariti komunikacija širom svijeta u svako doba dana i godine. Iznad 2 MHz apsorpcija vala u troposferi naglo raste, tako da se na 15...20 MHz ostvaruje doseg od samo 15.....20 km.

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 određenom elevacijom.

Prilikom izučavanja širenja elektromagnetskih valova treba imati u vidu da na **širenje vala najviše utječe frekvencija elektromagnetskog vala**, pa se prema karakteristikama širenja valovi mogu podijeliti na frekventna područja:

a) elektromagnetski valovi do 100 KHz (ELF, dio SLF) šire se kao površinski i prostorni val koji se reflektira od ionosfere na visini 60 do 90 km. Jakost polja na određenoj udaljenosti od odašiljača zbroj je jakosti polja jednog i drugog vala, s time da do udaljenosti oko 300 km prevladava polje površinskog vala, koje se zbog troposferske refrakcije povija sa zakrivljenošću površine zemlje. Već nakon 400 km prevladava polje prostornog vala. Karakteristična je za te valove mala apsorpcija površinskog vala, postizanje velikih dometa i slabo izražen fading. 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).

Valovi ovog frekventnog područja šire se između površine zemlje donje ionosfere kao u nekom sfernom valovodu. Niskofrekventni valovi ispod 25 KHz mogu na taj način dostići vrlo visoke domete. S obzirom da je apsorpcija prostornog vala tih frekvencija (između 15 i 20 kHz) najmanja, takvi su (mirijametarski) valovi prikladni za veze na velike udaljenosti (npr. do 10000 km). Koristili su se u navigacijskim sustavima Omega, te za komunikaciju sa uronjenim podmornicama, jer ovi valovi mogu prodrijeti do 20 tak metara ispod površine mora.

b) elektromagnetski valovi 100 KHz – 10 MHz (dio ULF, VLF, LF, MF, dio HF) šire se pretežno kao površinski val i taj val se uglavnom koristi za održavanje radioveza. Njihov domet se povećanjem frekvencije postepeno smanjuje od otprilike 1000 km na najnižim 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 se reflektira od sloja F ionosfere i omogućuje i veće domete. Time se tumači pojava da se danju mogu na MF primati samo lokalne i bliske radiodifuzijske stanice, a noću i vrlo udaljene. Prijem valova srednje frekvencije podložan je fedingu i nelinearnim iskrivljenjima u ionosferi.

c) elektromagnetski valovi 10 MHz – 30 MHz (HF) imaju mali domet površinskog vala (od nekoliko desetaka za više frekvencije do nekoliko stotina kilometara za niže frekvencije) te 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 uporabljive frekvencije (LUF)* ispod koje je apsorpcija u ionosferi jaka i *gornje uporabljive frekvencije (MUF)* iznad koje se valovi ne vraćaju, prostorni val se u tom frekventijskom području nakon refrakcije u višim slojevima ionosfere vraća prema površini zemlje. Na ovaj način se uz relativno male snage odašiljača mogu ostvariti prijenos informacija na velike i najveće udaljenosti. Udaljenost jednog skoka radiovala nakon refrakcije u ionosferi iznosi najviše 4000 km. Za ove valove karakteristični su intenzivni fedinzi.

d) elektromagnetski valovi 10 MHz – 30 MHz (VHF, UHF, SHF, EHF) ovi valovi ne pobuđuju više elektrone u ionosferi na oscilacije pa stoga bez refleksije i refrakcije, uz malu apsorpciju 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. Površinski val tih frekvencija vrlo se brzo apsorbira pa mu je domet svega koji kilometara (kod radara je snaga vala velika pa su dometi veći). Zemaljske radio veze s valovima tih frekvencija mogu se ostvariti samo direktnim i od površine zemlje reflektiranim valom. Pri tome može na određenim točkama prijema doći do poništavanja reflektiranog i direktnog vala usljed toga što su protufazni, te do nestanka prijema.

5. IONOSFERSKO RASPROSTIRANJE PROSTORNOG VALA

Radio valovi od antene predajnika mogu stići do prijemne antene putem površinskog vala koji dijelom slijedi krivinu Zemlje i putem prostornih valova koji su odbijeni od slojeva ionosfere.

Za ionosfersko rasprostiranje karakteristično je da se elektromagnetski val određene frekvencije savija i reflektira prema površini zemlje od slojeva ioniziranih plinova u gornjem dijelu zemljine atmosfere (ionosferi).

Rasprostiranje ionosferskog prostornog vala praćen je dvjema, već spomenutim pojavama, refrakcijom i refleksijom radiovala. Lom je, kako je već rečeno, savijanje pravca vala pri njegovom prijelazu iz jednog sredstva u drugo, u kojem, zbog različite dielektričnosti, val mijenja brzinu. Stupanj savijanja vala ovisi o razlici u brzinama kojima val prolazi kroz dva sredstva te je za danu frekvenciju savijanje vala veće što je razina ionizacije veća, a pri danoj razini ionizacije savijanje se smanjuje povišenjem frekvencije. Prolazeći različitim područjima atmosfere moguće su stupnjevite promjene brzine nastale zbog promjena

temperature, gustoće zraka i stupnja ionizacije, što za posljedicu ima moguće stupnjevito savijanje vala.).

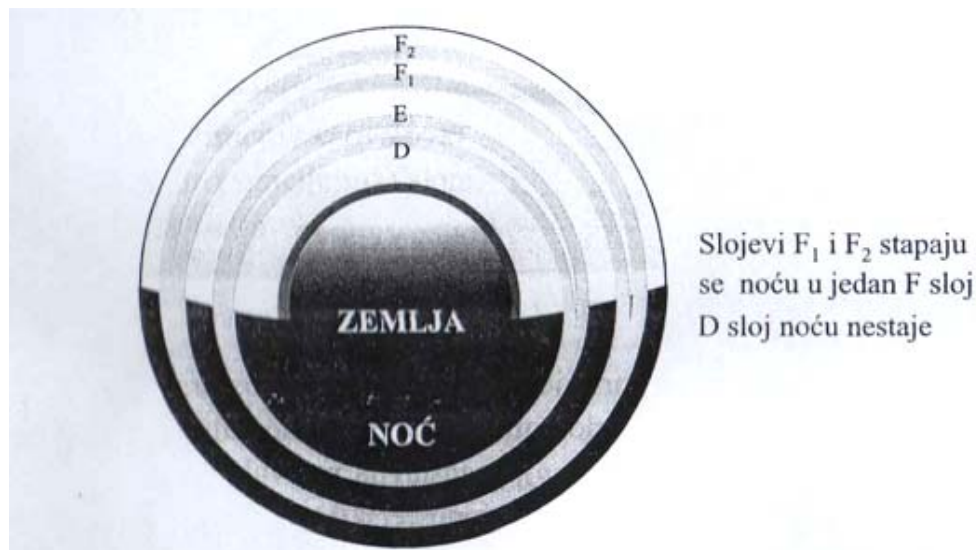
5.1 Procesi stvaranja ioniziranih područja u atmosferi

Glavni uzrok stvaranja ioniziranih područja u gornjem dijelu Zemljine atmosfere je elektromagnetsko zračenje koje dolazi sa Sunca i to u dijelu spektra od ultraljubičastog do rendgenskog zračenja te visokoenergijske nabijene čestice Sunčevoga zračenja te galaktičko kozmičko zračenje. Poseban utjecaj imaju, i svakih 11 godina ponavljane, snažnije aktivnosti na Suncu, „sunčeve oluje“. Na taj se način od električki neutralnih plinova, kisika, dušika, dušikovih oksida, stvaraju pozitivni ioni i rjeđi ili gušći rojevi slobodnih elektrona.

Stupanj ionizacije na različitim visinama ovisi o jakosti Sunčeva zračenja te o učinkovitosti ionizacije neutralnih atmosferskih plinova. Maksimum ionizacije opaža se kad je zenitni kut jednak ničtici, tj. kada je Sunce u zenitu. Promjene u gustoći ionizacije događaju se u ovisnosti o geografskoj širini, godišnjem dobu i dobu dana.

Kada Sunčevog zračenja nema ili oslabi, slabi i uzrok ionizacije, događa se rekombinacija elektrona i pozitivnih iona. Ta je pojava obratna od pojave ionizacije i zapaža se posebice noću i u nižim slojevima ionosfere, gdje je zrak gušći, pa je i mogućnost sudara čestica veća. To je razlog što tijekom noći nestaje nekih slojeva ionosfere.

Na slici 5.1 prikazani su slojevi ionosfere koji se mogu uočiti danju i tijekom noći. Razlikujemo slojeve E i F koji se pojavljuju noću. Danju se pojavljuje i sloj D, te se sloj F dijeli na dva podsloja (F_1 i F_2).



Slika 5.1. Slojevi ionosfere tijekom dana i noći

D-sloj se proteže 60-90 km iznad zemljine površine. To je sloj koji se pojavljuje danju, a noću nestaje. S visinom naglo raste gustoća elektrona koja je podložna velikim promjenama tijekom dana. Najveća gustoća elektrona je kratko nakon mjesnoga podneva na

visini 80 km, a najmanja je tijekom noći kada zbog obilnije rekombinacije D-sloj, praktički nestaje i stapa se sa E slojem. Promjene su veće na visini 70-90 km, gdje je utjecaj sunčevoga zračenja veći, dok na visinama ispod 70 km prevladavajući utjecaj na ionizaciju ima kozmičko zračenje. Ljeti se opaža maksimum, no ponekad se i zimi često se pojavljuje visoka razina gustoće elektrona što se smatra anomalijom.

Općenito, D-sloj djeluje uglavnom kao apsorber energije radiovalova. Radiovalovi vrlo niskih i ekstremno niskih frekvencija (VLF i ELF) odbijaju se od D-sloja. Srednje i visoke frekvencije (MF i HF) prolaze kroz D-sloj uz jaku apsorpciju. Što je frekvencija vala viša, lakše prodiru kroz D sloj, tako da radiovalovi u VHF i UHF području imaju manje slabljenje.

E-sloj je 90-130 km iznad Zemljine površine. Obuhvaća tzv. „normalne“ i „sporadične“ slojeve. Normalni sloj slijedi određene poznate zakonitosti; dnevni maksimum ionizacije je oko podneva, a godišnji ljeti. Najveća gustoća elektrona je na visini od oko 110 km. Sloj E je postojaniji od sloja D te noću preostaje mali dio E-sloja.

Srednje frekvencije (MF) se danju u ovom sloju potpuno apsorbiraju, dok je noću moguće i reflektiranje MF radiovalova, njihov povratak na zemlju i uspostavljanje veze na udaljenostima većim od 300 km. Valovi visoke frekvencije (HF) se također mogu reflektirati od ovog sloja te se postižu veze od 2500 km. Radiovalovi u VHF i UHF području prolaze kroz E-područje s neznatnim slabljenjem.

F-sloj se proteže od 130 km pa naviše. Danju se često mogu razlučiti dva sloja: F_1 -sloj na visinama 130-210 km (najveća gustoća na 200 km), i F_2 -sloj na visinama 300 - 400 km (i do više od 500 km). Noću ta dva sloja tvore jedinstven F-sloj. Sloj F_1 se vlada približno kao i sloj E, uz znatniju razliku u dnevnom maksimumu sunčevoga zračenja te ima znatno manji utjecaj na rasprostiranje radiovalova od F_2 - sloja.

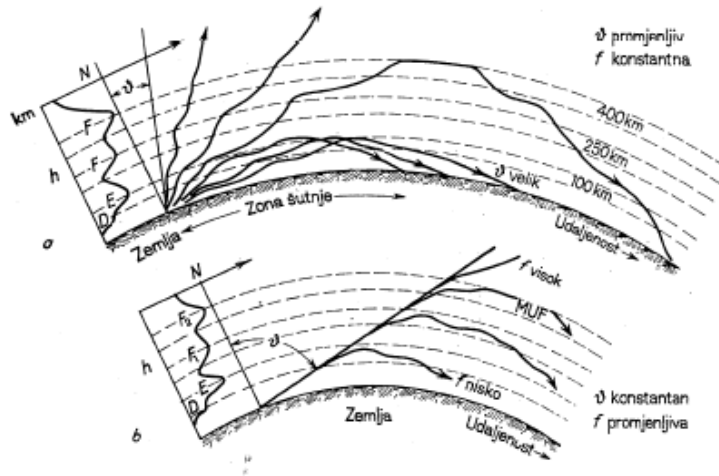
Sloj F_2 pokazuje najveću gustoću elektrona u ionosferi, ali i mnoge nepravilnosti, kao npr. dnevni maksimum gustoće elektrona ne opaža se u podne, nego oko 13:00 do 15:00 sati po mjesnom vremenu, a najveće promjene mogu imati svoj poludnevni maksimum od 10 do 11h i od oko 22 do 23h, dok se kod godišnjih promjena gustoće opaža maksimum zimi u podne i veći je od odgovarajućeg ljetnog maksimuma. Posebnosti se pokazuju kod F_2 -sloja u blizini ekvatora i na većim zemljopisnim širinama.

F_2 -sloj, je najzanimljivije i najvažnije područje ionosfere za komunikacije na velike udaljenosti u području HF (1-30MHz). Za radiovalove visokih frekvencija (HF) područja E i F djeluju kao reflektori. Vrijedi pravilo da što su radiovalovi viših frekvencija (kraći valovi), to je potrebna veća gustoća elektrona (viša razina ionizacije), da se prouzroči njihovo odbijanje i povratak na zemlju. Što je veća frekvencija HF radiovala veća je i udaljenost koja se postiže jednostrukim odbijanjem. Jednostrukim odbijanje može se postići prijem na 4000 km. Ako se frekvencija poveća iznad tkz. *najviše uporabljive frekvencije*, nema odbijanja radio valova od ionsfere i ni odlaze usvemir.

Radiovalovi frekvencija viših od onih u HF području, dakle, u VHF i UHF SHF području, prolaziti kroz ionosferu uz određeni stupanj apsorpcije ili slabljenja takvih signala.

Zato se komunikacije preko komunikacijskih satelita i one sa svemirskim letjelicama mogu obavljati u područjima ultravisokih (UHF) i supervisokih frekvencija (SHF).

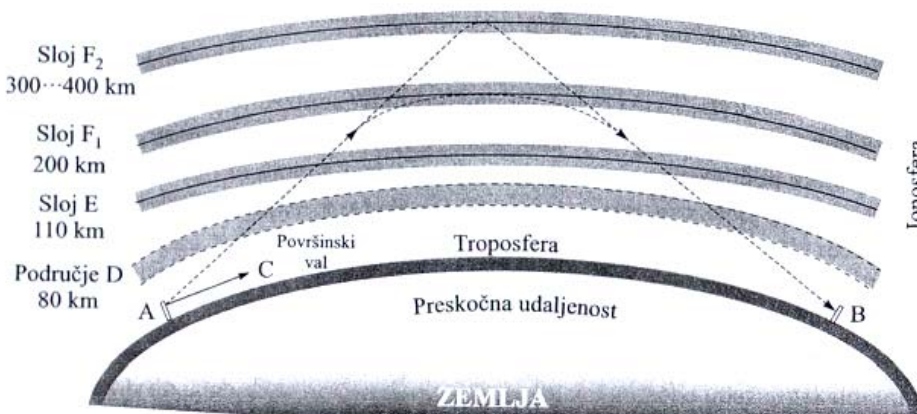
Na slici 5.2 prikazano je gustoća ionizacije na pojedinim visinama atmosfere i refrakcija radiovalova a) pri stalnoj frekvenciji odašiljanja i promjenjivom kutu zračenja i b) pri stalnom kutu zračenja i promjenjivoj frekvenciji.



Slika 5.2 Gustoća ionizacije na pojedinim visinama atmosfere i refrakcija radiovalova a) pri stalnoj frekvenciji odašiljanja i promjenjivom kutu zračenja i b) pri stalnom kutu zračenja i promjenjivoj frekvenciji

Slika 5.2 Gustoća ionizacije na pojedinim visinama atmosfere i refrakcija radiovalova a) pri stalnoj frekvenciji odašiljanja i promjenjivom kutu zračenja i b) pri stalnom kutu zračenja i promjenjivoj frekvenciji

Na slici 5.3. prikazan je primjer rasprostiranja ionosferskim valom koji je karakterističan za MF i HF frekvencije. Radioval, šireći se od odašiljačke antene A, se savija sve do loma prema prijamnoj anteni B na Zemljinoj površini.



Slika 5.3. Preskočna udaljenost

Pri tome A-F₂-B-skok, predstavlja put vala između dviju točaka na površini zemlje. Kao što je iz slike vidljivo, refleksija vala je jednostruka. Međutim, elektromagnetski val se može nakon što stigne na zemlju ponovo reflektirati ka ionosferi te se od nje ponovo reflektirati na zemlju. Tada govorimo o više ionosferskih odbijanja. Na taj način elektromagnetski val može obići cijelu zemaljsku kuglu.

Na slici 5.3 je vidljivo da na udaljenosti A-C imamo prijem površinskog vala. Od točke C do B nema više prijema jer nema površinskog vala. Udaljenost C-B naziva se preskočna udaljenost, a to je razmak između točke C na zemljinoj površini do koje još dopire površinski val i točke B gdje se nalazi prijamna antena koju pogađa ionosferski val. Između tih točaka je mrtva zona do koje površinski val ne dopire, a koju ionosferski val preskače. U toj mrtvoj zoni ne postoji prijem. Nestanak prijema radiosignala uslijed toga što brod ulazi u mrtvu zonu (između točke C i D) naziva se **feeding**. Jasno je da to ne mogu biti točke, već rubovi zona slabog ili nikakvog pokrivanja površinskim valom (oko C) ili ionosferskim valom (oko B).

5.2 Znakovite frekvencije

Na rasprostiranje prostornog vala značajno utječe frekvencija elektromagnetskog vala. Pri tome treba razlikovati znakovite frekvencije.

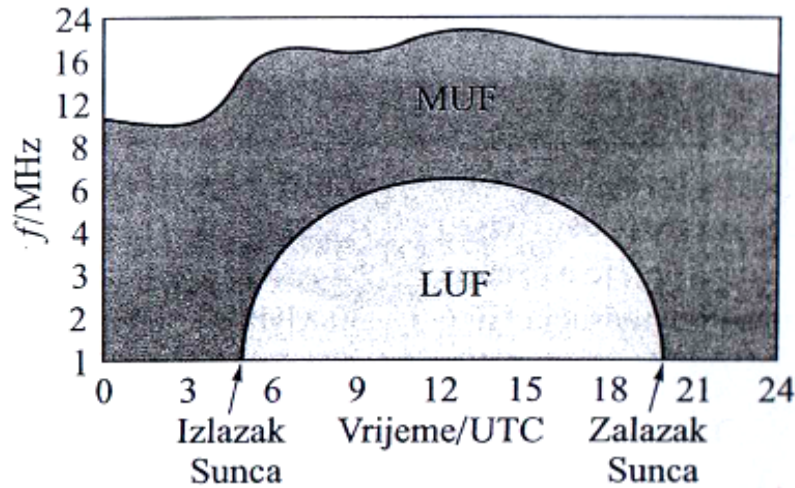
Najviša uporabljiva frekvencija (MUF, eng. Maximum useable frequency) je frekvencija pri kojoj se radiovalovi još odbijaju progresivnim lomom u ionosferi. Valovi frekvencija viših od MUF-a prolaze F₂-sloj i odlaze dalje u svemir. Ta frekvencija ovisi o mnogim čimbenicima, kao što je godišnje doba, doba dana, zemljopisna osobina puta vala, te ciklus sunčeve aktivnosti. Sve to utječe na razinu ionizacije u pojedinim slojevima ionosfere.

Kritična frekvencija f_c je najviša frekvencija vala, koji upada okomito na ionosferski sloj, a koji se još odbija natrag prema Zemlji. Na frekvenciji iznad kritične se naime, elektroni više ne pobuđuju na vibracije, pa valovi prolaze kroz ionizirane slojeve bez refrakcije, ali uz određenu apsorpciju. Ona se navodi za pojedine slojeve ionosfere kao njihova karakteristika i jednaka je najvišoj uporabljivoj frekvenciji za kratkodometne (bliske, mjesne), komunikacije.

Kritična frekvencija za E-sloj je 1-4 MHz, a za F₂-sloj je 2-13MHz. To su prosječne vrijednosti na donjoj granici (za E-sloj: 1 MHz, za F₂-sloj: 2 MHz), koje se opažaju noću u prvim godinama sunčevog ciklusa, i na gornjoj granici (za E-sloj je to 4 MHz, za F₂-sloj 13 MHz), tijekom dana i tijekom visoke sunčeve aktivnosti. Tijekom posebno snažnih sunčevih aktivnosti kritična frekvencija može dostići i do 20MHz.

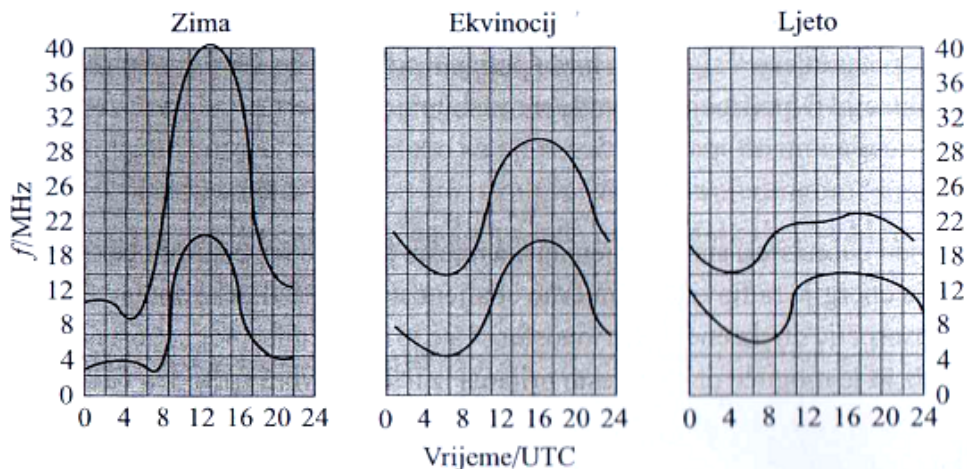
Za daleke komunikacije, na udaljenosti od 4000 km, MUF je oko 3.5 puta veći od kritične frekvencije na srednjoj točki te udaljenosti. To je i najveća udaljenost koja se može postići samo jednim odbijanjem od F₂-sloja. Veće udaljenosti dostižu se s nekoliko izmjeničnih odbijanja od F₂-sloja i od Zemljine površine.

Najniža uporabljiva frekvencija LUF (LUF, eng. Lowest usable frequency) je frekvencija pri kojoj se radiovalovi još uvijek dospjevaju do ionosferskog sloja i odbijaju se od njega. LUF ovisi o stupnju apsorpcije, omjeru signala i šuma, snazi i načinu prijenosa, a u izravnoj je vezi s dnevnim gibanjem sunca.



Slika 5.4. Dnevna promjena MUF-a i LUF-a

Slika 5.4. prikazuje promjenu maksimalne upotrebljive frekvencije (MUF) i minimalne uporabljive frekvencije (LUF) tijekom dana i noći za uvjete rasprostiranja prostornog (ionosferskog) vala ostvarene u HF području iz Francuske prema Islandu. Vidljivo je iz grafikona na slici 5.4 da se tijekom noći veze između Francuske i Islanda mogu ostvarivati frekvencijama radiovalova do cca 12 MHz, a tijekom dana se može ići i do frekvencija od cca 24 MHz. Tijekom dana ne smije se ići ispod frekvencije koja je dana krivuljom LUF, a koja se neprestano mijenja tijekom dana. Tako na primjer u 12 sati poslijepodne LUF iznosi 12 MHz. Ispod te frekvencije radiovalova ne može se ostvariti veza između Francuske i Islanda. Razlog tome je što u je u 12 sati najjača ionizacija sloja D i E pa radiovalovi nižih frekvencija uopće ne dospjevaju do sloja F_2 već se odbijaju i absorbiraju od slojeva D i E, te na taj način ne mogu premostiti udaljenost između Francuske i Islanda.



Slika 5.5. Promjene MUF-a pri maksimumu (gornja krivulja) i pri minimumu (donja krivulja) Sunčevih aktivnosti

Slika 5.5 prikazuje promjene maksimalne upotrebljive frekvencije (MUF) tijekom 24 sata u vrijeme najveće Sunčeve aktivnosti (gornja krivulja), i najmanje aktivnosti (donja krivulja), i to početkom zime, za ravnodnevnicu i početkom ljeta pri ostvarivanju dalekih HF-veza (London-New York). Navodi se zemljopisni smjer veze, jer se dijagrami razlikuju kada se veza ostvaruje prema zapadu, istoku, jugoistoku ili jugozapadu. Zajedničko za sve takve dijagrame je sljedeće:

- vršne vrijednosti MUF-a pojavljuju se u načelu između 10:00h i 16:00h,
- vršne vrijednosti MUF-a su znatno više pri maksimumu nego pri minimumu Sunčeve aktivnosti,
- vršci su znatno viši početkom zime nego ljeti,
- promjene vrijednosti MUF-a su znatno veće zimi nego ljeti (ljeti su položnije krivulje),
- pri maksimumu Sunčeve aktivnosti MUF može dosegnuti i do 50MHz, a pri minimumu tek 25MHz.

Za ostvarenje dalekih veza se preporučuje raditi na frekvencijama blizu MUF-a, što je dvostruko korisno. Na višim su frekvencijama, zbog manje ionsferske apsorpcije, manji gubitci, a „skočna udaljenost“ je veća. Vjerovatnost ostvarenja daleke veze je znatno veća na 28 MHz nego na 14MHz. Podrazumjevaju se prosječni uvjeti rasprostiranja.

5.3 Iznimni uvjeti rasprostiranja

Poremećaji

U vrijeme izvanredno snažnoga, nenormalnog zračenja, koje je posljedica erupcija na Sunčevoj površini, a s tim u vezi veoma jakoga ultraljubičastoga i rendgenskog zračenja, dolazi do posebno visoke razine ionizacije u D-sloju. To se smatra uzrokom povećane apsorpcije i slabljenja radiovalova prije nego oni stignu do slojeva mogućeg odbijanja (E_1 , F_2). Posljedica je potpuni prekid komunikacija u cijelom dijelu HF spektra, koji može potrajati nekoliko minuta do nekoliko sati. Pojava se naziva „iznenadnim ionsferskim poremećajem“ *SID*, eng. sudden ionospheric disturbance.

Druga pojava koja može uslijediti oko dva dana poslije *SID*-a, a koja se očituje kao postupno „blijedenje“ ili „potamnjenje“ signala, a može potrajati od nekoliko sati do nekoliko dana, posljedica je vrlo jake ionizacije D-područja uz istodobno slabljenje ionizacije F-sloja. Uzrok te „ionsferske oluje“ su električki nabijene spore čestice, koje su odašiljane sa Sunca istodobno s erupcijama.

Feding

Pored fedinga opisanog u poglavlju 5.1 koji nastaje zbog toga što se brod nalazi između točaka u kojima prestaje djelovanje površinskog vala, a nije još dostignuta točka kada se na zemlju vraća prostorni ionsferski val, postoji još i feeding koji nastaje radi superpozicije (zbrajanja) ionsferskih valova različite faze. Kako se uvjeti u ionsferi stalno mijenjaju, na mjestu prijama se ne može očekivati stalan signal. Pored slabljenja energije radiovala razmjerno udaljenosti od odašiljačke antene, tu je i dodatno slabljenje zbog apsorpcije dijela

energije u ionosferi. Uslijed refrakcije koja nastaje u ionosferi dolazi do promjene faze kao i polarizacije signala koji se vraća na zemlju. Uz to je moguće da na mjesto prijama iz istog izvora stižu dva vala ili više njih, koji su prošli različitim putevima, npr. nakon jednostrukog ili višestrukog odbijanja. Ako se dogodi da fazna razlika dvaju valova istoga signala, koji su prošli nejednako duge putove, iznosi oko 180° , oni se, djelomice ili u potpunosti poništavaju. Tada dolazi do distorzije (iskrivljenja) ili do potpunog nestanka signala, do fedinga (eng. fading, koji blijedi, koji se gubi).

Selektivna distorzija AM signala, selektivni feding, nastaje zbog moguće razlike u razini fedinga između jednog i drugog bočnog pojasa kao i između bočnih pojasa i nositelja. Selektivni feding je znatno smanjen uporabom SSB-modulacije.

Feding (ne onaj selektivni), moguće je spriječiti sustavom od dvaju prijemnika ili više njih na prostorno odvojenim antenama različite polarizacije, tako da uvijek barem jedan od njih prima signal bez fedinga i taj se uzima kao zajednički izlaz takvog sustava. Učinak fedinga može se smanjiti i dobrom automatskom regulacijom pojačanja u prijammiku.

Povremeno E-odbijanje

Povremeni E_s -sloj stvara se unutar E-sloja zbog utjecaja vrlo jakih vjetrova koji na međusobno relativno maloj visinskoj razlici pušu u suprotnim smjerovima, tvoreći tako „škare“ koje uz prisutnost magnetskog polja tvore tanke, jako ionizirane oblake slučajnog prostornog rasporeda, neujednačenog oblika ili u obliku diska, koji traju samo nekoliko sati. Gustoća im se mijenja, a u području srednjih zemljopisnih širina sjeverne hemisfere, kreću se veoma brzo od jugoistoka prema sjeverozapadu. Iako se E_s može razviti u bilo koje doba godine, na našim zemljopisnim širinama najizrazitiji je između svibnja i kolovoza, a upola manje izrazit početkom prosinca.

Kritična frekvencija za E_s tijekom najveće ionizacijske gustoće iznosi do 50 MHz, što omogućava komunikaciju na udaljenostima 500-600 km, bez preskočne udaljenosti, upotrebom jednostavne dipolne antene na frekvencijama 28 MHz i 50 MHz. Maksimalna uporabljiva frekvencija, MUF za E_s , može dosegnuti do 150 MHz, ponekad i 220MHz, tako da se omogućuje komunikacija na 144 MHz na veće udaljenosti i s većim „preskokom“.

Treba spomenuti još jedan vid rasprostiranja, a to je *difuzno širenje radiovalova*. Ono nastaje kad se dio energije radiovala rasprši u svim smjerovima pa i natrag prema izvoru. Naziva se skaterskim rasprostiranjem (eng. scatter, raspršiti se, rasuti se), pa postoji troposferski i ionosferski skater. Kod ionosferskog rasprostiranja ulogu „raspršivača“ imaju ionizirani tragovi meteorita, ionizirana kozmička prašina i drugo što se nađe uglavnom u E-području. To može pomoći popunjavanju mrtvog područja signalima granične upotrebljivosti.

Polarno svjetlo ili aurora

Iznenadni bljeskovi sunčeve aktivnosti praćeni su erupcijom nabijenih čestica koje dopiju i do Zemljine atmosfere 24-36 sati nakon erupcije. Tu uz pomoć zemljinog magnetskog polja mogu uzrokovati fluorescencije u E-području, „zavjese“ od iona, koje svijetle kao sjeverno polarno svjetlo (lat. Aurora borealis), ili južno polarno svjetlo (Aurora australis). Na tim se „zavjesama“ mogu lomiti radiovalovi u području iznad 20MHz, dok se istodobno, u nižem D-

području, zbog povećane apsorpcije, gube valovi nižih frekvencija. Lom je praćen i raspršivanjem (skater) što rezultira drhtavim fedingom i nerazumljivom telefonijom.

6. TROPOSFERSKO RASPROSTIRANJE

Troposfera je niži dio atmosfere koji se proteže od površine Zemlje do visine od oko 9 km na polovima, tj. do oko 17 km na ekvatoru. U troposferi, osim u slojevima temperaturne inverzije, temperatura opada s visinom, približno 1 °C na 100 m. Hidrometeorološke promjene kao što su oblaci, kiša, magla, snijeg, grad, zračne struje i vrtlozi mijenjaju temperaturu, tlak i vlažnost atmosfere, a time i uvjete rasprostiranja, jer se mijenja indeks loma vala. Te promjene u troposferi posebice utječu na radiovalove frekvencija iznad 50 MHz i to na više načina:

1. apsorpcija ili gušenje radio valova jako se povećava s povećanjem frekvencije radio valova. Neke meteorološke pojave kao kiša i vodena para mogu dodatno absorbirati radio valove visoke frekvencije,
2. mjesne nehomogenosti u dijelu troposfere uzrokuju raspršivanje vala (skater),
3. velike i nagle promjene vlažnosti i temperature zraka između horizontalnih slojeva troposfere uzrokuju refleksiju vala,
4. ako s visinom dođe do naglog opadanja indeks loma, mogu se pojaviti uvjeti za tzv. kanalno rasprostiranje (eng. ducting, kanaliziranje), poput mikrovalova u valovodu. Te pojave omogućuju da se troposferskim rasprostiranjem ostvare daleke veze i preko „vidokruga“ na frekvencijama iznad 50 MHz. Na taj se način spomenutim kanalom koji se stvara na visini od 40...50m elektromagnetski val savija, prateći Zemljinu površinu. Na taj način mogu se ostvariti daleke veze, do 1500km i dalje, uz uporabu vrlo male snage i jednostavnih antena. Slabljenje radiovala u ovom slučaju je znatno manje nego da se val širio na nižim visinama u gušćoj atmosferi gdje je slabljenje jače. Uvjeti „vođenja vala kanalom“ mogu potrajati nekoliko dana. Iako takve veze nisu jako pouzdane, ipak mogu pružiti zadovoljstvo radioamaterima za ostvarivanje dalekih veza u VHF i UHF pojasu. Razdoblja povoljna za troposfersko rasprostiranje je često moguće predvidjeti promatranjem vremenskih promjena.

6.1 Prostorni val i rasprostiranje visokofrekvencijskih valova

Slika 6.1. prikazuje rasprostiranje VHF i UHF radiovala u troposferi između dviju antena smještenih jedna prema drugoj unutar vidokrauga. Ako antene nisu previsoko ili sasvim blizu jedna do druge, znatan dio energije vala se odbija od Zemljine površine, pa se na mjestu prijамne antene pojavljuje stvarni signal složen od izravne zrake i one odbijene od tla.



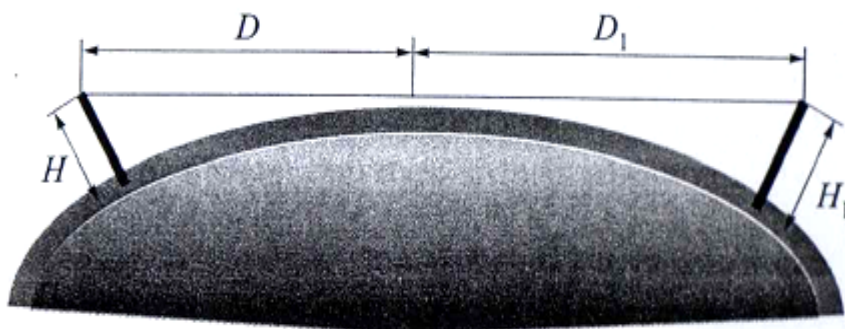
Slika 6.1 Rasprostiranje radiovala između antena u vidokrugu

U mnogim takvim slučajevima komuniciranja između dviju postaja, pri malenom upadnom kutu odbijenog vala i horizontalnoj polarizaciji, odbijanje zakreće fazu vala (za oko 180°). Ako bi putevi obaju valova bili približno jednake duljine, ta dva dijela signala stigla bi na mjesto prijama protufazno i međusobno bi se poništila. Put odbijenog vala svakako je nešto duži od puta izravnog vala, ali kada se mjeri u valnim duljinama tada je kod nižih frekvencija razlika znatno manja nego kod viših frekvencija. Posljedica toga je gubitak signala odaslanog na 1,8 MHz, a nasuprot tome pojačanje signala odaslanog na 50 MHz. Ako se u tom primjeru putevi razlikuju za 3m, to bi kod vala valne duljine 160 m ($f = 1,8$ MHz), dalo fazni pomak za svega $6,75^\circ$ (što slijedi iz $360^\circ \times 3/160$), dok bi kod vala valne duljine 6m ($f = 50$ MHz), fazni pomak iznosio 180° (što slijedi iz $360^\circ \times 3/6$), što bi, zbog pomaka od $\sim 180^\circ$ zbog odbijanja, učinilo taj val istofaznim s onim izravnim valom.

Jasno je da u stvarnim vezama može doći do znatnih gubitaka energije pri odbijanju elektromagnetskog vala od tla, a ni fazni pomak zbog odbijanja nije točno 180° pa ni slaganje izravnog i odbijenog vala ne mora dati potpuni gubitak (na 1,8 MHz), ili znatniji dobitak signala (na 50 MHz), u odnosu na izravnu vezu bez odbijanja.

U VHF području međudjelovanje izravnog i odbijenog vala pri komunikacijama između pokretne i nepokretne postaje može izazvati tzv. pokretno treperenje signala (eng. mobile flutter).

Ultrakratki valovi se pri širenju ponašaju slično valovima svjetlosti i to bi značilo da, šireći se pravocrtno izravni val može dosegnuti horizont, ali ne i dalje od njega. U UHF području gubici dijela energije zbog odbijanja od tla znatno se smanjuju usmjeravanjem najvećeg dijela energije u izravni val.



Slika 6.2 Radiohorizont

Jedno od osnovnih pitanja koje se postavlja jest daljina na koju je moguće ostvariti komunikaciju u VHF području. Da bi to mogli definirati potrebno je termin *radiohorizont*. Radiohorizont je mjesto točaka na kojima izravni val iz izvora dodiruje Zemljinu površinu. Ako poznamo polumjer zemlje, nije teško iz slike 6.2 izračunati udaljenosti između odašiljačke H i prijamne H_1 antene.

Ostvarivanjem VHF i UHF komunikacija postalo je jasno da se, zbog savijanja i raspršivanja valova, veze mogu uspostavljati i preko vidokruga, dakle i dalje nego što dopire vidokrug. Sličan rezultat bi dobili kad bi pretpostavili da nema savijanja i raspršivanja radio valova te da je polumjer zemlje veći za $1/3$ od stvarnog polumjera, tj. ultrakratki radiovalovi bi dosegali dalji horizont koji bi se nalazio na površini zemlje koja bi imala takvu zakrivljenost kada bismo njezin polumjer povećali za $1/3$. Tada bi udaljenosti do horizonta, D [km] na slici 6,2 iznosila:

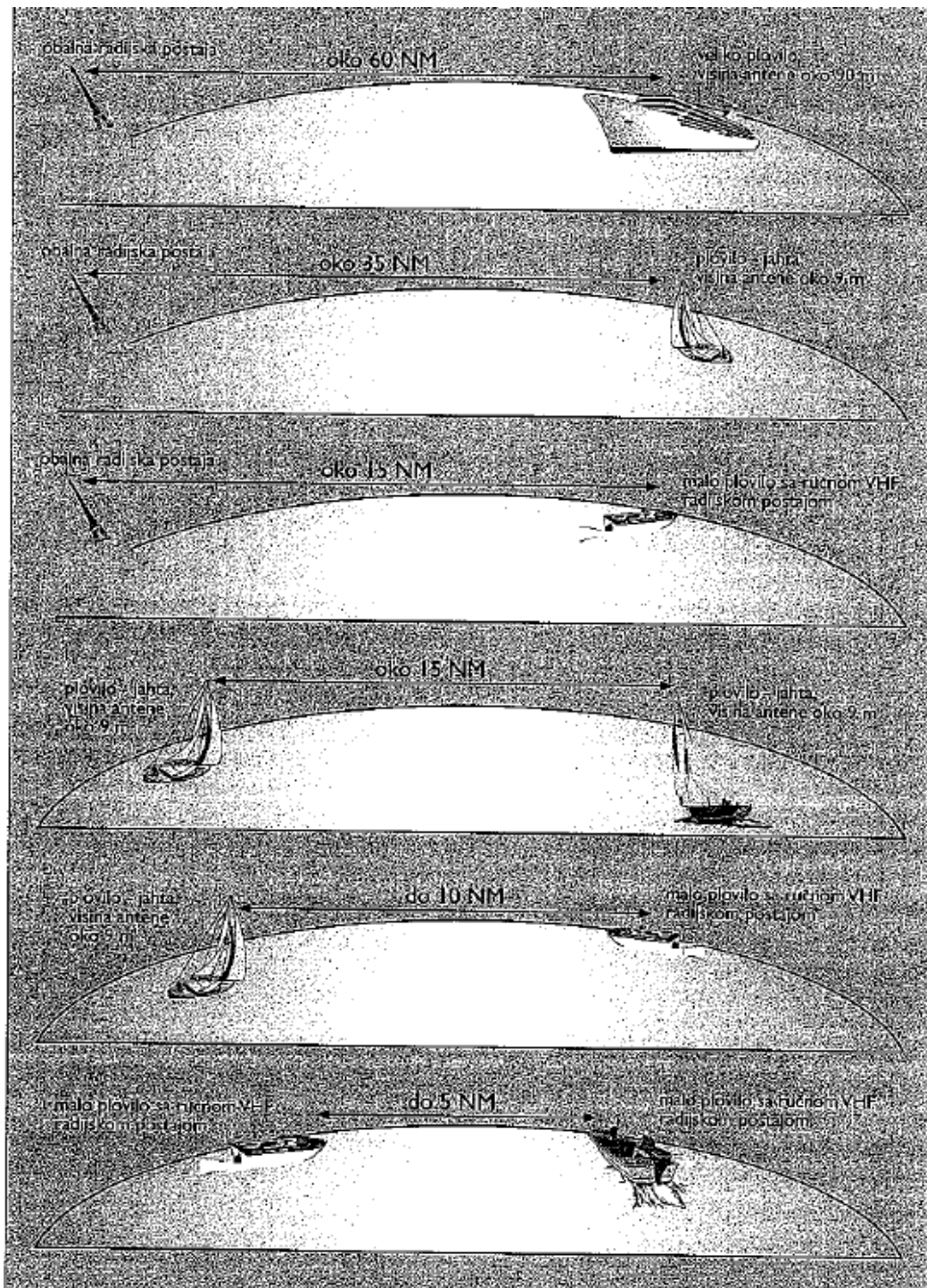
$$D = 4.124 \sqrt{H}$$

gdje je H visina antene u metrima.

Ta je udaljenost svakako veća od one vizualne, optičkog vidokruga. Izraz za udaljenost D od antene do horizonta polazi od toga da je Zemlja na cijeloj toj udaljenosti poravnate, glatke površine bez prepreka.

Komunikacijska udaljenost prijemne antene jednaka je zbroju $D + D_1$ udaljenosti od obiju antena do horizonta. Najveća djelotvornost pri prostiranju prostornim valom postiže se položajem antene koja treba biti postavljena na što je moguće veću visinu, tako da je iznad susjednih zgrada, drveća, vodova i okolnog terena.

Na slici je prikaz dometa VHF primopredajnika za različite slučajeve.



Dometi VHF primopredajnika

6.2 Visina antene, kut zračenja i polarizacija

Načelno, za djelotvornu komunikaciju na velike udaljenosti, zračenje energije bi valjalo usmjeriti pod što manjim kutom iznad horizonta.

Za rad u pojasu 1,8MHz i 3,5MHz upotrebljava se jednostavna žična antena s velikim kutom iznad horizonta i dosegom od nekoliko stotina kilometara. Od 7 MHz sve do 29.7 MHz upotrebljava se horizontalna žična antena s malim kutom zračenja iznad horizonta. U tim se

pojasevima rabi i višepojasna vertikalna svesmjerna antena. Za rad na 50 MHz i na višim frekvencijama gotovo se uvijek rabe antene s velikim dobitkom i horizontalnom polarizacijom, osim u pokretnoj službi s FM i u radu preko repetitora.

6.3 Troposferska temperaturna inverzija

Odstupanja od normalnog opadanja temperature s porastom visine u troposferi događaju se kao mjesne anomalije, ali mogu zahvatiti i čitave kontinente. Događa se da se velika masa suhoga toplog zraka zadržava nekoliko sati ili dana iznad sloja hladnog i vlažnog zraka (npr. iznad velike vodene mase, nekog jezera ili morskog zaljeva). Takva inverzija omogućuje komunikaciju na 144 MHz i na višim frekvencijama na udaljenostima od 1000 km i više.

Dnevno se događaju temperaturne inverzije pri izlasku i pred zalazak Sunca. Zrak se, naime, na većoj visini brže zagrijava od sloja zraka uz samu Zemljinu površinu, a isto tako se sporije hladi kada Sunce zalazi. Dnevna temperaturna inverzija može pojačati signal preko vidokruga za čak 20 dB i tako povećati doseg za 20-50 posto. Dnevne inverzije pojavljuju se i uz morsku obalu, a prouzročite ih vjetrovi s mora i s kopna. Inverzija koja se događa u dolinama zbog mjesnih atmosferskih i topografskih uvjeta, koji omogućuju da se hladna zračna masa spusti sasvim nisko u dolinu, ostavljajući gore topli sloj zraka događa se obično ljeti nakon zalaska Sunca. Sve se pojave u troposferi mogu događati u svako doba godine, ali su najčešće u kasno proljeće i ranu jesen, ali, isto tako, i u veljači mogu nastati jake i stabilne inverzije i stvoriti uvjete za iznimno uspješne VHF komunikacije.

7. OSNOVNE DEFINICIJE RADIOTEHNIKE

Radiokomunikacijski sustav sastoji se od tri osnovna dijela: *odašiljača, prijenosnog sredstva i prijarnika.*

Odašiljač služi za transformaciju poruke (modulacijskog signala) u pogodan oblik (modulirani signal) kako bi se što djelotvornije prenio do prijarnika. Transformacija signala poruke naziva se modulacijom, a svrha joj je da se odaslani signal što bolje prilagodi uvjetima prijenosa. Prijenosno je sredstvo u kojem se šire elektromagnetski valovi najčešće atmosfera u blizini Zemljine površine, a pri satelitskim komunikacijama i svemirski prostor. Jedno je od glavnih svojstava prijenosnog sredstva da uzrokuje gubitke snage signala, koji potječu od gušenja i raspršivanja. Zadatak je prijarnika da iz prijenosnog medija izdvoji željeni modulirani signal i iz njega što vjernije rekonstruira izvorno odaslanu poruku.

Za vrijeme prijenosa radiokomunikacijskim sustavom javljaju se *izobličenja signala, interferencije i šum.*

Izobličenje je pojava odstupanja valnog oblika signala od njegova izvornog oblika. Teorijski je moguće izbjeći izobličenja, ali se radi ekonomičnosti ili zbog tehnoloških ograničenja dopuštaju određena izobličenja koja ovise o sadržaju poruke i redovito bi trebala ostati u granicama međunarodnih preporuka (CCIR).

Interferencija je pojava mijenjanja oblika izvornog signala zbog djelovanja signala drugih sustava. I interferencija se teorijski može izbjeći, ali se ipak njeno djelovanje potpuno ne

isključuje zbog ekonomskih i tehnoloških razloga. Dopušteni utjecaji interferencije također su dan i međunarodnim preporukama (CCIR).

Šum je neželjeni signal sa slučajnom raspodjelom amplitude koji uvijek prati koristan signal. Šum potječe od gibanja elektrona te ga je nemoguće eliminirati. Izvor šuma u radiokomunikacijskom sustavu može biti u njegovim elementima ili izvan njih i on predstavlja osnovno fizikalno ograničenje komuniciranja. U radiokomunikacijama u užem smislu šum može djelomično ili potpuno prekriti izvorni signal, tako da se u prijarniku ne može rekonstruirati izvorna poruka.

Gotovo uvijek prijenos poruka započinje istodobno pojavom modulacijskog signala na ulazu odašiljača. To je prijenos u realnom vremenu. Dakako, signal na izlazu prijarnika manje ili više kasni za odašlanim signalom. To kašnjenje može biti zanemarivo maleno (milisekunde), ali i znatno veće kad se signal prenosi preko satelita. Ako se odbaci izobličenje, interferencija i moguće kašnjenje, onda oblik signala u ovisnosti o vremenu mora ostati nepromijenjen nakon prolaza kroz sustav.

Vremensko mijenjanje signala uzrokuje, međutim, promjene energije uskladištene u sustavu. Kako se prijenosni sustav svojom tromašću opire, brzina je promjene signala ograničena parametrom sustava koji se naziva *širinom frekvencijskog pojasa* (engl. *Bandwidth*). Što je veća širina frekvencijskog pojasa, više se informacija može prenjeti kroz prijenosni sustav. Da bi prijenos bio vjeran u realnom vremenu, širina pojasa radiokomunikacijskog sustava mora biti prilagođena modulacijskom, odnosno moduliranom signalu.

Širina frekvencijskog pojasa $2\Delta f$ potrebna je radi prenosa informacije koja je modulacijom utisnuta prenosnom valu. Potrebna širina pojasa ovisi o vrsti modulacije i vrsti rada. Tako je za amplitudno modulirani prenosni val sa dvobočnim prenosom (vrsta rada A3), što se upotrebljava u radio-difuziji na niskim i srednjim frekvencijama, određena širina $2\Delta f = 1,2 \dots 2\text{kHz}$. Za nemoduliranu telegrafiju (vrsta rada A1), propusna širina može biti vrlo mala i ona u visokokvalitetnim profesionalnim prijarnicima iznosi ponekad samo $\Delta f = 100\text{ Hz}$. Za frekvencijski moduliran prenosni val u radio-difuziji (vrsta rada F3) potrebna je širina propusnog pojasa od $2\Delta f = 160\text{ kHz}$.

Modulator, koji se nalazi u odašiljaču, služi da bi se signal poruke utisnuo u val nosilac i tako prenio do prijarnika. *Val nosilac* je signal sinusnog oblika kojemu je jedan od parametara (amplituda, frekvencija ili faza) nakon prolaza kroz modulator proporcionalna vremenskoj promjeni modulacijskog signala.

Upotrebom prikladne frekvencije vala nosioca olakšana je izradba djelotvornih antena razumnih dimenzija, jer one moraju biti *reda veličine valne duljine signala nosioca*.

8. OSNOVE PREDAJNIKA (ODAŠILJAČA)

Odašiljač je elektronički uređaj u sustavu radio-prijenosa koji služi za stvaranje moduliranog prijenosnog elektromagnetskog vala dovoljne snage i pogodne visoke frekvencije. Signal visoke frekvencije napaja antenu koja zrači elektromagnetski val i time omogućuje prijenos informacije do udaljenog korisnika. Prenesena informacija sastavljena je redovno od signala audio-frekvencija (50 Hz-20 kHz) ili video-frekvencija (reda veličine megaherca). Da bi se

bežičnim putem prenijela neka informacija, treba je u odašiljaču najprije transponirati u područje viših frekvencija i nakon dovoljnog pojačanja proslijediti anteni. U području viših frekvencija može se, naime, i s pomoću po dimenzijama manjih antena postići efikasno zračenje elektromagnetskih valova koji u bežičnoj vezi služe za prijenos informacije od odašiljača do prijemnika.

Snaga zračenja antene neznatan je dio privedene snage sve dok dimenzije antene ne postanu istoga reda veličine kao duljina elektromagnetskog vala. Međutim, transponiranje frekvencija poruke u područje viših frekvencija ne pridonosi samo smanjenju dimenzija antene, već omogućuje također istovremeni prijenos više informacija, jer na višim frekvencijama ima mjesta za više bežičnih prijenosnih kanala (na višim frekvencijama veća je i širina pojasa).

Temeljni pojam vezan uz odašiljače jest *modulacija*. Mada postoji više modulacijskih postupaka prema vrstama prijenosnog signala (kao npr. periodičnim impulsima ili npr. digitalni modulacijski postupak) onaj najpoznatiji i najrašireniji jest postupak modulacije sinusnog signala. Pojam modulacije podrazumijeva mijenjanje parametara pomoćnog signala ovisno o signalu koji sadrži informaciju. Pomoćni signal naziva se još i val nosioc (carrier), a signal koji sadrži informaciju te vrši promjenu vala nosioca naziva se modulacijski signal. Modulator se koristi za utiskivanje informacijskog signala iz mikrofona ili telexa u val nosioc na način da se valu nosiocu mijenja jedan od parametara kao što su amplituda, frekvencija ili faza signala u ritmu promjene informacijskog signala. Tip modulacije prema tome može biti amplitudna (AM), frekvencijska (FM) ili fazna (PM) modulacija. Modulacijom sinusnog signala premješta se informacijski signal iz osnovnog pojasa frekvencija u područje viših frekvencija. Ovako moduliran signal se onda pojačava unutar predajnika i napaja antenu. Neke vrste modulacija imaju svojstvo da je prijenos manje osjetljiv na šum i interferencije što se može iskoristiti za sustave u kojima se šum i smetnje interferencije ne mogu drugačije umanjiti. Nažalost, takve vrste modulacije načelno zahtijevaju i veću širinu pojasa, pa je to cijena koju treba platiti da bi sustav bio manje osjetljiv na smetnje. Upotrebom vala nosioca omogućava se simultani prijenos više poruka u istom prostoru bez međusobnog ometanja, a izborom pogodne frekvencije nosioca mogu se smanjiti i neke tehnološke teškoće pri izradbi uređaja.

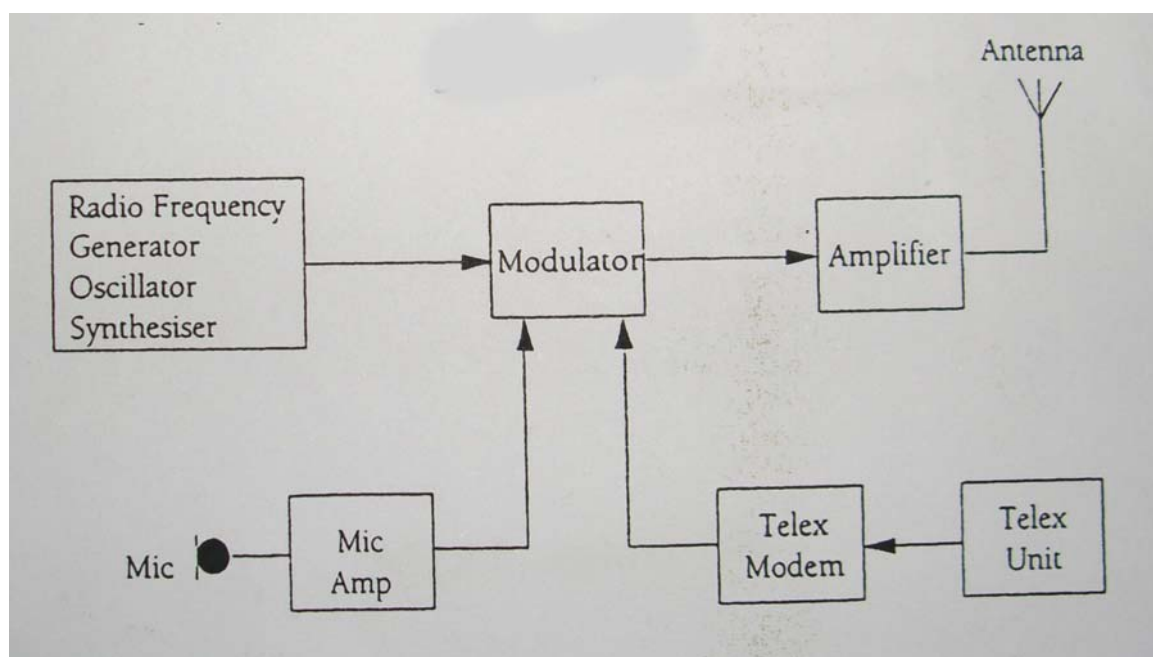
Anteni je potrebno fino ugađanje na frekvenciju vala nosioca tako da zrači učinkovito. Antene izrađene od žičanih elemenata zrače najučinkovitije kada im je duljina jednaka četvrtini, polovini ili jednoj cijeloj duljini vala. Iako bi bilo najbolje sa stanovišta kvalitete prijema koristiti posebne antene za MF i HF područje, ipak nije praktično instalirati posebne antene na brodu za MF i HF uređaje. Ove bi antene trebale biti različite duljine zato jer su valne duljine MF i HF uređaja različite. U praksi je moguće napraviti jednu antenu za MF i HF, no u tom slučaju se u nju ugrađuju dodatni induktiviteti i kapaciteti koji električki „produljuju“ ili „skraćuju“ antenu (iako je ona fizički iste duljine).

8.1. Općenito o konstrukciji odašiljača

Prema zakonitostima rasprostiranja elektromagnetskih valova, domet odašiljača ovisi, osim o frekvenciji na kojoj radi, također o njegovoj snazi. Odašiljač treba sadržavati osim sklopova koji će stvoriti i modulirati prijenosni val također sklopove za njegovo pojačanje. Odašiljači se sastoje stoga načelno od niza elektroničkih i električnih sklopova kao što su oscilatori, više stupnjeva za pojačanje i eventualnu multiplikaciju frekvencije, kruga za prilagođenje izlaza na antenu ili pojni vod, modulatora, sklopova za napajanje, pomoćnih (ponekad automatiziranih) uređaja za mjerenje, kontrolu i upravljanje.

Glavni dijelovi odašiljača (predajnika) prikazani su na slici 8.1 su:

1. mikrofon (Mic),
2. NF pojačalo (Mic Amp),
3. VF oscilator (Radio Frequency Generator Oscilator Syntesizer),
4. VF pojačalo (ugrađeno u 3),
5. modulator (Modulator),
6. izlazno pojačalo (Amplifer),
7. elementi za prilagođavanje (ugrađeno u 6),
8. antena (Antenna)



Slika 8.1. Blok shema radio – predajnika (odašiljača)

1. Mikrofon (na blok shemi označen sa Mic) pretvara zvučne titraje u električne titraje niske (zvučne) frekvencije. Titranje zraka izazvano zvukom pokreće membranu mikrofona koja svojim titranje, posredno, uzrokuje promjenu struje kroz mikrofon. Pri tom su frekvencije tih promjena jednake frekvencijama zvuka, a amplitude titraja ovisne su o jakosti zvuka.

2. Niskofrekvencijsko pojačalo (na blok shemi označen sa Mic Amp) pojačava slabe signale iz mikrofona. NF pojačala predajnika izrađena su u integriranoj tehnici.

3. Visokofrekvencijski oscilator (na blok shemi označen sa Frequency Generator Oscilator Syntesizer) proizvodi signl visoke frekvencije stalne amplitude. Taj signal u anteni stvara val nositelj. Takav VF signal modulira se zvučnim signalom iz nirofona, a zatim se pojačava i posredstvom antene odašilje kao elektromagnetski val u prostor. Takav val prenose informaciju zvučnog signala iz mikrofona na velike udaljenosti.

4. Visokofrekvencijsko pojačalo (na blok shemi ugrađen u Frequency Generator Oscilator Syntesizer) pojačava visokofrekvencijske signale dobivene iz VF oscilatora.

5. Modulator (na blok shemi označen sa Modulator) utiskuje signale zvučne frekvencije iz mikrofona u visokofrekvencijske signale iz oscilatora. Na taj se način dobivaju modulirani signali. Valovi visoke frekvencije mogu doprijeti na velike udaljenosti, a pri tom prenose i informaciju koja je bila sadržana u zvučnim titrajima.

6. Izlazno pojačalo (na blok shemi označen sa Amplifer) pojačava modulirane VF signale koji se vode u antenu.

Elementi za prilagođavanje (na blok shemi ugrađen u Amplifer) služe za prilagodbu signala karakteristikama antene sa ciljem da se signali emitiraju sa što manje gubitaka.

Antena (na blok shemi označen sa Antenna) služi za odašiljanje moduliranih VF signala.

Teleks uređaj je spojen na odašiljač preko uređaja koji se naziva Telex modem.

Svaka radio-postaja radi na svojoj (valnoj duljini) frekvenciji koja je određena međunarodnim sporazumom. Da se emisija raznih radio-stanica ne bi međusobno miješale, njihove se osnovne frekvencije moraju razlikovati. Elektronički sklopovi od kojih se sastoje odašiljači razlikuju se ovisno o njihovoj namjeni i upotrijebljenoj frekvenciji. Tako se npr. frekvencijska modulacija provodi obično u nekom stupnju male snage, tj. u jednom od prvih stupnjeva pojačanja, a amplitudna se modulacija vrši obično u posljednjem stupnju za veliku snagu. Za neke tipične vrste odašiljača dan je u daljem izlaganju načelan sastav uz kratak opis.

Visokofrekvencijski lanac srednjevalnog radiodifuzijskog odašiljača počinje oscilatorom, zatim se nizom pojačala postiže snaga koja se privodi anteni. U izlaznom se stupnju modulira amplituda visokofrekventnog vala nosioca niskofrekventnim (audio) signalom iz mikrofona..

U radiotelefonskim odašiljačima s jednim bočnim pojasom vrši se izdvajanje i prijenos samo jednog bočnog pojasa na način da se filtracijom odstrani drugi bočni pojas. Na taj način se zauzima manji dio frekvencijskog pojasa i omogućuje rad većem broju radiostanica.

Odašiljač s frekvencijskom modulacijom djeluje svojim reaktantnim modulatorom na frekvenciju osnovnog oscilatora. Višestrukom multiplikacijom frekvencije moduliranog signala u sklopovima za množenje frekvencija postiže se nominalna frekvencija i snaga odašiljača kojom se informacija prenosi anteni.

U suvremenim odašiljačima primjenjuju se u stupnjevima manje snage pretežno tranzistori ili integrirani sklopovi. Kao oscilator služi često sintezator, a umjesto usklađenih visokofrekvencijskih pojačala upotrebljava se često širokopojasno pojačalo. Ugađanje, koje može biti ručno ili automatsko, vrši se nakon postavljanja sintezatora na određenu frekvenciju samo u izlaznom pojačalu i u stupnju za prilagođenje antene ili pojnog voda.

8.2. Osnovne značajke odašiljača

Osnovne značajke odašiljača jesu *snaga odašiljača, stabilnost frekvencije, korisnost i frekvencijsko područje, izlazna impedancija, izlazna snaga.*

Snaga odašiljača je snaga privedena anteni, odnosno ulazu pojnoga voda koji spaja izlazni stupanj s antenom.

Stabilnost frekvencije je svojstvo oscilatora odašiljača da u toku svog rada što manje odstupa od frekvencije na koju je postavljen. Ona se izražava relativno, tj. omjerom odstupanja frekvencije Δf od određene frekvencije f_0 ($\Delta f/f_0$) i odnosi se na određeni vremenski period. Kratkoročna stabilnost frekvencije daje se obično za jedan dan, dugoročna za jedan mjesec ili neki drugi određeni period vremena. Kratkoročna stabilnost frekvencije suvremenih odašiljača iznosi 10^{-4} ... 10^{-8} .

Stabilnost frekvencije odašiljača vrlo je važna jer o njoj ovisi kvalitet i sigurnost radio-veze. Međunarodnim je propisima određena potrebna stabilnost frekvencije odašiljača zavisna od njegove namjene, snage i frekvencijskog područja. Budući da je oscilator sklop koji se sastoji od niza elektroničkih elementa koji mogu mijenjati svoje karakteristike i električne parametre, neželjene promjene frekvencije titranja oscilatora mogu nastati uslijed promjene parametara aktivnog elementa i uslijed promjene parametara napojne mreže koja napaja odašiljač. Jedne i druge promjene parametara posljedica su vanjskih utjecaja na rad oscilatora. U vanjske utjecaje idu: promjena temperature sastavnih dijelova oscilatora, promjena napona napajanja, promjena opterećenja oscilatora, promjena vlažnosti i pritiska zraka, vibracije sastavnih dijelova, zamjena ili starenje pojedinih dijelova oscilatora.

Poboljšanje stabilnosti frekvencije oscilatora postiže se smanjenjem vanjskih utjecaja ili pak potpunim otklanjanjem uzroka nestabilnosti. Stabilizacija napona napajanja, primjenom termostata, kompenzacijski sklopovi i izbor titrajnog kruga s velikom dobrotom (100...300) pridonose poboljšanju stabilnosti frekvencije oscilatora. Kod odašiljača s kontinuiranom promjenom frekvencije treba kao uzrok odstupanja od nominalne frekvencije f_0 dodati još netočnost postavljanja frekvencije.

Korisnost (stupanj djelovanja) odašiljača je omjer između snage što je odašiljač predaje anteni i snage dovedene odašiljaču iz izvora napajanja snagom.

Frekvencijsko (valno) područje odašiljača određeno je maksimalnom i minimalnom frekvencijom (valnom duljinom) na kojoj odašiljač može raditi. Radna frekvencija odašiljača može biti bilo čvrsta, bilo s kontinuiranom ili diskretnom promjenom.

Da se prenese val nositelj i bočni pojas, odašiljač mora imati određenu širinu frekvencijskog RF-pojasa. Kod uobičajenog AM (DSB), širina RF pojasa jednaka je dvostrukoj vrijednosti najviše frekvencije. Kod frekvencijske modulacije širina pojasa je ovisna o indeksu modulacije, odnosno jednaka je dvostrukoj najvišoj modulacijskoj frekvenciji uvećanoj za dvostruki iznos devijacije frekvencije. Kod SSB odašiljača RF širina pojasa jednaka je najvećoj modulacijskoj frekvenciji.

Izlazna impedancija

Da se VF snaga proizvedena na izlaznom pojačalu prenese na antenski sustav, izlazna impedancija odašiljača mora biti jednaka ulaznoj impedanciji kabela kojim je antenski sustav spojen. Ako ovo nije ispunjeno doći će do gubitka na izlaznom pojačalu.

Izlazna snaga

Izlazna snaga odašiljača je snaga koja je proizvedena na izlaznom pojačalu i potom predana antenskom sustavu. Odnos ulazne i izlazne snage nekog pojačala naziva se pojačanje snage. Pri tome je ulazna snaga umnožak napona koji privedemo anodi (kolektoru) i struje anode (kolektora), a izlazna snaga je ona koju dobivamo na izlazu pojačala i možemo je predati dalje teretu.

Kod amplitudno moduliranih odašiljača izlazna snaga ovisi o modulaciji. Bez modulacije jednaka je snazi vala nositelja, a uz modulaciju od 100% veća je za 50% od snage vala nosioca. Kod frekvencijski moduliranih odašiljača izlazna snaga je ovisna o modulaciji, jednaka je s modulacijom i bez nje.

8.3 Smetnje koje izazivaju odašiljači

Smetnje koje se stvaraju otipkavanjam Morseovih znakova

Prilikom tipkanja Morseovih znakova mogu se pojaviti smetnje koje se nazivaju *klikom* (engl. *Click*, škljocanje) i *čirpom* (eng. *Chirp*, cvrkutanje). Pojava smetnje koju nazivamo klikom vezana je za brzinu uspostave, odnosno nestanka signala. Naime, ako su nastanak ili nestanak telegrafskog signala trenutni (pravokutni signal), javljat će se harmonici u signalu koji će rezultirati smetnjom. Zato i nastajanje i nestajanje signala trebaju biti usporeni.

Promjena u frekvenciji na početku telegrafskog signala naziva se čirpom. Međutim, do pojave čirpa može doći i kada se rad oscilatora ne upravlja telegrafskim signalima i tada čirp nastaje zbog promjene radnog napona ili promjene RF-opterećenja oscilatora. Radni napon oscilatora treba stabilizirati, a ako dolazi do promjene u radu oscilatora promjenom opterećenja, treba bolje odvojiti oscilator. Čirp, tj. cvrkutanje, dosta jasno označava da se radi o promjeni frekvencije.

Sporodna visokofrekvencijska zračenja

Odašiljač u radu treba zračiti val nositelj i njegove bočne pojaseve. Međutim, uz to on će uvijek u većoj ili manjoj mjeri zračiti i na drugim frekvencijama. U prvome redu to su harmonička zračenja koja najčešće nastaju u izlaznome stupnju, a nisu dovoljno filtrirana u filtru. Odašiljač može zračiti i na bilo kojoj drugoj frekvenciji, bilo kao rezultat nekog samoosciliranja u odašiljaču ili kao produkt nekog neželjenog miješanja. Sva su sporedna zračenja zagađivači frekvencijskog spektra i potencijalne smetnje u drugim prijamnicima, te ih treba svesti na najmanju mjeru. Dopušteni iznosi sporednih zračenja regulirani su propisima, a ovise o radnoj frekvenciji i upotrebnoj snazi.

Zračenja kroz kućište

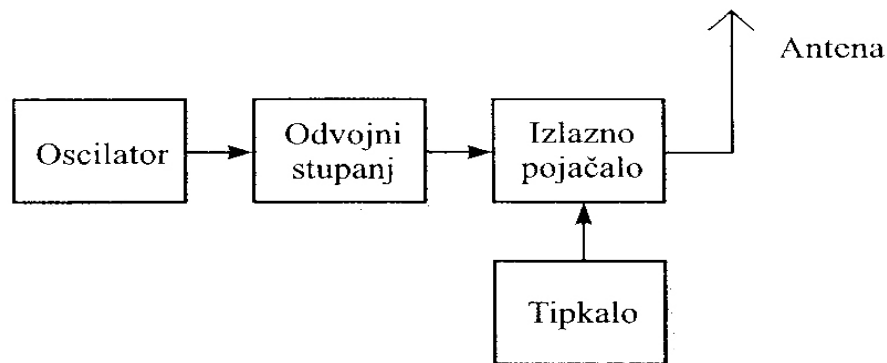
Odašiljač zrači snagu preko antene. Ako umjesto antene postavimo umjetnu antenu (opteretni otpor koji zamjenjuje antenu, idealno uklopljen da ne zrači), ponekad

se može zapaziti signal izvan odašiljača proizvedan od samog odašiljača. To se naziva zračenjem kroz kućište. Suzbija se dobrim odklapanjem i uzemljenjem kućišta.

8.4 Elektronički sklopovi odašiljača

8.4.1 Odašiljač s translacijom ili bez nje

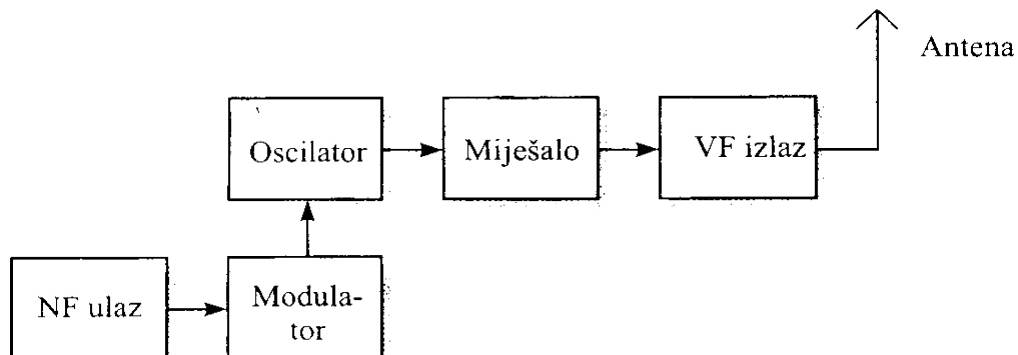
Najjednostavniji odašiljač za telegrafiju (CW) ima samo jedan stupanj-oscilator, koji proradi svaki put kada pritisnemo telegrafsko tipkalo. Takav odašiljač radi na frekvenciji oscilatora i ima veoma malu snagu. Pojačanje snage možemo dobiti ugrađujući izlazni stupanj (PA, prema engl. *Power amplifier*, pojačalo snage), između oscilatora i antene. Na slici 8.2. prikazana je blok shema za Morseovu telefoniju (CW),(A1A).



Slika. 8.2. Blok shema odašiljača za Morseovu telefoniju (CW), (A1A)

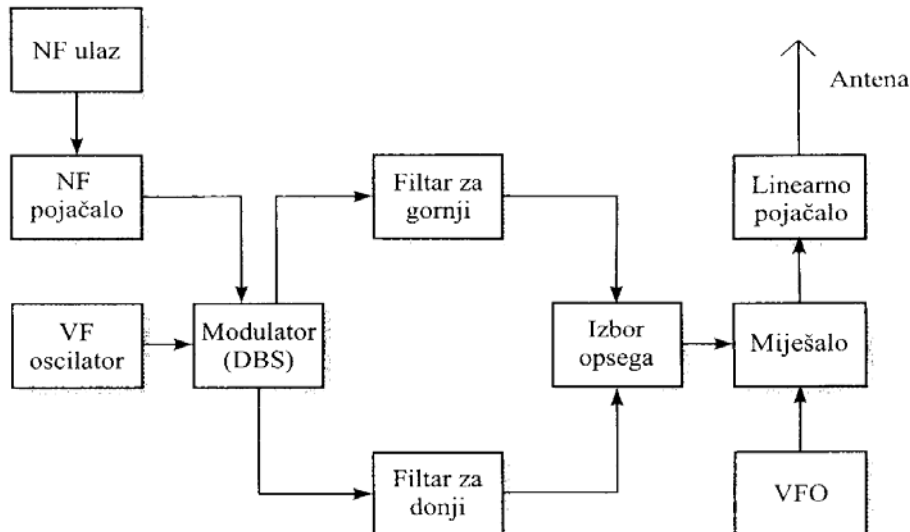
Postavljanje posebnog odvojnog stupnja (engl. Buffer) između oscilatora i izlaznog stupnja postiže se stabilnost oscilatora. Između odvojnog i izlaznog stupnja mogući su jedan ili više stupnjeva pojačanja kako bismo dobili potrebnu snagu na izlazu odašiljača. Kod odašiljača za veze telefonijom pomoću amplitudne modulacije AM, treba priključiti modulator koji mijenja amplitudu vala nosioca u ritmu signala dobivanog iz mikrofona.

Frekvencijska modulacija (FM) se može postići u oscilatorskom stupnju, a SSB telefonija (telefonija jednim bočnim pojasom) ima posebne stupnjeve za proizvodnju takvog signala Na slici 8.3 prikazan je blok shema FM odašiljača.



Sl. 8.3. Blok shema FM odašiljača (F3E)

Kod SSB odašiljača (slika 8.4) najprije se izvrši klasična amplitudna modulacija (AM), koja ima val nositelj i dva bočna pojasa. Zatim se takav signal filtrira tako da se propušta kroz filter samo jedan bočni pojas, gornji ili donji, a drugi bočni pojas i val nositelj se potiskuju. Ovaj signal se zatim miješa sa signalom lokalnoga oscilatora, i na kraju se pojačava u linearnom pojačalu. Signali se miješaju u miješalu, kao kod superheterodinskog prijammnika.



SI.8.4. Blok shema SSB odašiljača s potisnuti nositeljem

Između modulacijskoga ulaza u odašiljaču (mikrofon ili sl.), i modulatora može se nalaziti jedan ili više stupnjeva NF pojačanja. Svaki stupanj odašiljača (oscilator, množilo frekvencije, odvojni stupanj, VF pojačalo, NF pojačalo, izlazni stupanj), ima svoj izvor napajanja.

Oscilator ne mora raditi na radnoj frekvenciji odašiljača. Ako je frekvencija na kojoj radi oscilator niža, frekvencija odašiljanog signala bit će stabilnija. Zbog toga oscilator često radi na nižoj frekvenciji, a unutar odašiljača postoje posebni stupnjevi za udvostručavanje ili utrostručavanje frekvencije. Više od utrostručavanja frekvencije jednim stupnjem vrlo se rijetko izvodi, ali se može uzastopno upotrijebiti više stupnjeva umnožavanja frekvencije.

8.4.2 Način rada pojedinih stupnjeva odašiljača

Miješalo

Kod SSB odašiljača postoji miješalo. Jednako kao kod superheterodinskog prijammnika miješalo miješa dva signala, ima dva ulaza, a na izlazu dobijemo zbroj ili razliku signala.

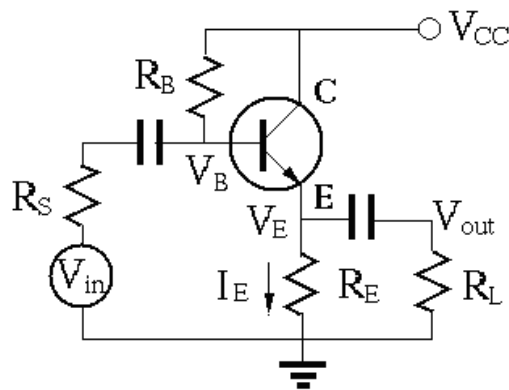
Oscilator

U sklopu oscilatora odvija se proces pretvorbe istosmjernje struje izvora napajanja u izmjeničnu struju željene visoke frekvencije. Valni oblik, frekvencija, i amplituda električnih titraja određeni su vrstom primijenjenog oscilatora i njegovim parametrima.

Titraji koje stvara osnovni oscilator u odašiljaču moraju imati sinusni oblik, a njihova frekvencija i amplituda moraju biti stabilne.

Odvojni stupanj

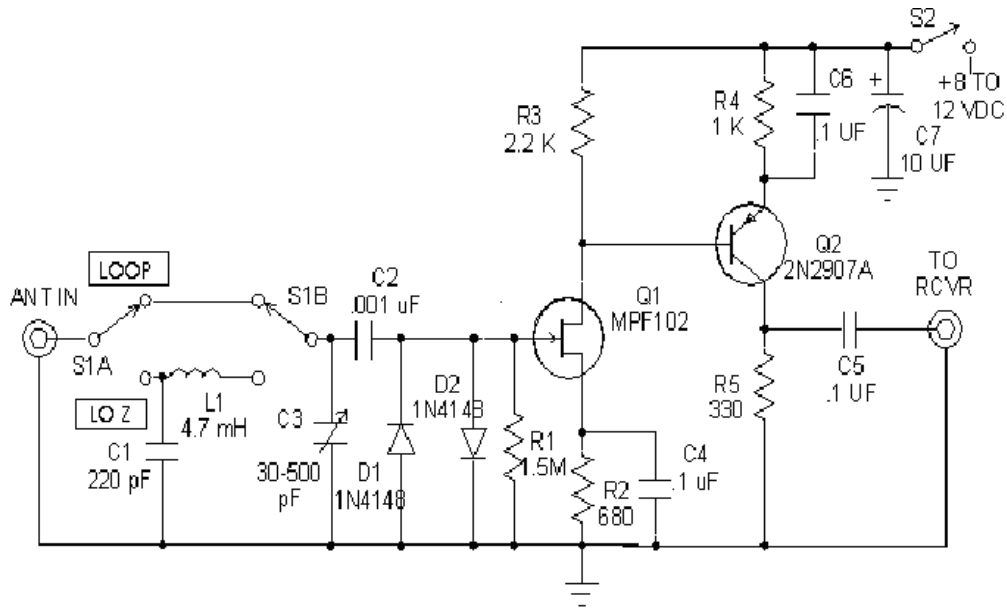
Da se smanji utjecaj promjena na izlazu na rad oscilatora, a time i na stabilnost frekvencije koju oscilator daje, između oscilatora i stupnja pojačanja koji slijedi, umeće se odvojni stupanj. Odvojni stupanj u pravilu nema pojačanje, a ono je približno jednako jedinici, čak i nešto manje. Izvodi se obočno kao emitorsko slijedilo. Signal s oscilatora se dovodi na bazu tranzistora sklopa na slici 8.5, a odvodi se s emitera. Električna shema emitorskog slijedila prikazana je na slici 8.5.



Slika 8.5. Električna shema emitorskog slijedila

Pobudni stupanj

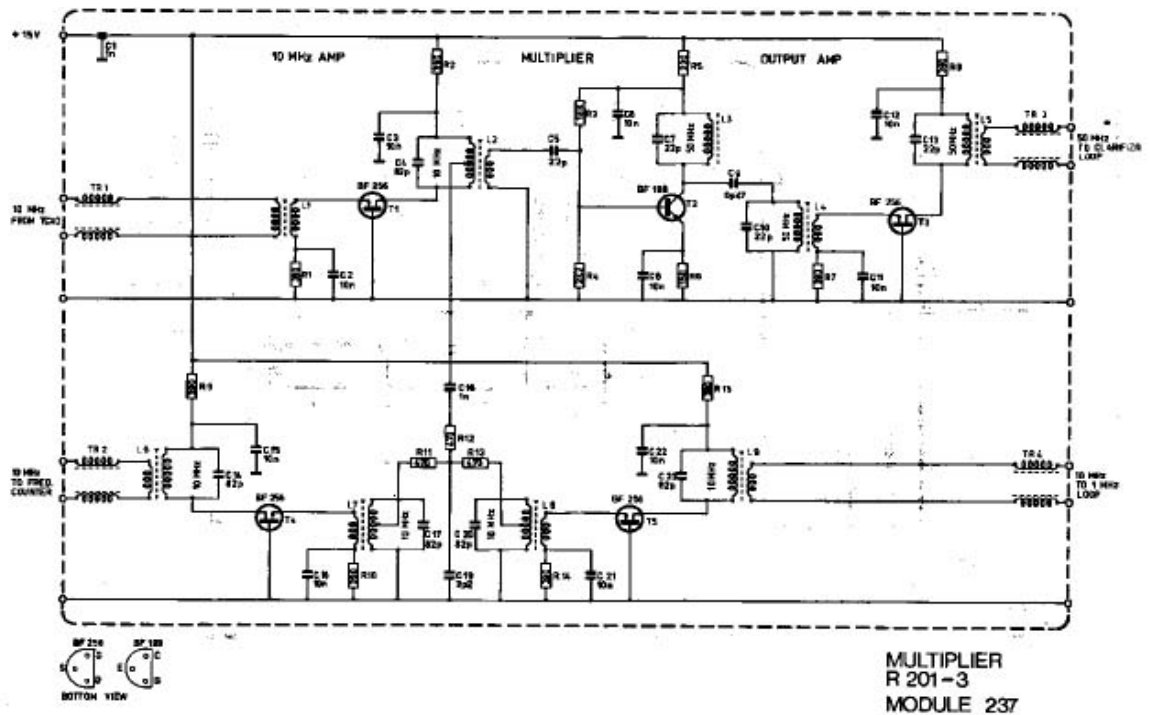
Pobudni stupanj odašiljača služi da se izlaznom pojačalu dovede potrebna snaga za rad izlaznog pojačala. Kolika je potrebna pobudna snaga ovisi o izlaznoj snazi, ali i o razredu izlaznog stupnja. Za pojačalo C razreda potrebna je najveća pobudna snaga, a za pojačalo A razreda je najmanja snaga. Na slici 8.6. prikazana je električna shema pobudnog stupnja.



Slika 8.6. Električna shema prepojačala

Množilo frekvencije

Često nam je potrebno da se frekvencija oscilatora udvostruči ili utrostruči. Kako su tranzistori nelinearni elementi, na njihovom će se izlazu pored osnovne frekvencije javljati i signali dvostruke, trostruke, četverostruke frekvencije. Ako titrajni krug u izlazu tranzistora ugodimo na frekvenciju dvostruku od frekvencije na ulazu, pojačalo će djelovati kao udvostručavač frekvencije. Na sličan se način može ugoditi titrajni krug na trostruku frekvenciju. Četverostruke i više frekvencije se rijetko izvode (u direktnom izvođenju), jer su te harmoničke komponente slabo izražene. Umjesto toga, primjenjuju se dva ili više stupnjeva za udvostručavanje ili utrostručavanje frekvencije. Na slici 8.7. prikazana je električna shema množila frekvencije.



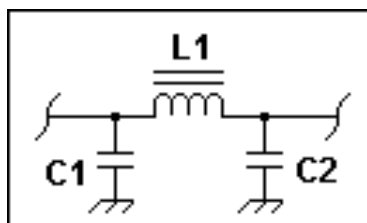
Slika 8.7- Električna shema množila frekvencije

Pojačalo snage

Nalazi se na samom izlazu iz odašiljača pa se često naziva *izlaznim pojačalom*. Na izlaz pojačala se spaja antena, odnosno antenski sustav. Na izlaznom stupnju vladaju najveći naponi i struje u odašiljaču, a time i najviša toplinska naprezanja. Zbog toga se mora voditi računa o odvođenju toplinske energije, bilo izradom posebnih hladnjaka za odvođenje topline ili čak prisilnim odvođenjem topline uporabom ventilatora. Kod izvedbe izlaznog pojačala mora se voditi računa o stupnju korisnosti izlaznog pojačala. Stupanj korisnosti je omjer izlazne i ulazne snage. Pri tome je izlazna snaga ona snaga koju proizvodi izlazno pojačalo, a ulazna snaga je snaga na ulazu pojačala. Izlazna pojačala najčešće rade u klasi C i na taj način imaju znatno veći stupanj djelovanja od pojačala koja rade u klasi A i B. Budući da SSB odašiljač na izlazu ima linearno pojačalo, kod njega se ne rabi klasa C.

Izlazni filter (PI-filtar)

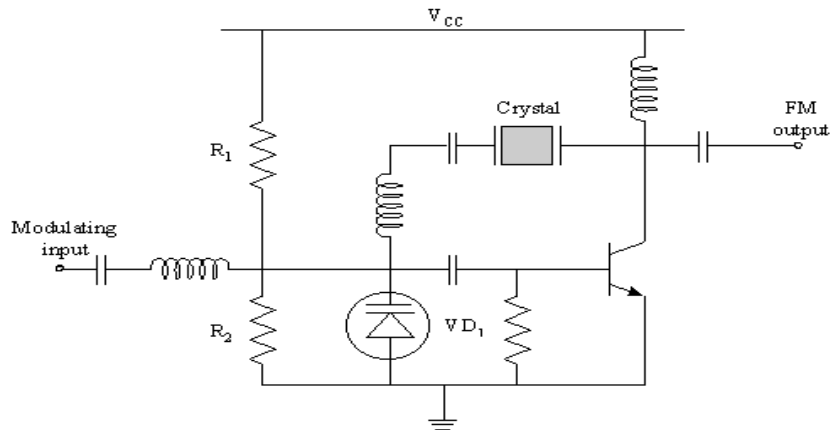
Između izlaznog pojačala i priključnice na koju se spaja antenski kabel u pravilu se uvijek postavlja izlazni filter, koji se zbog svog oblika, koji sliči grčkom slovu *pi*, naziva se Π -filtar (PI-filtar). Njegova uloga u odašilaču je dvostruka, s jedne strane vrši transformaciju (prilagodbu) izlazne impedancije izlaznog pojačala na ulaznu impedanciju kabla, s druge strane potiskuje harmonička zračenja koja se stvaraju na samom izlazu. Kod tranzistorskih izlaznih stupnjeva često se rabi dvostruki Π -filtar, jer su u pravilu izlazne impedancije tranzistorskog pojačala veće, a veće su i amplitude viših harmoničkih frekvencija.



Slika 8.8. Izlazni filter (PI-filtar)

Frekvencijski modulator

Princip rada frekvencijskog modulatora svodi se na promjenu frekvencije nekog oscilatora u ritmu niskofrekvencijskog signala, što je u krajnjoj liniji svodi na promjenu kapaciteta ili induktivnosti u krugu oscilatora. Postoji više načina promjena ovih elemenata. Jedna od najčešćih je stavljanje varkap-diode u krug oscilatora. Na slici 8.9. prikazana je električna shema frekvencijskog modulatora s varikap-diodom. Kapacitet varikap-diode mijenja se u ovisnosti NF modulacijskom naponu, a kako se dioda postavlja u krug oscilatora to uzrokuje i promjenu frekvencije.

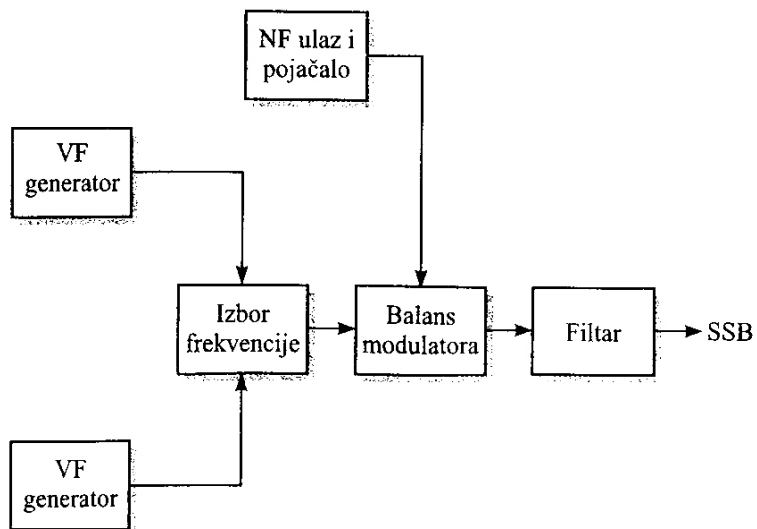
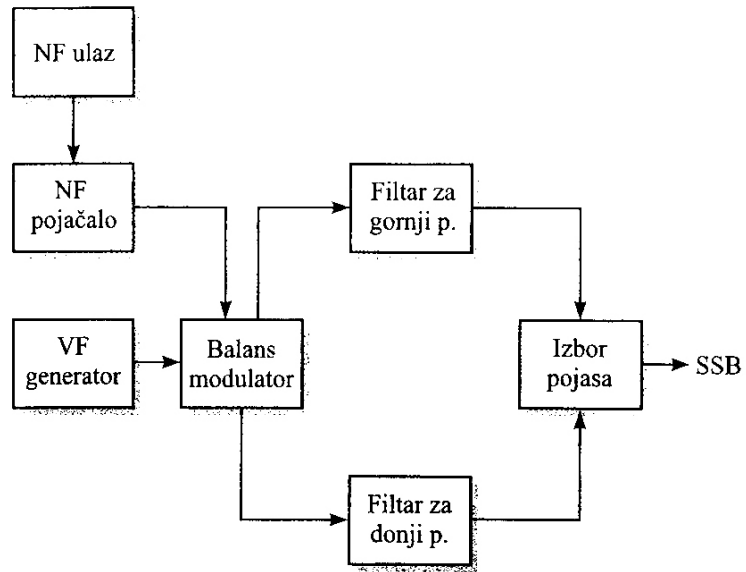


Slika 8.9. Frekvencijski modulator s varikap-diodom

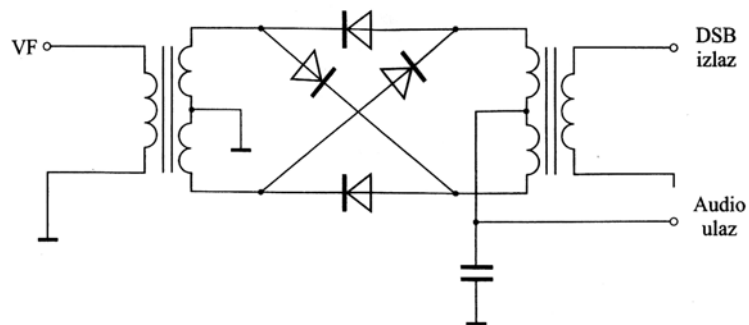
SSB modulator

Kod SSB modulatora se najprije izvrši klasična amplitudna modulacija (AM), dobije se val nositelj i dva bočna pojasa. Nakon toga se signal propušta kroz jedan od dvaju filtara. Filtri su izvedeno selektivni pa mogu propustiti samo jedan bočni pojas, a potiskuju val nositelj i drugi bočni pojas. Time se može uštedjeti snaga i širina pojasa. Bočni pojas, koji će se rabiti, redovito se može odabrati po volji, tako da uvijek imamo oba filtara i mogućnost izbora.

Moguće je napraviti i modulator s jednim filtrom. Tada moramo imati dva generatora VF signala što je prikazano na slici 8.10. Shema balansnog modulatora prikazana je na slici 8.11.



Sl.8.10. Blok shema SSB modulatora ; a) s filtrima, b) s dva oscilatora



Sl.8.11. Blok shema balansnoga modulatora (provjeri shemu)

Fazni modulator

Kod fazne modulacije mijenja se faza VF signala u ritmu modulacijskog signala. Time se neizbježno mijenja i frekvencija. Devijacija frekvencije koja se postiže na taj način ne ovisi samo o amplitudi modulacijske frekvencije, nego i o frekvenciji modulacijske frekvencije. Fazna modulacija se ne izvodi djelovanjem na sam oscilator kao kod frekvencijski moduliranih oscilatora, već djelovanjem na titrajni krug u nekom stupnju iza oscilatora. Varikap-dioda ili neki od reaktivnih modulatora djeluje na titrajni krug kao promjena kapaciteta (ili induktivnosti), kviri se rezonancija titrajnoga kruga, ali se mijenjaju i fazni odnosi.

Kristalni filter

Da bi bio moguć rad SSB-odašiljača, moramo potisnuti val nositelj i jedan bočni pojas. Kako su frekvencije vala nositelja i bočnih pojasa relativno vrlo blizu, kod potiskivanja treba uzeti *kristalni filter* s velikom strminom bokova rezonantne krivulje.

9. OSNOVE PRIJAMNIKA

Prijamnici su naprave sastavljene od niza elektroničkih sklopova s pomoću kojih se iz signala što ih u anteni induciraju modulirani elektromagnetski valovi izdvaja, pojačava i detektira signal koji sadrži željenu informaciju. Ta se informacija prenosi korisniku odgovarajućim uređajem za reprodukciju, npr. slušalicama, zvučnikom, teleprinterom, ekranom katodne cijevi, posredstvom memorije računala i sl. Radijski signal što ga je odaslao neki odašiljač, možemo primiti prijamnikom, ili drugim riječima prijamnik je uređaj koji iz antene prima signale odslane iz odašiljača. Radioprijamnik u principu čine tri osnovna dijela: ulazni dio s oscilatorom i antenom, detektorski dio filterima za izdvajanje zvučne frekvencije te niskofrekventni dio koji pojačava zvučnu frekvenciju. Željeni signal se prima podešavanjem ulaznog kruga u prijamnik na željenu frekvenciju.

Suvremeni radio-prijamnici dijele se prema namjeni na kućne radio-prijemnike, kojima se primaju programi radio-difuzijskih stanica, i na profesionalne radio-prijemnike koje primjenjuju za održavanje radio-veza državne, društvene i druge organizacije, npr. vojska, novinske agencije, brodarska poduzeća, itd. Tehnički zahtjevi za profesionalne radio-prijemnike daleko su oštriji nego za kućne radioprijemnike.

Radio-prijamnici dijele se također prema frekvencijskim područjima za koja su konstruirani i prema vrsti rada za koju su predviđeni (npr. za rad s amplitudnom modulacijom A1, A2, A3 ili s frekvencijskom modulacijom F1, F6. U praksi se radio-prijamnici konstruiraju za prijem jednog frekvencijskog područja ili više njih, ili za jednu vrstu rada ili više njih.

Radio-prijamnici dijele se i prema mjestu i ambijentu eksploatacije na prijamnike predviđene za montažu u stacionarnim radio-centrima, na prijamnike za pokretne objekte (brodove, avione, umjetne satelite i sl.) i na prenosne prijemnike. Razlike u pogledu tehničkih zahtjeva, naročito konstrukcijske izvedbe, klimatske i mehaničke zaštite za te su pojedine vrste prijemnika znatne i u većini se slučajeva ti prijamnici ne mogu jedan drugim zamijeniti.

Prema načinu biranja željene frekvencije postoji podjela na prijarnike s kontinuiranim biranjem bilo koje frekvencije unutar njihovog radnog područja, prijarnike s mogućnošću izbora između 1 do 30 fiksnih frekvencija i prijarnike s dekadnim biranjem frekvencija, kojima lokalni oscilator radi na principu frekvencijske sinteze ili analize.

Prijarni signali se razlikuju uvelike u jačini zbog raznih faktora:

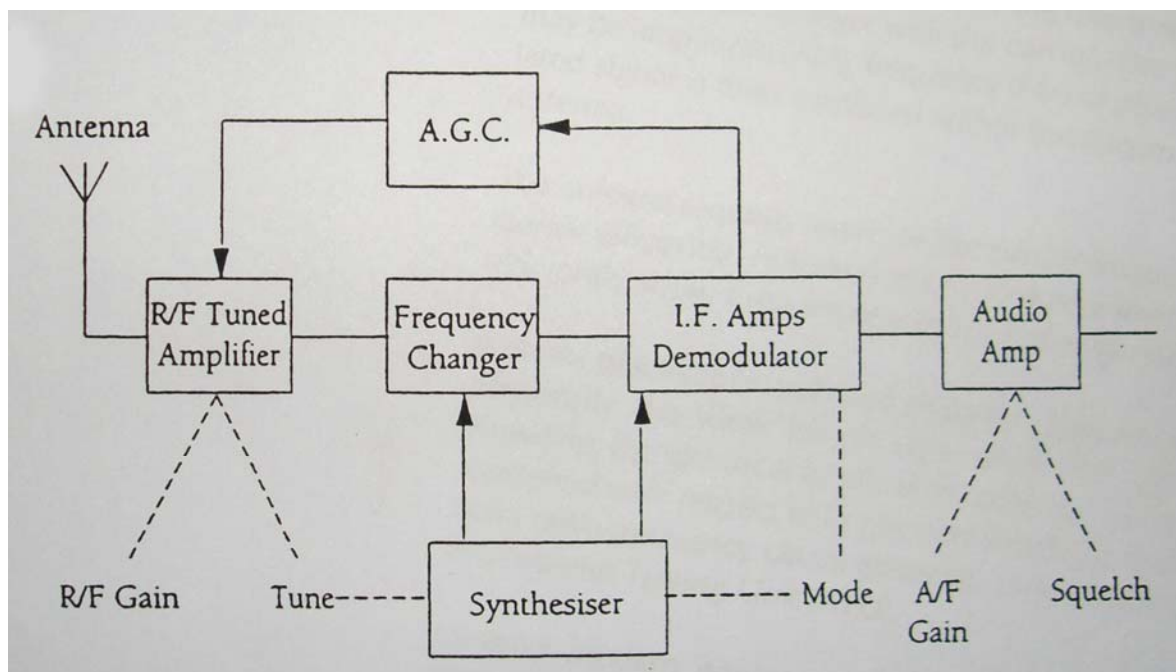
- a) zračenje lokalnog odašiljača male ili veće snage
- b) zračenje udaljene stanice visoke ili srednje snage
- c) varijacijama u ionosferi koje mogu utjecati na signale MF noću ili HF u bilo koje vrijeme –slabljenje ionizacije
- d) simulatno primanje površinskih i prostornih valova na MF noću koje mogu konstantno varirati u snazi, jačini i fazi i djelovati jedan s drugim – slabljenje međudjelovanja
- e) HF signali mogu dostići prijarnik putovanjem različitim putevima, opet uzrokujući slabljenje međudjelovanja

9.1. Općenito o konstrukciji prijarnika

Radio-prijarnik prima preko antene modulirane VF signale, izdvaja iz njih NF signale zvučnih frekvencija, tj. poruku pretvara u zvuk.

Glavni dijelovi radio prijarnika su (Slika 9.1):

1. antena (Antenna)
2. ulazni titrajni krug (R/F Tuned Amplifer)
3. lokalni oscilator (Synthesizer),
4. stupanj za miješanje (Frequency Changer),
5. međufrekvencijsko pojačalo (IF amps),
6. detektor ili demodulator (Demodulator),
7. NF pojačalo (Audio Amp),
8. zvučnik



Slika 9.1. Blok shema radio prijmnika

Antena prima modulirane elektromagnetske valove mnogih radio-postaja.

Ulazni titrajni krug odvaja iz mnoštva VF titraja samo titraje jedne frekvencije, tj. samo signale jedne radio-postaje na koju je podešen. Titrajni se krug sastoji od svitka i promjenljivog kondenzatora. Promjenom kapaciteta kondenzatora titrajni se krug dovodi u rezonanciju s frekvencijom neke od postaja. Tada se signali te postaje u titrajnom krugu pojačavaju, a signali svih ostalih postaja prigušuju.

Lokalni oscilator proizvodi nemodulirane visokofrekventne električne titraje kojih se frekvencija može mijenjati pomoću promjenljivog kondenzatora. Isti se nalazi na osovini s kondenzatorom ulaznog titrajnog kruga.

Stupanj za miješanje miješa modulirane titraje (propuštene kroz ulazni titrajni krug) s nemoduliranim titrajima iz lokalnog oscilatora, i tako stvara modulirane titraje treće niže frekvencije. Ta je frekvencija jednaka razlici miješanih frekvencija pa se zove međufrekvencija. Uzlazni titrajni krug, oscilator i stupanj za miješanje tako su međusobno vezani da prilikom primanja bilo koje postaje miješanjem njezine frekvencije s frekvencijom oscilatora dobiva se uvijek ista međufrekvencija. Stoga se svi dalji stupnjevi prijmnika mogu trajno podesiti na tu stalnu međufrekvenciju, pa otpada problem podešavanja većeg broja titrajnih krugova na frekvenciju primane postaje.

Međufrekvencijsko pojačalo pojačava međufrekventne titraje odbijene iz stupnja za miješanje.

Detektor ili demodulator odvaja NF električne titraje zvučne frekvencije iz električnih titraja međufrekvencije. Antena radio prijmnika prima modulirane visokofrekvencijske valove pa se u njoj pobuđuje modulirani visokofrekventni električni titraji. Tako visoke frekvencije ljudsko uho ne može osjetiti. Stoga se modulirani visokofrekvencijski titraji

moraju najprije demodulirati, tj. iz njih se moraju odvojiti niskofrekvencijski zvučni titraji koji su pri modulaciji bili utisnuti u visokofrekvencijske titraje iz oscilatora. Postupak odvajanja niskofrekvencijske komponente iz moduliranih visokofrekvencijskih titraja zove se *demodulacija*.

Niskofrekvencijsko pojačalo pojačava izdvojene električne titraje zvučnih frekvencija.

Zvučnik pretvara električne titraje zvučnih frekvencija u zvuk.

Da bi se dobila što veća razumljivost na izlazu prijarnika značajno je dobro poznavati rukovanje prijarnikom Prijarnik ima slijedeće mogućnosti podešavanja i kontrole:

- R.F.GAIN – Radio Frequency Gain or Sensitivity – radio frekvencijsko pojačanje. Tim se dugmetom podešava frekvencija signala koji dolazi iz antene u R/F pojačalo.
-
- AGC – Automatic Gain Control – automatska kontrola pojačanja. Tim se dugmetom obavlja automatska regulacija pojačanja umjesto ručne kontrole, npr. AGC automatski upravlja svim pojačalima u prijarniku na način da drži razinu izlaznog signala na približno konstantnoj razini iako se ulazni signal može mijenjati u širokom opsegu. Naime svrha AGC je da održi jednaku kvalitetu prijama i za slabe i za jake primljene signale.
- Većina GMDSS MF/HF prijarnika može biti podešena na željeni signal s pomoću više od jedne metode, npr. ako uparene HF frekvencije zahtijevaju možete jednostavno odabrati ITU broj kanala.
- Kod prijama SSB (J3E) emisije (govora) vrlo često je potrebno izvršiti vrlo fino podešavanje, također zbog bolje razumljivosti. To se obavlja dugmetom CLARIFIER (koje omogućuje da se frekvencija «pomakne» 10Hz).
- CLASS OF EMISSION (MODE CONTROL) – vrsta rada. Sa ovim se dugmetom prijarnik postavlja na onu vrstu emisije kojom se želi raditi.
- SQUELCH i VOLUMEN (A.F.GAIN) Squelch i volumen služi za podešavanje izlazne snage signala u zvučniku ili slušalici. Squelch isključuje šum u zvučniku u zvučniku ili slušalicama kada nema signala u eteru.
- Na brodskom primo-predajniku moguće je postavljati, odnosno birati, odvojeno prijemnu frekvenciju (Rx) i predajnu frekvenciju (Tx), odnosno birati ITU radiokanal nakon čega se, na prijarniku odnosno predajniku, automatski postave Tx i Rx frekvencije izabranog kanala. Automatsko biranje ITU radiokanala vrši se tako da se u MF/HF radiouređaj utipka broj ITU radiokanala.

Najjednostavniji prijarnik je **direktni prijarnik**. Rad direktnog prijarnika daje se opisati na slijedeći način. U radio odašiljaču, dok govorimo kroz mikrofon, naš glas se pretvara u električki signal koji sadržava informaciju. To je modulacijski signal. Nakon toga modulacijski signal ulazi u modulator gdje će se pomiješati sa valom nosiocem koji je također ušao u modulator i kao rezultat na izlazu iz modulatora dobiti ćemo modulirani signal visoke frekvencije. Kako je signal koji primamo moduliran,

prijamnik mora imati sklop koji će iz moduliranog signala izdvojiti NF signal. Taj sklop nazivamo detektorom. Poslije detektora prijamnik može imati jedan ili više stupnjeva pojačanja, kako bi se u zvučniku ili u slušalicama dobila potrebna jakost signala. Ispred detektora može biti jedan ili više stupnjeva VF pojačanja, kako bismo dobili što osjetljiviji prijamnik koji može primati i sasvim slabe signale. Tada je i selektivnost prijamnika bolja. Danas se takvi prijamnici više ne rade. U uporabi su jednostruki ili dvostruki superheterodinski prijamnici o kojima će nešto kasnije biti više riječi.

9.2 Osnovne karakteristike prijamnika

Najvažnije osnovne karakteristike radio-prijamnika jesu: *osjetljivost, selektivnost, frekvencijska stabilnost, točnost postavljanja na željenu frekvenciju, vjernost reprodukcije primljene informacije i sigurnost u eksploataciji.*

Osjetljivost prijamnika određena je potrebnim nivoom normiranog visokofrekventnog signala koji je doveden na ulaz prijamnika, da bi se na izlazu dobila normirana izlazna snaga uz određeni odnos signala prema šumu. Osjetljivost radio prijamnika izražava se bilo u mikrovoltima bilo u decibelima u odnosu na 1 μV . Za goniometarske prijamnike u kojima je antena sastavni dio uređaja, osjetljivost se izražava jakošću polja, tj. u jedinicama $\mu\text{V/m}$.

Osjetljivost je pojedinih vrsta prijamnika različita. Tako se osjetljivost dobrih prijamnika za prijem radio-difuzije na srednjem valu kreće između 8 i 15 μV . Kod kvalitetnih profesionalnih prijamnika postignute su na srednjim i visokim frekvencijama osjetljivosti od 0,5 do 5 μV , a za odnos signal/šum bolji od 20 dB. Osjetljivost radio-prijamnika ograničena je ukupnim unutrašnjim šumom. Stoga se osjetljivost obično vezuje za vlastiti šum prijamnika odredbom da standardni nivo mora biti za 10 ili 20 dB iznad vlastitog šuma.

Pri određivanju osjetljivosti postavljaju se najčešće svi promjenjivi elementi na maksimalno pojačanje, a automatska se regulacija pojačanja isključuje. Normirani visokofrekvencijski ulazni signal moduliran je pri amplitudnoj modulaciji sa 600 Hz (ponekad 800 ili 1000 Hz) uz stupanj modulacije od 30%. Pri frekvencijskoj modulaciji visokofrekvencijski ulazni signal je moduliran sa 600 Hz (ponekad 800 ili 1000 Hz) uz devijaciju od 22,5 kHz (tj. 30% od maksimalne devijacije od 75 kHz) za kućne prijamnike, i uz devijaciju od 5,3 kHz (tj. 30% od maksimalne devijacije od 15 kHz) za profesionalne prijamnike.

Selektivnost je sposobnost radio-prijamnika da iz mnogobrojnih u anteni induciranih radio-signala različitih frekvencija izdvoji samo signal željene frekvencije. Susjedni kanal je prva slijedeća viša ili niža frekvencija na kojoj može raditi drugi odašiljač. U kolikoj mjeri će prijamnik moći odvojiti signal sa susjednog kanala ovisi o selektivnosti prijamnika, kao i o snazi signala na susjednom kanalu.

Pojam selektivnosti radio-prijamnika može se objasniti pomoću ukupnog pojačanja prijamnika. Ako se prijemnik podesi na određenu željenu frekvenciju f_1 i na ulaz prijamnika dovede signal iste frekvencije f_1 , ukupno pojačanje prijamnika bit će A_1 . Promjenom frekvencije ulaznog signala na frekvenciju f_2 , a da se pri tome ne mijenja ništa na prijamniku, smanjit će se pojačanje na iznos A_2 . Ako se na ulaz prijamnika dovedu dva

signala jednake amplitude, i to jedan frekvencije f_z na koju je prijemnik ugođen i drugi frekvencije f_1 , pojavit će se na njegovom izlazu, osim signala željene frekvencije f_z , i nepoželjni signal frekvencije f_1 , iako malo oslabljen. Radi komparacije krivulja selektivnosti različitih prijamnika najčešće se upotrebljava normalizirana krivulja selektivnosti, pri čemu je $A/A_{\text{ž}}$ kvocijent gušenja na određenoj frekvenciji /prema željenoj frekvenciji f_z na koju je podešen prijemnik. $2\Delta f_{0,7}$ predstavlja propusnu širinu pri kojoj je gušenje $A/A_{\text{ž}} = 0,707$ ili 3dB. Za kvalitetne se prijamnike daje krivulja selektivnosti u obliku grafikona ili se propusna širina definira pri 3, 6, 20, 40 i 60 dB.

Na početku razvoja radio-prijemne tehnike selektivnost prijemnika nije bila od prvorazrednog značenja jer je broj odašiljačkih radio-stanica bio relativno malen, a razmaci između njihovih radnih frekvencija bili su veliki. Međutim, zbog stalnog povećavanja broja radio-odašiljačkih stanica, selektivnost postaje najvažniji faktor u ocjeni kvaliteta prijamnika. Zahtjev za većom ili manjom selektivnošću nije kod svih vrsta prijamnika jednak. Na područjima niskih i srednjih radio-frekvencija, koje su međunarodnim ugovorom raspoređene i gdje se predajne stanice na frekvencijskoj skali nalaze na udaljenosti jedne od druge po 9 kHz, zahtjevi za selektivnošću prijemnika su nešto manji nego na području visokih frekvencija, gdje je broj radio-predajnih stanica daleko veći, a osim toga korisnici u mnogim slučajevima proizvoljno biraju radnu frekvenciju.

Veći dio kvalitetnih prijamnika, naročito za visokofrekvencijsko područje, ima mogućnost stepeničaste ili kontinuirane promjene selektivnosti. S većom selektivnošću pada dakako vjernost reprodukcije informacije. Stoga je potreban kompromis između selektivnosti i vjernosti reprodukcije, što u praksi od slučaja do slučaja rješava manipulant izborom najprikladnije selektivnosti.

Frekvencijska stabilnost radio-prijamnika. Do nedavna je frekvencijska stabilnost radio-prijamnika bila od sekundarnog značenja. Poslužilac je, naime, podešavajući stalno prijemnik na optimalni prijem, ispravljao eventualne promjene frekvencije predajnika i oscilatora vlastitog prijamnika. Primjenom visokofrekvencijskih radio-veza za rad s teleprinterom, frekvencijska stabilnost postaje važna.

Naročito je važna frekvencijska stabilnost prijamnika u slučaju rada naslijepo, tj. kad se bez prethodnog uspostavljanja veze između predajnika i prijamnika vrši emisija na unaprijed dogovorenoj frekvenciji. Frekvencijska stabilnost prijamnika jako je važna i pri vrsti rada A3J, tj. pri jednobočnom prijenosu amplitudno moduliranog vala s potisnutim valom nosiocem.

Frekvencijska stabilnost prijamnika ovisi prije svega o stabilnosti njegovog lokalnog oscilatora. Klasični lokalni oscilator s promjenjivom frekvencijom može u najboljem slučaju imati frekvencijsku stabilnost od $\pm 10^{-5}$, tj. $\pm 0,001\%$ nazivne frekvencije. On će npr. pri frekvenciji 20 MHz varirati do ± 200 Hz. Povećana stabilnost frekvencije prijemnika postiže se i pomoću automatske regulacije frekvencije. U novije se vrijeme ovaj problem rješava primjenom sintezatora.

Točnost postavljanja. U klasičnim se prijamnicima bira željena frekvencija okretanjem promjenljivog kondenzatora. U tom slučaju točnost postavljanja ovisi o mehaničkoj preciznosti pogonskog prenosa koji spaja okretljivi kondenzator lokalnog oscilatora s kazaljkom na frekvencijskoj skali prijamnika, nadalje o točnosti baždarenja lokalnog

oscilatora prema podjeli na frekvencijskoj skali prijamnika i o točnosti očitavanja položaja na skali. Ukupna točnost postavljanja prijamnika na unaprijed određenu frekvenciju relativno je mala. Greška je sve veća na sve višim frekvencijama, jer obično na višim frekvencijama ista skala obuhvaća šire frekvencijsko područje, pa prema tome na jedan odjeljak skale dolazi veći pojas frekvencija. Na visokofrekvencijskom području ova greška iznosi čak i kod kvalitetnih prijamnika $5 \cdots 10$ kHz.

Radi povećanja točnosti postavljanja na određenu frekvenciju ugrađuje se ponekad u prijemnik poseban kvarcni oscilator za baždarenje, npr. osnovne frekvencije 100 kHz. Viši harmonici tog oscilatora iskorištavaju se za iznalaženje točnog položaja na skali za dvije bliske frekvencije koje ležu u blizini ispred i iza željene frekvencije, npr. 2,4 MHz i 2,5 MHz. Određena frekvencija između tih točaka utvrđuje se pomoću interpolacije ili u prijemnik ugrađenog frekvencijskog povećala, tj. uređajem kojim se uski pojas frekvencije može rastegnuti preko neke veće skale.

Znatno povećanje točnosti postavljanja postiže se s prijamnicima koji rade samo na određenim fiksnim kanalima i imaju kvarcni lokalni oscilator. Za svaki je kanal u tom slučaju potrebna poseban kristal. Konačno rješenje problema točnosti postavljanja prijamnika na određenu frekvenciju postignuto je primjenom sintezatora ili analizatora frekvencije, koji se danas kao sklopovi ugrađuju u najkvalitetnije prijamnike. Pomoću njih postiže se točnost frekvencije od 10^{-6} do 10^{-9} nazivne frekvencije.

Nepoželjno zračenje. Neki podsklopovi u radio-prijamniku mogu biti izvori zračenja nepoželjnih signala različitih frekvencija. To je zračenje naročito nepogodno ako se u blizini nalaze drugi prijemnici. Kod superheterodinskih prijemnika izvori zračenja mogu biti lokalni oscilator, stupanj za miješanje, gdje se stvaraju nepoželjni harmonici lokalnog oscilatora, posljednji stupanj međufrekvencijskog pojačala, gdje je nivo međufrekventnog signala preko 1 V, i stupanj za demodulaciju, na kojem se stvaraju nepoželjni harmonici međufrekventnog signala. Pojedini podstupnjevi kao izvori nepoželjnih signala mogu zračiti ili direktno, ili preko prijamne antene, ili preko voda za napajanje prijamnika. Pravilnom konstrukcijom, oklapanjem podstupnjeva i pojedinih elemenata, blokiranjem i uzemljenjem, može se znatno smanjiti zračenje prijamnika. Za profesionalne prijamnike koji su predviđeni za rad u prijemnim centrima veze, zračena snaga pojedinih nepoželjnih signala mora biti manja od 400 pW ($400 \cdot 10^{-12}$ W).

Vjernost reprodukcije primljene informacije. U idealnom bi slučaju trebalo da prijemnik na svom izlazu daje niskofrekvencijski signal koji je vjerna reprodukcija niskofrekventnog signala utisnutog u visokofrekvencijski modulirani signal induciran u anteni prijamnika. Međutim, idealna se reprodukcija u praksi ne može realizirati, niti je to potrebno, već se dozvoljavaju veća ili manja izobličenja.

Izobličenja do kojeg dolazi u radio-prijamniku manifestiraju se pri prijenosu govora ili glazbe u slaboj razumljivosti, u promjeni boje zvuka, pojavi stranih zvukova, pojavi šumova i sl. a pri prijenosu telegrafije u deformiranju pojedinih telegrafskih impulsa. Tako se, npr. mijenja duljina impulsa, strmina impulsa, a pojavljuju se i šiljci na početku i na kraju impulsa zbog prelaznih pojava. Sva se ta izobličenja mogu podijeliti na linearna i nelinearna izobličenja.

Linearno izobličenje radio-prijamnika obuhvaća sva linearna izobličenja koja nastupaju u pojedinim njegovim podsklopovima, od prijemne antene pa do uređaja za reprodukciju

informacije. Linearno izobličenje, koje se vidi na frekvencijskoj karakteristici prijmnika, nastupa na nižim frekvencijama prije svega u niskofrekvencijskom dijelu prijmnika. Izobličenja na višim frekvencijama (na desnom dijelu krivulje) posljedica su izobličenja u niskofrekvencijskom i visokofrekvencijskom, a u najvećoj mjeri u međufrekvencijskom dijelu prijmnika.

Nelinearno izobličenje posljedica je stvaranja viših harmonika pojedinih frekvencija koje sadrži primljeni signal. U konkretnom prijmniku ono može biti vrlo različito, jer ovisi o stupnju pojačanja u niskofrekvencijskom pojačalu, o amplitudi moduliranog prijenosnog vala i stupnju visokofrekvencijskog pojačanja (ako prijmnik ima ručnu regulaciju tog pojačanja) i, konačno, o stupnju modulacije. Stoga treba pri određivanju nelinearnih izobličenja prijmnika biti oprezan i po pravilu izvršiti veći broj mjerenja s različitim nivoima visokofrekvencijskog ulaznog signala, s različitim stupnjem modulacije i s različitim stupnjem niskofrekvencijskog pojačanja.

9.3 Superheterodionski prijmnik

Nekada mnogo upotrebljavani tipovi radio-prijmnika kao, npr. audionski prijmnik (prijmnik s pozitivnom povratnom spregom, reakcijski prijmnik), heterodionski prijmnik, super-regenerativni prijmnik i višekružni direktni prijmnik, u kojima se signal pojačavo izravno na svojoj osnovnoj frekvenciji imaju samo još povijesno značenje i danas se upotrebljavaju samo u izuzetnim slučajevima za specijalne namjene. Kod superheterodionskih prijmnika koristi se transpozicija ulazne frekvencije na nižu frekvenciju.

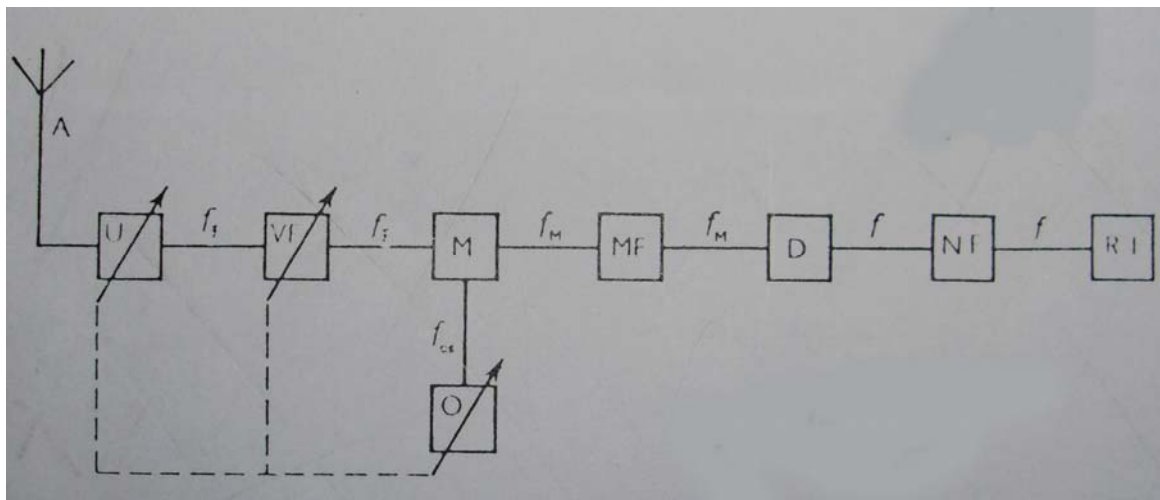
Princip konstrukcije superheterodionskog prijmnika.

Jednostruki superheterodionski prijmnik ima lokalni oscilator, čiji se signal zajedno s ulaznim signalom, dovodi na miješalo i iz kojeg izlazi zbroj ili razlika frekvencija tih dvaju signala. To je međufrekvencija. Međufrekvencija se može pojačavati u međufrekvencijskim pojačalima i na kraju se detektira, čime se dobije NF signal. NF signal se može pojačavati da se dobije potrebna snaga signala u zvučniku, a može se pojačavati i VF signal, kako bi prijmnik bio osjetljiviji. Ova vrsta prijmnika ima dobru selektivnost i osjetljivost, što se lakše izvodi u međufrekvencijskim pojačalima nego u VF pojačalima, jer je međufrekvencija, za razliku od visoke frekvencije stalna. Prijmnik može imati pomoćni oscilator (BFO) za prijam telegrafije ili SSB-signala.

Suvremeni radio-prijmnici građeni su skoro isključivo na principu superheterodina koji će biti opisan pomoću blok sheme na slici 9.2.

Iz antene signal se dovodi na ulazni tjuner U. Pomoću ulaznog sklopa U izdvoji se, više ili manje selektivno, željeni visokofrekvencijski signal frekvencije f_z iz mnogobrojnih u anteni induciranih signala. U visokofrekvencijskom pojačalu VF željeni se signal frekvencije f_z pojačava uz poboljšanje još nedovoljne selektivnosti ulaznog sklopa. Signal željene frekvencije f_z miješa se u stepenu za miješanje M sa signalom frekvencije f_{os} koja se stvara u lokalnom oscilatoru O prijmnika. Kao rezultat miješanja dobiva se međufrekvencijski signal frekvencije f_m , koji sadrži istu informaciju koju je imao željeni signal frekvencije f_z . Međufrekvencijski signal frekvencije f_m pojačava se u

međufrekvencijskom pojačalu MF. Taj sklop najviše pridonosi selektivnosti i pojačanju prijavnika. U demodulatoru D vrši se demodulacija, tj. izdvajanje signala informacije frekvencije f_i iz moduliranog međufrekvencijskog signala frekvencije f_M . Signal informacije frekvencije f_i pojačava se u niskofrekvencijskom pojačalu NF na potrebnu snagu i dovodi u napravu za reprodukciju informacije. To može biti slušalica, zvučnik, magnetofon, teleprinter i sl.



Slika 9.2. Principijelna blok - shema superheterodinskog prijavnika,

Na slici 9.2 prikazani su: A - prijemna antena, U - ulazni sklop, VF - visokofrekvencijsko pojačalo, M - stupanj za miješanje, MF - međufrekvencijsko pojačalo, O - oscilator, D - demodulator, NF - niskofrekvencijsko pojačalo, RI - uređaj za reprodukciju informacije, f_z - frekvencija željenog signala, f_{os} - frekvencija signala lokalnog oscilatora, f_M - frekvencija međufrekvencijskog signala, f - frekvencija informacije

U mnogim se prijavnima upotrebljava dvostruko miješanje radi povećanja osjetljivosti, selektivnosti i frekvencijske stabilnosti. Međutim, principijelna shema prvog i drugog stupnja za miješanje uvijek je ista, tj. na principu superheterodina.

Dvostruki superheterodinski prijavnik. Prijavnik se zove dvostruki zato što posjeduje dvije međufrekvencije. Signal dolazi preko antene na ulaz radijskog uređaja. Tu se nalazi ulazni filter i svrha mu je otkloniti neželjene frekvencije. Primjerice, ako imamo uređaj koji prima signal od 2 do 20 MHz, na ulazu će se prvo nalaziti visoko propusni filter (ulazni filter) koji će blokirati signale koji se nalaze ispod 2 MHz, jer oni nepotrebno opterećuju ulazne krugove pojačala. Tu prije svega mislimo na lokalne radijske LW i MW postaje kojih je podosta ispod 2 MHz.

Spomenimo odmah da širokopojasni prijavnici i scanneri koji posjeduju širok raspon prijema od npr. 100 kHz do 1.3 GHz najčešće na ulazu imaju nekoliko takvih filtera koji su predviđeni za razne frekvencijske opsege i automatski se aktiviraju kada dođemo na određene frekvencije. Naime na uređaj koji ima širok raspon prijema od npr. 100 kHz - 1.3 GHz ne možemo staviti samo jedan filter. Stoga se cijeli frekventni

opseg podijeli na nekoliko dijelova. Npr. prvi filter propušta signale od 100 kHz do 1.5 MHz. Drugi filter propušta od 1.5 MHz do 20 MHz. Treći od 20 MHz do 50 MHz i sl. Kada se nađemo na nekoj frekvenciji, filter se automatski uključuje. Naravno, bilo bi idealno kada bismo imali beskonačan broj takvih filtera, jer tada bi prijemnik imao veliku selektivnost. Nažalost, većina prijemnika ima najviše dva do tri takva filtera.

Karakteristika ovih prijemnika je da ima *dva lokalna oscilatora*, što ujedno znači i *dva mješala i dvije međufrekvencije*. Kod dvostrukoga superheterodinskog prijemnika razlikujemo dvije podvrste.

Jedna podvrsta koju nazivamo «*tjunerski prijemnik*», ima prvi oscilator promjenjive frekvencije (kao kod jednostrukog superheterodina), a frekvencija drugog oscilatora je stalna (jer je stalna i prva međufrekvencija). Na izlazu drugog miješala, dobije se druga međufrekvencija, koja se nakon mogućeg pojačanja detektira.

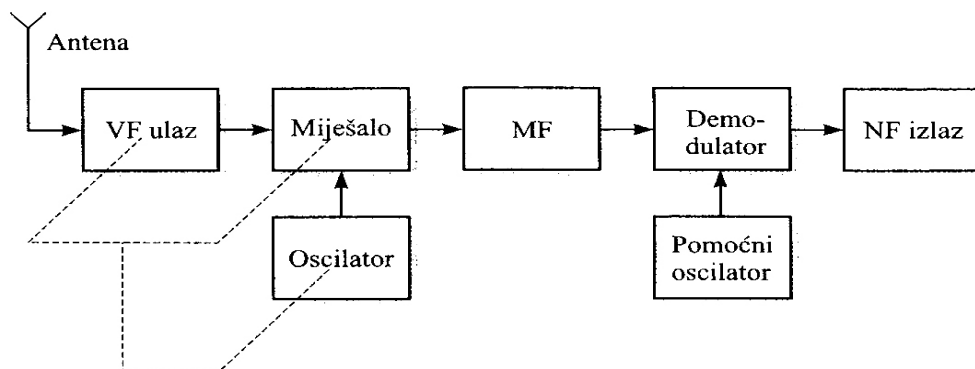
Druga podvrsta dvostrukog superheterodinskog prijemnika se naziva «*konvertorski prijemnik*». Kod njega je frekvencija prvog oscilatora stalna, što će rezultirati promjenjivom prvom međufrekvencijom. Frekvencija drugoga oscilatora je promjenjiva, pa je rezultat nepromjenjiva druga međufrekvencija.

9.4. Elektronički sklopovi prijemnika

9.4.1 Blok sheme

Prijemnik za Morseovu telegrafiju (CW,A1A)

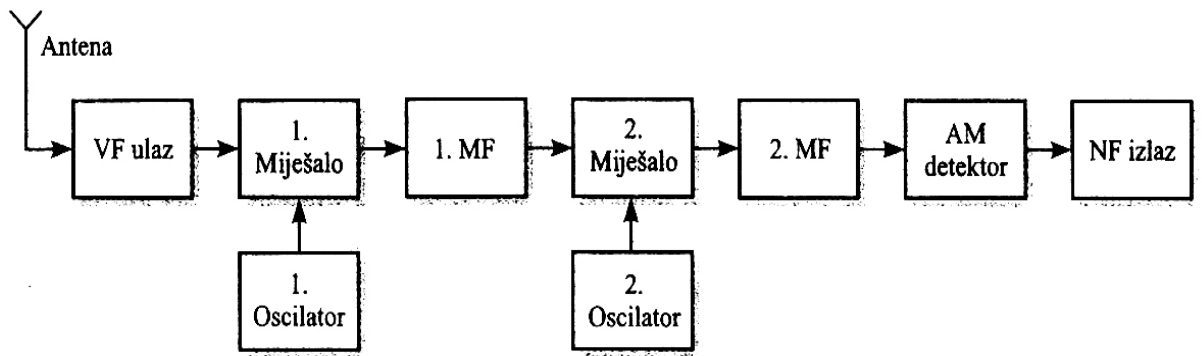
Jednostruki super heterodinski prijemnik za primanje Morseove nedomulirane telegrafije prikazan je na slici 9.3



Slika 9.3. Blok shema jednostrukog superheterodinskog prijemnika

AM prijemnik (A3E)

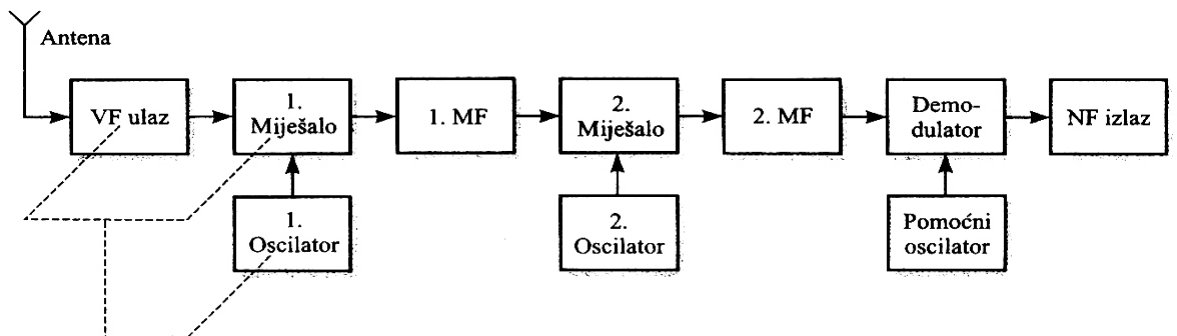
Dvostruki heterodinski prijemnik za prijam amplitudno moduliranog signala (AM) prikazan je na slici 9.4.



Slika 9.4 Blok shema dvostrukog superheterodinskog prijmnika

SSB prijmnik s potisnutim nositeljem (J3E)

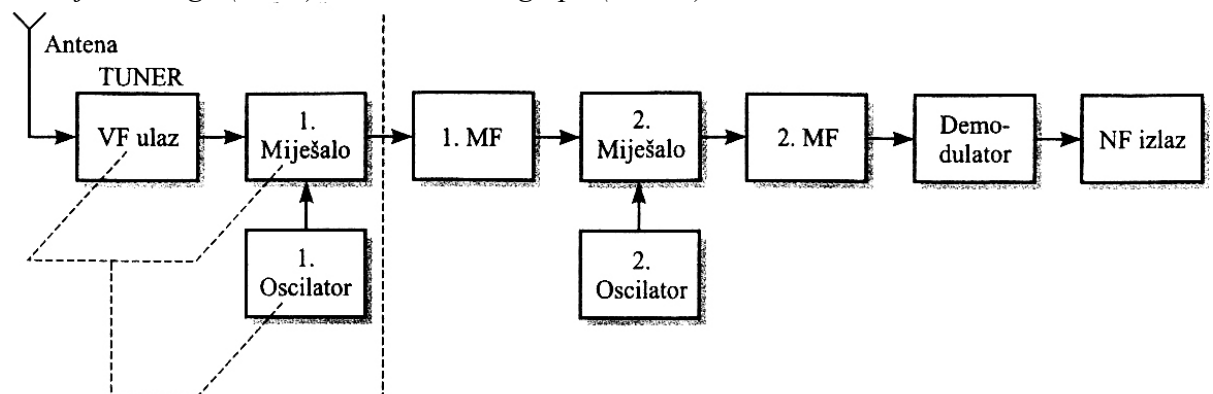
SSB (eng. *Single Side Band-Transmitter Carrier*) tip je amplitudne modulacije kod kojeg se prenose samo jedan bočni pojas signala. Osim po faktoru iskorištenja, ovaj tip modulacije je bolji i po frekvencijskom opsegu, jer za njegov prijenos treba kanal čija je širina jednaka maksimalnoj frekvenciji modulirajućeg signala. Dvostruki superheterodinski prijmnik za prijam SSB- signala prikazane na slici 9.5.



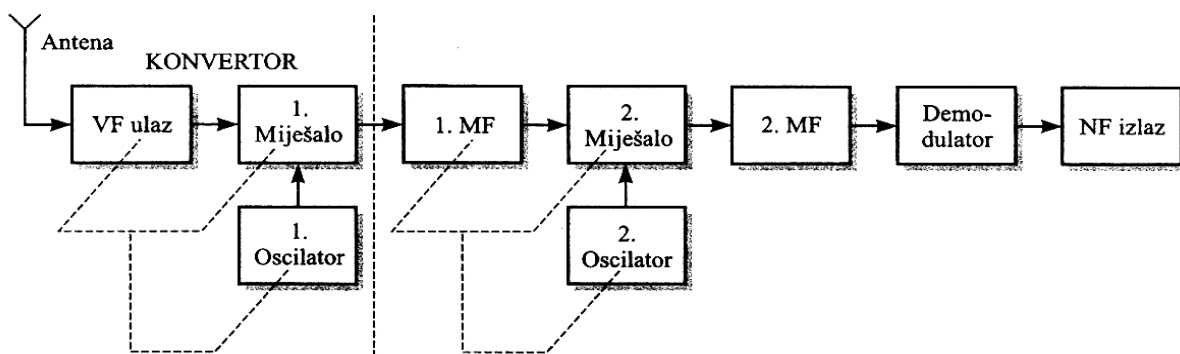
Slika 9.5. Blok shema dvostrukoga superheterodinskog prijmnika za prijam SSB- signala

FM prijmnik (F3E)

Analogna frekvencijska modulacija se koristi za prijenos analognog radija u frekvencijskom pojasu ultrakratkog vala (88–108 MHz), te za prijenos zvuka kod analogne televizije. Na blok dijagramima su prikazani dvostruki superheterodinski prijmnici *tjunerskoga* (sl.9.6), i *konvertorskog tipa* (sl. 9.7.).



Slika 9.6 Blok shema dvostrukog superheterodinskog tjunerskog prijmnika za prijam FM-signalna



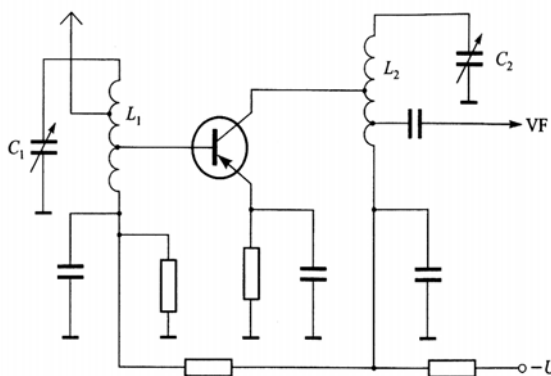
Slika 9.7. Blok shema dvostrukog superheterodinskog prijmnika za prijam FM-signala

Blok dijagram prijmnika je isti bez obzira za koju je vrstu prijama građen. Razlike su samo u vrsti demodulatora i oscilatorskim sklopovima u VF dijelu, s tim da CW i SSB prijmnik još imaju pomoćni oscilator. To znači da i prijmnik za CW isto može biti dvostruki superheterodin (što je najčešće i slučaj).

9.4.2. Način rada pojedinih stupnjeva

Pojačalo visoke frekvencije (VF) ili radiofrekvencije (RF)

Pojačalo visoke frekvencije nalazi se na ulazu u prijmnik. Zadatak pojačala je pojačanje VF signala. VF pojačalo može imati jedan ili više stupnjeva pojačanja. Na ulazu i na izlazu pojačala visoke frekvencije nalaze se titrajni krugovi koji su promjenjivi, kako bi se pojačalo ugodilo na željenu frekvenciju. Pomoću VF pojačala se postiže bolja osjetljivost prijmnika, ali i bolja selektivnost i manja opasnost od prodiranja u prijmnik zrcalnih frekvencija i drugih neželjenih signala. Na slici 9.8. je VF pojačalo s tranzistorom. Dobra izvedba VF pojačala posebno prvog stupnja od velike je važnosti za ukupan odnos signal/šum.



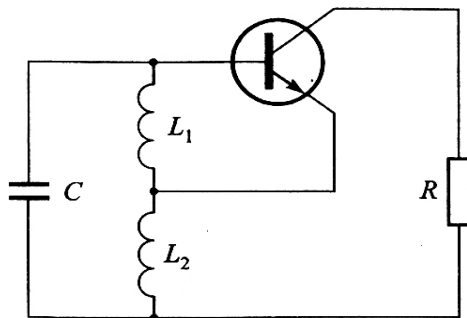
Slika 9.8. Shema ulaznog VF pojačala

Oscilator

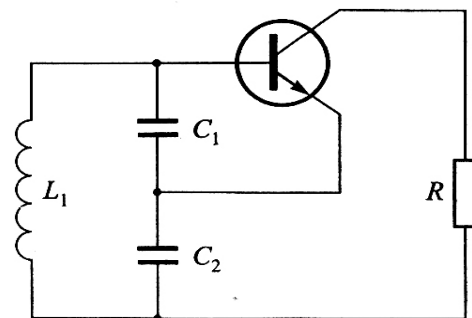
Oscilator je sklop pomoću kojega se stvaraju neprigušene električne oscilacije. Princip rada je takav da se stvori jaka pozitivna povratna veza (dio signala vraća se s izlaza na ulaz i oba signala su iste faze). Ako nam je potreban oscilator čiju frekvenciju

možemo mijenjati, u titrajnom krugu je potrebno ugraditi promjenjivi kondenzator ili induktivitet pomoću kojih mijenjamo vrijednost kapaciteta kondenzatora ili induktivnost zavojnice. Ako je oscilator stalne frekvencije, ni kondenzator ni zavojnica nisu promjenjivi. Kod stalnih oscilatora često se rabi piezoelektrični kristal ("kvarc"), radi veće stabilnosti frekvencije. Za potrebe ugađanja titrajnih krugova, izrađuju se kondenzatori promjenjivog kapaciteta, jer se uz nepromjenjiv induktivitet promjenom kapaciteta mijenja se rezonantna frekvencija titrajnog kruga. Ovi kondenzatori mogu biti namijenjeni učestalom podešavanju (na primjer, za promjenu prijamne frekvencije u radioprijamniku) ili za jednokratno podešavanje rezonantne frekvencije titrajnog kruga – tada ih nazivamo polupromjenjivi ili trimer-kondenzatori.

Na slici 9.9. je prikazan Hartleyjev oscilator a na slici 9.10. Colpittsov oscilator.



Slika 9.9. Hartleyjev oscilator



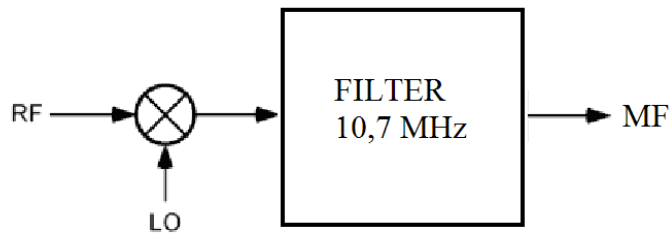
Slika 9.10. Colpittsov oscilator

Oscilator je sklop u prijamniku najodgovorniji za stabilnost prijama signala. Frekvencija osciliranja oscilatora mora biti vrlo stabilna. Zbog toga elementi u krugu oscilatora moraju biti dobro mehanički učvršćeni, kako oscilator, a time i prijamnik, ne bi bio osjetljiv na mehaničke vibracije i udarce, tj. da pri tome ni jedan od elemenata ne mijenja svoju vrijednost. Promjena frekvencije zbog promjene temperature sprječava se tako, da se elementi sklopa (zavojnice i kondenzatori) udalje od izvora topline, te uporabom elemenata sa što manje temperaturnim koeficijentom (keramika, tinjac). Naponi napajanja oscilatora se stabiliziraju, kako nebi došlo do promjene frekvencije pri promjeni napona. Kod oscilatora upravljanih kristalom, kristalu se može održavati temperatura pomoću termostata kako bi se smanjio utjecaj promjene temperature okoline.

Miješalo

Miješalo tj. mixer jest uređaj koji obavlja funkciju transpozicije frekvencije. Sastoji se od nelinearnog elementa (npr. reaktancija, bipolarni tranzistor, nelinearni otpornik ili dioda s negativnim otporom) na kojemu se dovodi radiofrekvencijski signal (RF) iz antene i signal lokalnog oscilatora (LO). U miješalu se stvaraju frekvencije zbroja i razlike dovedenih signala, kako bi se između većeg broja novostvorenih frekvencijskih komponenata filtriranjem izdvojila ona željena. U heterodinskim prijemnicima frekvencija izlaznog signala iz miješala naziva se i međufrekvencija (MF), a predstavlja razliku između frekvencije LO signala i frekvencije RF. Iza miješala se postavlja filter koji je podešen na međufrekvenciju. Ako npr. kod radio uređaja filter iza miješala propušta frekvenciju 10.7 MHz širinom npr. 15 kHz - tada kažemo da je međufrekvencija tog uređaja 10.7 MHz. Pa ćemo u skladu sa time izračunati koliku frekvenciju moramo

podesiti na lokalnom oscilatoru kako bismo uhvatili željenu stanicu i transponirali ju na 10.7 MHz. Blok shema miješala i filtera u radio uređaju prikazana je na slici 9.11.



Slika 9.11. Blok shema miješala i filtera u radio uređaju

Filteri

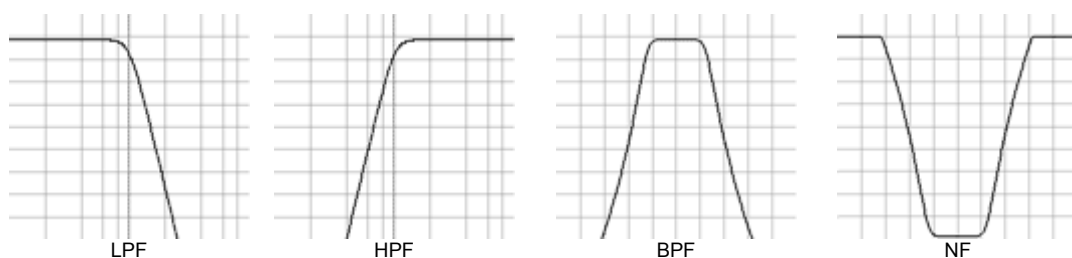
Prema vrsti filtriranja razlikujemo četiri vrste filtera.

Prvi jest *nisko propusni filter*, na engleskom jeziku poznatiji kao *low pass filter*, ili skraćeno *LPF*. Kao što ime kaže, zadatak mu je da propušta samo niske frekvencije, a blokira visoke.

Druga vrsta jest *visoko propusni filter*. U engleskom jeziku naziva se *high pass filter* - *HPF*. Visoko propusni filter propušta samo visoke frekvencije, a blokira niske.

Treća vrsta filtera jest ona koja se najčešće upotrebljava u radio uređajima, a to je *pojasno propusni filter*, na engleskom jeziku zvan *band pass filter* - *BPF*. Zadatak mu je propustiti samo frekvencije koje se nalaze unutar omeđenog pojasa, a blokirati sve ostale. Možemo ga zamisliti i kao kombinaciju prva dva filtera.

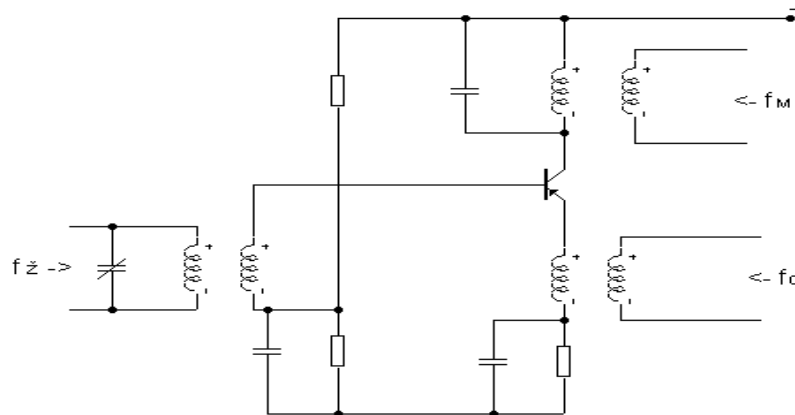
Četvrta vrsta filtera jest *pojasno zaporni filter*, u engleskom jeziku znan kao *notch filter* tj. *NF*. On funkcionira tako da blokira samo frekvencije omeđene pojansom, a sve ostale propušta. U radio uređaju ima primjenu u audio dijelu gdje otklanja neželjene uskopojasne smetnje od primjerice vala nosioca (carriera) susjedne postaje. Slika 9.12. pokazuje nam frekvencijski odziv svakog od navedenih filtera.



Slika 9.12. Frekvencijski odziv filtera

Međufrekvencijsko pojačalo

Međufrekvencijom zovemo signal koji se dobije na izlazu iz miješala. Taj se signal može dalje pojačavati u međufrekvencijskim pojačalima. Na izlazu svakoga stupnja međufrekvencijskoga pojačala se nalazi titrajni krug, koji treba potisnuti sve signale izvan željenog opsega. Međufrekvencijsko pojačalo ima najveći utjecaj na selektivnost prijammnika, ali i na osjetljivost. Po izgledu shema međufrekvencijskog pojačala nalik je VF pojačalu na ulazu prijammnika, no kako je međufrekvencija najčešće stalna, i titrajni krugovi imaju stalne vrijednosti. Na taj način se lakše dobije željena selektivnost. Na slici 9.13. prikazana je električna shema međufrekvencijskog pojačala.



Slika 9.13. Električna shema međufrekvencijskog pojačala

Ograničivač

Ponekad nam može biti potrebno ograničiti neki signal da ne prelazi određenu vrijednost. Tada je potrebno koristiti sklop pod nazivom *ograničivač* (engl. *limiter*).

Najjednostavnije, takav sklop se može izvesti pomoću para dioda ili tranzistorom. Ovako dobiveni signal bit će dosta izobličen (to nam ponekad može biti cilj, kako bismo dobili signale slične pravokutnima). Ako želimo dobiti neizobličen, signal neograničene amplitude, sklop mora biti složeniji, s povratnom vezom koja će smanjivati pojačanje ukupnoga sklopa čim signal na izlazu sklopa prijeđe određenu vrijednost.

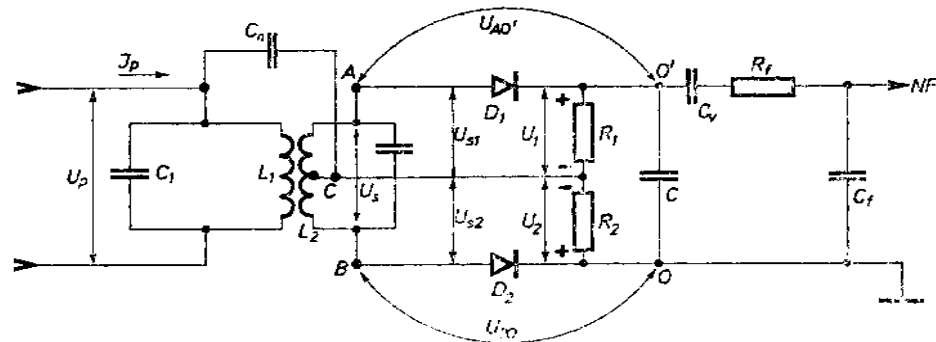
Detektor

Na ulazu u prijammnik imamo modulirani signal. To je VF signal koji se (ovisno o vrsti modulacije), mijenja u ovisnost o NF signala. Kod amplitudno moduliranog signala mijenja se amplituda VF signala u ritmu modulacije, a kod frekvencijske modulacije se mijenja frekvencija. Sklop kojim iz moduliranog signala možemo dobiti NF signal naziva se *detektor*.

Najjednostavniji detektor je za AM i sastoji se od diode koja odeže negativne (ili pozitivne) poluperiode moduliranog signala, a na kondenzatoru koji slijedi iza diode napon će se mijenjati u ritmu NF signala.

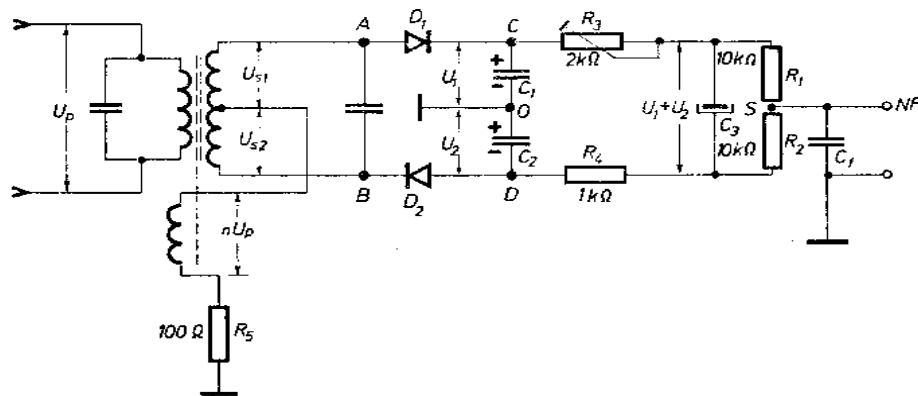
FM sklop za detekciju obično nazivamo *demodulator*. Za prijam frekvencijski moduliranog signala rabe se najčešće dvije vrste demodulatora. Jedna poznata vrsta

demodulatora naziva se *diskriminator*. Na slici 9.14 prikazana je električna shema faznog diskriminatora.



Slika 9.14. Fazni diskriminator

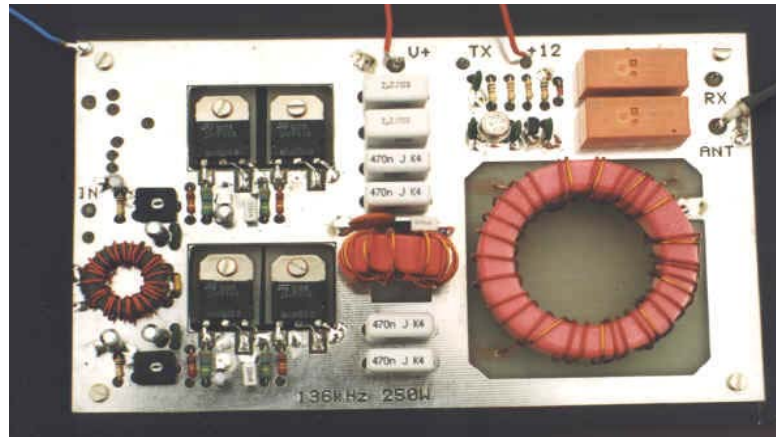
Druga poznata vrsta demodulatora naziva se *ratio-detektor*, i prikazan je na slici 9.15.



Slika 9.15. Ratio-detektor

Pojačalo niskih (NF) ili audiofrekvencija (AF)

Pojačalo niskih frekvencija služi da se izdvojeni NF signal iz moduliranog signala dovoljno pojača kako bi se mogao čuti u zvučniku ili u slušalicama. Da se postigne što manje izobličenje signala predpojačala rade u klasi A. Ponekad se kao posljednje pojačalo u nizu rabi protutaktno pojačalo (simetrično pojačalo od kojih jedan dio pojačava pozitivni signal, a drugi negativni), koje radi u klasi AB (Slika 9.16.). Na izlazu posljednjeg stupnja pojačanja možemo imati transformaciju otpora na otpor zvučnika pomoću transformatora za prilagodbu.



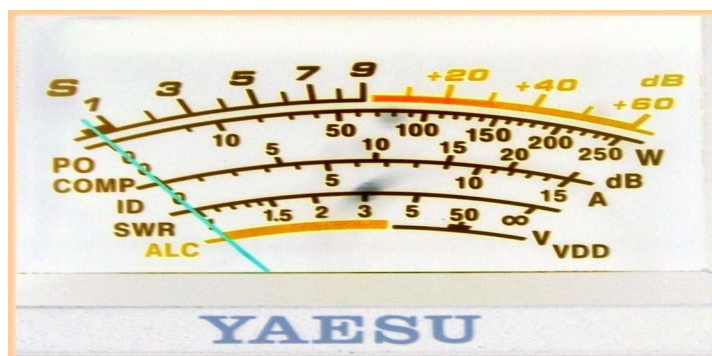
Slika 9.16. Pojačalo niskih frekvencija

Sklop za automatsko upravljanje pojačanjem (AGC)

Ako sklopu za pojačanje možemo automatski mijenjati radnu točku te na taj način utjecati na pojačanje sklopa, govorimo o automatskom upravljanju pojačanjem. Radna točka pojačala se automatski mijenja ako u katodnom ili emitterskom krugu postavimo RC-krug. Napon na kondenzatoru će pratiti razinu ulaznog signala i na taj način utjecati na ukupno pojačanje pojačala. U prijammniku možemo uzeti dio napona s nekog stupnja za pojačanje, ispraviti ga diodom, filtrirati kondenzatorom da se dobije istosmjerni napon, i tim naponom upravljati ukupnim pojačanjem. Sklop za AGC je nužan u prijemnicima jer poništava utjecaj promjenjive snage prijemnog signala na reprodukciju NF signala.

S-mjerilo

Za indikaciju jakosti prijamnog signala u prijammniku može biti ugrađeno S-mjerilo. To je pokazni instrument koji se ugrađuje u jedan od stupnjeva pojačanja. Izgled instrumenta prikazan je na slici 9.17. Demodularni signal iz detektora koji upotrebljava posebnu diodu kao ispravljač se posebno filtrira i pogoni instrument. Pokazivanje instrumenta nije linearno i skala je označena S jedinicama od 0 do 9, a ostatak od 0 do 40 dB u plusu. Jedna S jedinica odgovara 6 dB. Instrument treba očitavati kada je ručna regulacija pojačanja postavljena na najveću osjetljivost prijammnika. Instrument je samoindikator i može služiti za usporedbu signala u prijammniku.



Slika 2.19. S-mjerilo

Ograničivač šuma – squelch sklop

Ograničivači šuma posebni su sklopovi koji se upotrebljavaju u prijammnicima za frekvencijski modularni signal. Sklop za prigušivanje šuma nazivamo *squelch-krugom* (eng. Suelch, zdrobiti, poraziti).

Naime, bez signala je prisutan šum, koji u prijamu pri slušanju djeluje neugodno. Kod dolaska VF signala u kanalu se potiskuje šum i NF signal se pojačava u pojačalu. Razinu pri kojoj će se pojaviti NF signal na izlazu pojačala, postavljamo u squelch-krugu.

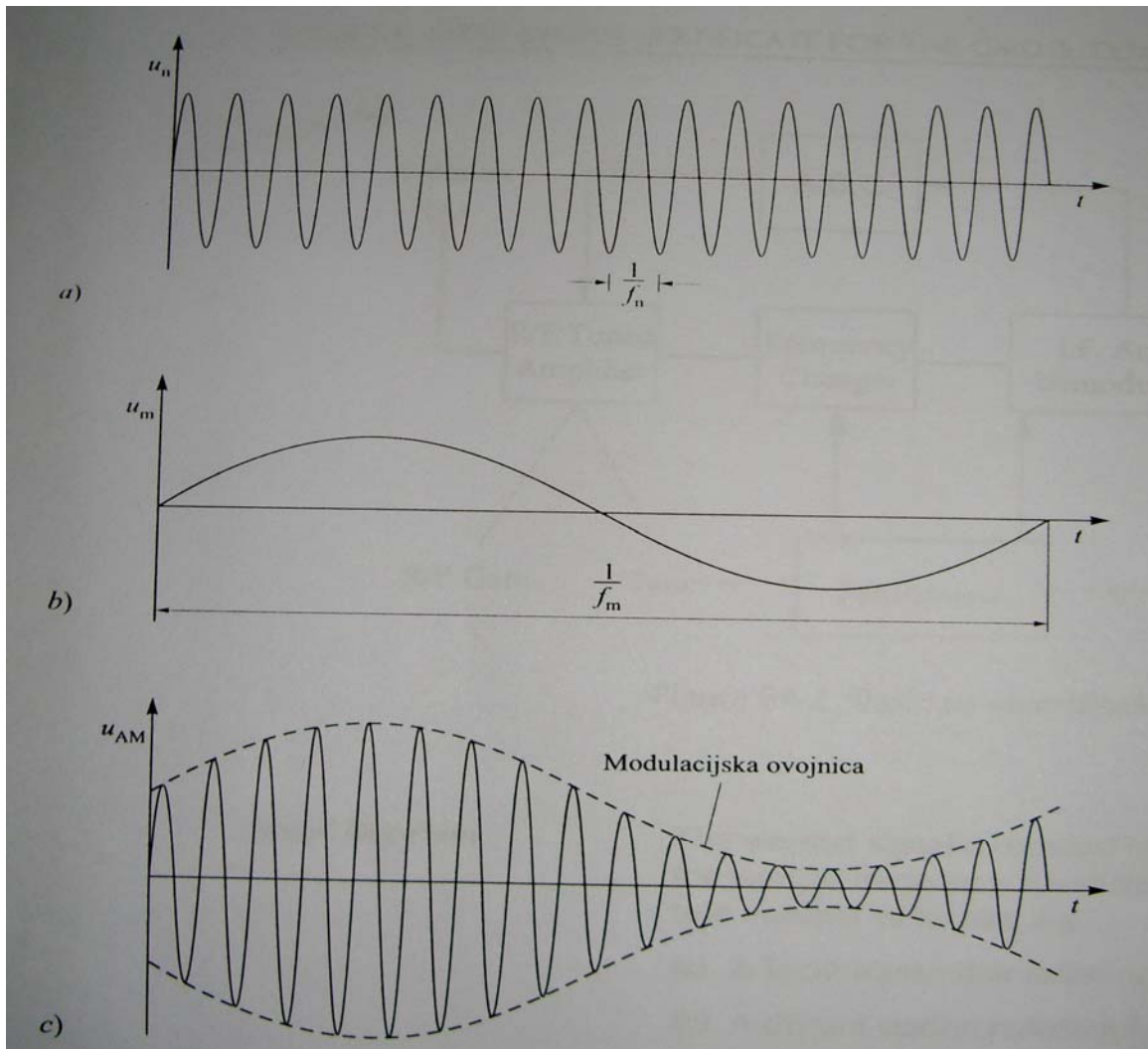
10. MODULACIJA

Modulacija je oblikovanje visokofrekvencijskih (VF) oscilacija vala nositelja u odašiljaču s pomoću niskofrekvencijskih (NF) oscilacija informacije kao što su govor, glazba, podaci.... Utiskivanje informacije u vidu NF oscilacija u VF oscilacije vala nosioca izvodi se dakle postupkom modulacije tj. oblikovanjem jednog od parametara vala nosioca: amplitude, frekvencije ili faze, na takav način da se u prijammniku prenošena informacija može lako otkriti i postupkom obratnim od modulacije – tkz. demodulacijom izdvojiti i reproducirati u obliku pogodnom za slušni – audio ili vidni – video prijam.

Osnovni parametri svake periodično promjenjive veličine koja se sinusoidno mijenja su amplituda, frekvencija i faza. Vrste modulacije se često označuju kraticama njihovih naziva: AM (amplitudna modulacija), FM (frekvencijska modulacija), PM (fazna modulacija), itd.

10.1 Amplitudna modulacija – AM

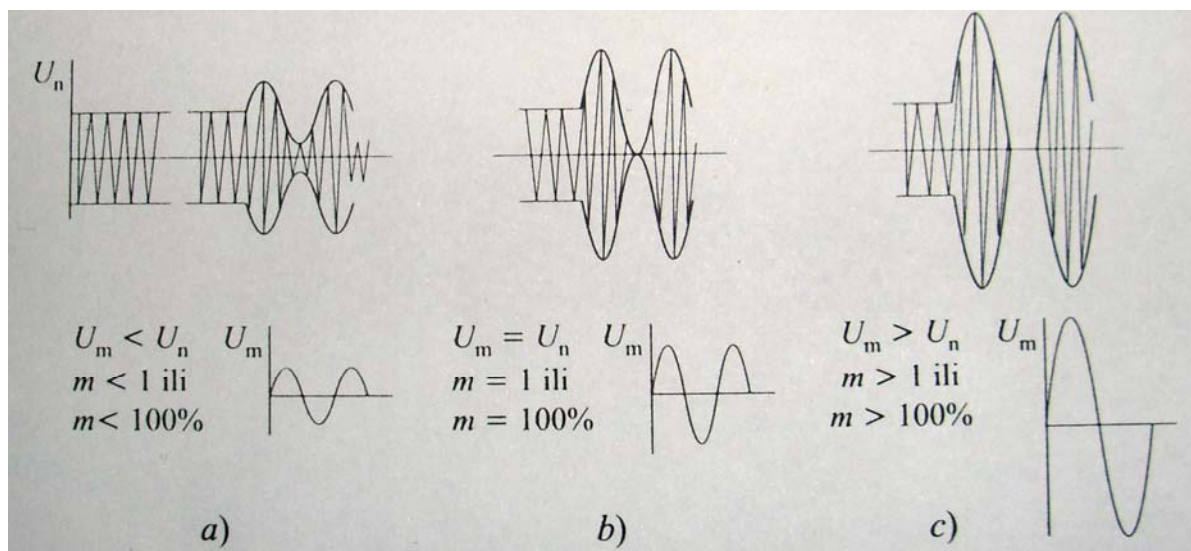
Na slici 10.1 pojednostavljeno je prikazan modulacijski postupak amplitudne modulacije ili modulacije amplitude vala nosioca.



Slika 10.1 Amplitudna modulacija (AM)

- a) visokofrekvencijske oscilacije (VF) vala nositelja stalne amplitude koja se modulira,
 b) niskofrekvencijske oscilacije (NF), frekvencijska slika informacije koja se prenosi ili modulacijski signal s frekvencijom f_m .
 c) visokofrekvencijske oscilacije kojima se amplituda mijenja u ritmu NF oscilacija – modulirani signal koji se odašilje
 Oznake: u_n – trenutna vrijednost napona nositelja, f_n – frekvencija nositelja, u_m – trenutna vrijednost napona modulacijskog signala

Na slici 10.2 prikazani su različiti slučajevi AM modulacije gdje se val nositelj modulira različitim amplitudama NF signala, a) s $m = 80\text{...}90\%$, što je najčešći slučaj, zatim b) mogući slučaj s $m = 100\%$, i na kraju c) slučaj s $m > 100\%$, koji treba svakako izbjegavati, jer prekid frekvencije nositelja unosi izobličenja i uvođenje harmonika modulacijskih frekvencija koje se zrače kao neželjene sporedne emisije. Ovakav prijenos, s $m > 100\%$, zauzima znatno širi frekvencijski pojas nego što je potrebno, te izaziva smetnje u susjedne prijarnike što je svakako nepoželjna situacija.



Slika 10.2. Primjeri AM – modulacije s različitim dubinama, m

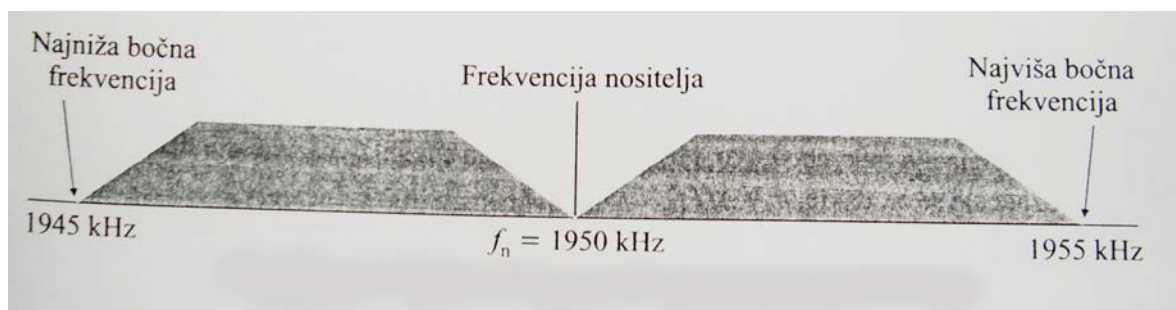
Kao proizvod modulacijskog postupka nastaju frekvencije iznad frekvencije nositelja i ispod nje koje nazivamo *bočne frekvencije*, a pojaseve *bočnih frekvencija bočnim pojasi*.

Primjer :

frekvencija nositelja	$f_n = 1950 \text{ kHz}$
modulacijska frekvencija	$f_m = 5 \text{ kHz}$
najviša bočna frekvencija	$f_n + f_m = 1955 \text{ kHz}$
najniža bočna frekvencija	$f_n - f_m = 1945 \text{ kHz}$

Zauzeta širina frekvencijskog pojasa: $(f_n + f_m) - (f_n - f_m) = 2 f_m = 2 \times 5 \text{ kHz} = 10 \text{ kHz}$.
 Donji bočni pojas je od $f_n = 1950 \text{ kHz}$ do $f_n - f_m = (1950 - 5) \text{ kHz} = 1945 \text{ kHz}$, a gornji bočni pojas od $f_n = 1950 \text{ kHz}$ do $f_n + f_m = (1950 + 5) \text{ kHz} = 1955 \text{ kHz}$.

Raspodjela frekvencija prikazana je na slici 10.3



Slika 10.3 Frekvencijski spektar s frekvencijom nositelja i bočnim pojasi

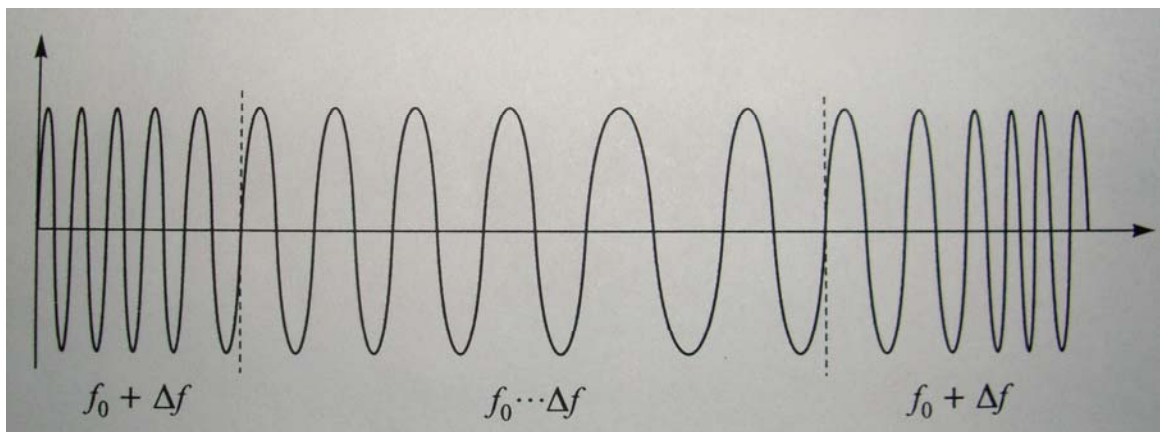
Amplitudno modulirani signal može se prenositi s *jednim bočnim pojasom* (engl. *Single Side Band, SSB*) ili s *dva bočna pojasa* (engl. *Double Side Band, DSB*).

S obzirom da i gornji donji bočni pojas sadrži istu informaciju, često je moguće prenositi signal samo jednog bočnog pojasa bez vala nosioca. Frekvencija nositelja ne sadrži informaciju koja se prenosi, pa se može i bez njega, a i donji i gornji bočni pojas sadrže potpunu informaciju, pa je dovoljno prenositi samo jedan bočni pojas. SSB (single side band) modulacijski postupak, pored drugih prednosti štedi frekvencijski spektar.

10.2. Frekvencijska FM i fazna PM modulacija

Frekvencijska modulacija je modulacija kod koje se frekvencija nositelja mijenja se u skladu s amplitudom modulacijskog signala. Ta je promjena frekvencije pozitivna i negativna s obzirom na središnju frekvenciju nositelja f_0 , jednaku frekvenciji nemonuliranog odašiljača.

Na slici 10.4 vidi se porast frekvencije lijevo od središnje f_0 za $f_0 + \Delta f$, a desno smanjenje za Δf , dakle $f_0 - \Delta f$.

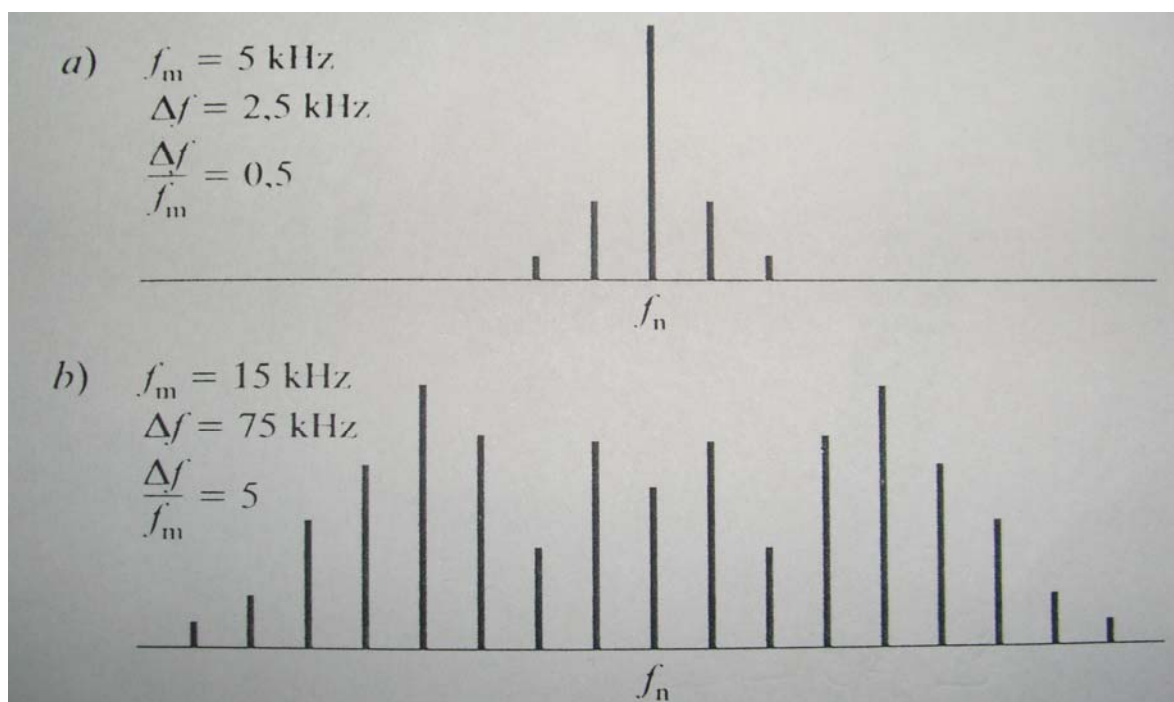


Slika 10.4 Frekvencijska modulacija

Promjena frekvencije f_0 kod frekvencijske modulacije, iznosom Δf , s pozitivnim i negativnim predznakom naziva se devijacija frekvencije. Vrijednost devijacije je normirana za pojedine vrste odašiljača s obzirom na njihovu namjenu. Tako je za najkvalitetniji audio prijenos FM – stereo gdje se prenosi cijeli audio spektar 40 Hz do 15 kHz, devijacija jednaka $\Delta f = \pm 75$ kHz, dok je kod mobilnih radijskih postaja s frekvencijskom modulacijom za prijenos užeg frekvencijskog spektra (samo govor) $\Delta f = \pm 2,5$ kHz.

Omjer devijacije frekvencije, Δf , i modulacijske frekvencije f_m , naziva se *indeksom modulacije* i označuje se m , gdje je $m = \Delta f / f_m$.

Način na koji indeks modulacije utječe na potrebnu širinu frekvencijskog pojasa vidljivo je na slici 10.5.



Slika 10.5. Širina frekvencijskog pojasa ovisi o indeksu modulacije

Slika 10,5 prikazuje kako širina potrebnog frekvencijskog pojasa ovisi o indeksu modulacije. Prikaz nije crtan u mjerilu, tako da je u stvarnosti širina zauzetog frekvencijskog pojasa u b) mnogo puta veća od onog u a).

I frekvencijska i fazna modulacija djeluju na argument sinusa, pa su one međusobno povezane. Pri frekvencijskoj modulaciji, frekvencija, tj. derivacija argumenta, proporcionalna je modulacijskom signalu, a pri faznoj modulaciji fazni pomak je proporcionalan modulacijskom signalu. To znači da se frekvencijski modulirani nosilac može ostvariti i tako da se integral modulacijskog signala fazno modulira. Analogno, fazno modulirani nosilac može se ostvariti frekvencijskom modulacijom derivacije moduliranog signala. Prvi je postupak vrlo čest, jer se kao frekvencijski moduliran nosilac može upotrijebiti vrlo stabilan generator nosioca.

10.3. Impulsne modulacije

Umjesto kontinuiranim, dakle neprekidnim nizom harmoničkih titraja, analogni se signali mogu prenositi digitalno - slijedom impulsa, uz uvjet da im se mijenja jedna od karakterističnih veličina. Za prijenos *digitalnih signala koji imaju samo dva stanja* (logička jedinica i nula) mogu se upotrijebiti promjene amplitude, frekvencije i faze nosioca ili njihove kombinacije.

Tada postoje sljedeće mogućnosti:

- *promjena amplitude impulsa proporcionalna modulacijskom signalu* (engl. Pulse Amplitude Modulation, PAM),
- *promjena trajanja impulsa proporcionalna modulacijskom signalu* (engl. Pulse Duration Modulation, PDM),
- *promjena pomaka impulsa od referentnog položaja u vremenu proporcionalna modulacijskom signalu* (engl. Pulse Position Modulation, PPM),
- *nadomještanje trenutne vrijednosti analognog signala kombinacijom impulsa i stanke, uz uvjet da je u svakoj kombinaciji zbroj impulsa i stanke stalan* (engl. Pulse Code Modulation, PCM).

Postoje sljedeće mogućnosti:

- *kvantizirana promjena amplitude u ritmu digitalnog signala* (engl. Amplitude Shift Keying, ASK),
- *kvantizirana promjena frekvencije u ritmu digitalnog signala* (engl. Frequency Shift Keying, FSK),
- *kvantizirana promjena faze u ritmu digitalnog signala* (engl. Phase Shift Keying, PSK),
- *istodobna promjena i amplitude i faze, također u ritmu digitalnog signala* (engl. Amplitude Phase Keying, APK). Te vrste modulacija mogu imati više kvantiziranih vrijednosti amplitude, frekvencije ili faze. Broj je kvantiziranih vrijednosti redovito cjelobrojna potencija broja dva. Tako npr. 8 PSK znači faznu modulaciju s osam kvantiziranih faznih stanja, a moguće su samo faze koje su višekratnici od 45° . Oznaka BPSK (engl. Binary Phase Shift Keying) istoznačnica je za modulaciju 2 PSK, QPSK (engl. Quaternary Phase Shift Keying) istoznačnica je za 4 PSK, a MPSK je oznaka za PSK sa M faznih stanja.

Osim navedenih modulacijskih postupaka postoji i niz podvrsta koje se izvode iz glavnih modulacijskih postupaka.

U posljednje su se vrijeme pojavili sustavi s proširenim spektrom koji zauzimaju mnogo širi frekvencijski pojas nego što je to potrebno za prijenos samog modulacijskog signala. *Očuvanje tajnosti prenijete poruke i smanjenje smetnja glavni su razlozi za uvođenje takvih modulacijskih sustava.* Oni se primjenjuju samo za digitalne signale.

Tri su osnovna takva sustava. U prvom se nosilac modulira digitalnom kodnom sekvencijom kojoj je brzina mnogo veća od brzine digitalnoga modulacijskog signala (*DS, Direct Sequence*), u drugom se frekvencija vala nosioca mijenja u diskretnim skokovima koji se upravljaju kodnom sekvencijom (*FH, Frequency Hopping*) a u trećem se val nosilac uključuje ili isključuje u ritmu kodne sekvencije (*TH, Time Hopping*). Postoje i hibridni sustavi u kojima se istodobno upotrebljavaju dvije od spomenute tri mogućnosti djelovanja na val nosilac. Najčešće su kombinacije FH/DS, TH/FH i TH/DS.

Nosilac generiran na spomenuta tri osnovna ili na neki od hibridnih načina služi u odašiljačima s proširenim spektrom kao nosilac koji se modulira na bilo koji od prethodno spomenutih klasičnih načina modulacije. Kao primjer navodi se sustav FH-2PSK. Modulacijskim se signalom, koji je u digitalnom obliku, modulira val nosilac tako da

logičkoj jedinici odgovara faza 0° , a logičkoj nuli faza 180° . Istodobno se frekvencija vala nosioca mijenja u skokovima. Brzina tog skakanja kao i redosljed frekvencija na koje se prebacuje val nosilac upravljana je jednom kodnom sekvencijom. Jasno je da su sustavi za takvu modulaciju složeni, a poseban je problem sinkroniziranje odašiljača i prijarnika.

10.4. Način označavanja vrste modulacija

Vrsta radioemisije označava se sa tri simbola: slovo, broj i slovo.

Slovo na prvom mjestu označava vrstu modulacije vala nositelja:

- A - amplitudna modulacija s oba bočna pojasa i punim valom nositeljem;
- H - amplitudna modulacija s jednim bočnim pojasom i punim valom nositeljem;
- R - amplitudna modulacija s jednim bočnim pojasom i smanjenim ili promjenjivim valom nositeljem;
- J - amplitudna modulacija s jednim bočnim pojasom i potupno potisnutim valom nositeljem;
- B - amplitudna modulacija s dva međusobno neovisna bočna pojasa sa smanjenim valom nositeljem;
- F - frekvencijska modulacija
- G - fazna modulacija

Brojka na drugom mjestu predstavlja prirodu modulacije signala vala nositelja:

- 1 – jedan kanal koji sadržava kvantiziranu radiotelegrafsku ili digitalnu informaciju, npr. Prijenos podataka, a ne koristi se moduliranim pomoćnim nositeljem;
- 2 – jedan jedini kanal koji sadržava kvantiziranu ili digitalnu informaciju, a koristi se moduliran pomoćnim nositeljem;
- 3 – jedan jedini kanal koji sadržava analognu informaciju (npr. Govor);
- 7 – dva ili više kanala koji sadržavaju kvantiziranu ili digitalnu informaciju;
- 8 – dva ili više kanala koji sadržavaju analogne informacije.

Slovo na trećem mjestu označava vrstu informacije:

- A – radiotelegrafiju za prijem na sluh;
- B – radiotelegrafiju za automatsku predaju i prijem (npr. Teleprinterska);
- C – faksimil;
- D – prijenos podataka, telemetrija, telekomanda;
- E – telefonija i radiodifuzija;
- F – televizija.

10.4.1. Primjeri označavanja radioemisije

Radiotelefonija

- J3E - SSB s ukinutim valom nositeljem;
- H3E - SSB s punim valom nositeljem (dozvoljeno samo na 2182 kHz);
- F3E - frekventno modulirano;
- G3E - fazno modulirano;

R3E - SSB sa smanjenim valom nositeljem;
A3E - dva bočna pojasa (DSB).

Radioteleks i DSC

F1B - frekvencijski modulirana telegrafija za automatski prijem;
J2B - radiotelex sa jednim bočnim pojasom;
G2B - fazna modulacija. Jedan jedini kanal koji sadrži kvantiziranu ili digitalnu informaciju, sa moduliranim pomoćnim valom nositeljem.

10.4.2. Stare oznake za označavanje radioemisije

SSB - Single Side Band – samo jedan bočni pojas;
RTTY - RadioTeleTaYpe (NBDP) – radioteleprinter;
CW - Morzeova telegrafija;
RTF - RadioTeleFon;
TLX - TeLeX;
RTG - RadioTeleGrafija (Morze);
TOR - telex preko radia.

Morze telegrafija

A1A - nemodulirani nositelj – ručno odašiljanje;
A2A - modulirani nositelj sa dva bočna pojasa – ručno odašiljanje.

Na kojem frekvencijskom pojasu radi brodska postaja označava se u «Dozvoli za radijsku postaju na plovilu» sa:

Radiotelegrafski pojas

Radiotelegrafski pojas

W = 110 – 150 kHz

T = 1605 – 4000 kHz

X = 415 – 535 kHz

U = 4000 – 27500 kHz

Y = 1605 – 3800 kHz

V = 156 – 174 MHz

Z = 4000 – 27510 kHz

S = frekvencijski satelitski
pojas za pomorstvo

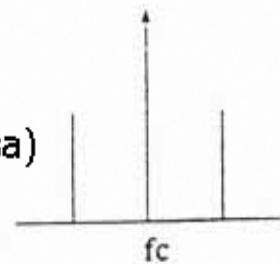
10.4.3 Grafički prikaz spektra moduliranih signala za razne vrste radioemisija

Na slijedećoj stranici su prikazani frekvencijski spektri različitih vrsta modulacija.

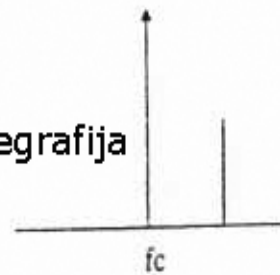
A1A Nemodulirana Morze telegrafija



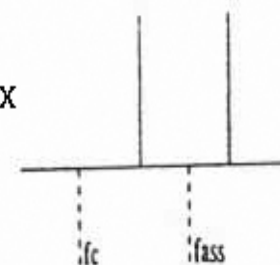
A2A Modulirana Morze telegrafija
DSB (prijenos oba bočna pojasa)



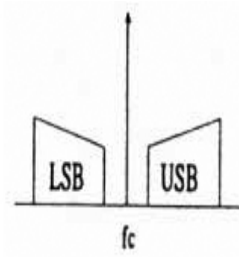
H2A SSB modulirana Morzeova telegrafija



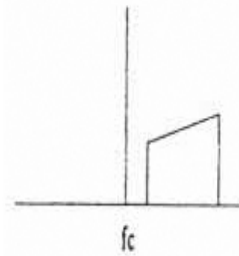
J2B SSB radiotelex



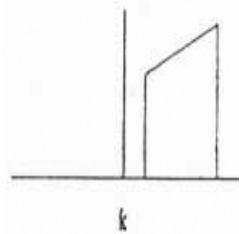
A3E DSB telefonija



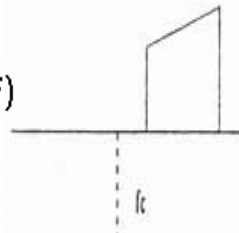
H3E SSB pun nositelj telefonije (2182kHz)



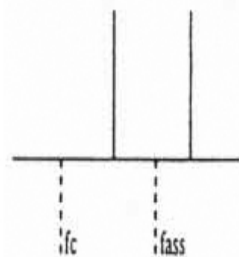
R3E SSB smanjene nositelj telefonija



J3E SSB potisnuti nositelj telefonija (MF i HF)



F1B/G2B SSB radiotelex



Legenda: f_c - noseća frekvencija , f_{ass} - dodjeljena frekvencija

10.5 Modulacije koje se koriste u pomorstvu

U pomorskom kontekstu informacije koje se prenose su uglavnom govor ili podaci. Modulirane informacija na valu nosiocu javlja se kao dodatne frekvencije koje se nalaze oko frekvencije vala nosioca (bočni pojasevi).

Najjednostavnija forma komunikacije je Morzeova abeceda, slana uključanjem i isključenjem nosioca u sekvencama točaka i crtica. Ovaj tip prijenosa je znan kao model emisija A1A (nemodulirana Morzeova telegrafija) kod koje ne postoje dodatni bočni pojasevi. Sadržaj informacije se određuje čisto kao slušanje razmaka koji šalje odašiljač. Iako je ovaj način vrlo učinkovit posebice u smislu daljine penesene informacije sa relativno malom snagom odašiljača, količina informacija koje mogu biti poslana su relativno male (20 do 25 riječi na minutu je dobra komercijalna razina za brodove koji koriste radiotelegrafiju) – spor prijenos podataka. Morzeov kod može također biti poslan koristeći adudio ton, utisnut u val nosioc, npr. modeli emisije A2A i H2A.

Većina komunikacija na MF i HF trenutno koriste tehnike jednobočnog prijenosa za prijenos govora i telexa (SSB). U dvobočnom prijenosu više od dvije trećine snage izlaza prijenosa je sadržana u nosiocu, koji ne sadrži korisnu informaciju. Također, gornji i donji bočni pojas sadrže istu informaciju. Prijenosom gornjeg bočnog pojasa i eliminacijom duplih informacija u donjem bočnom pojasu zajedno s valom nosiocem, učinkovitost prijenosa se uvelike povećava. U stvarnosti, prostor upotrebljen unutar frekvencijskog pojasa je smanjen i tako više stanica može vršiti prijenos. Uža širina pojasa za prenesen signal znači da ima manje šuma i interferencije. Također, snaga odašiljača se iskorištava učinkovitije.

Nakon potpune implementacije GMDSS, sva pomorska MF/HF govorna komunikacija će koristiti J3E model emisije (SSB s potisnutim nosiocem). U sadašnjosti prijenos na 2182 kHz može i dalje koristiti H3E ili R3E modele emisije. Širina pojasa kod J3E emisije govorne komunikacije je 2,8 kHz.

DSB (A3E) prijenos koriste LF/MF/HF stanice za emitiranje sa širinom pojasa od 9-20 kHz, zavisno o lokalnim standardima. Neke stanice za emitiranje znaju ukomponirati korisne informacije o vremenskoj prognozi u svoje emisije.

NBDP/telex prijenos u osnovi šifrirani niz podataka, standardna metoda prijenosa na MF/HF je prenijeti signal telexa kao niza od dva zvučna tona. ITU preporučuje da se pomak frekvencije od 170 Hz na središnjoj frekvenciji od 1700 Hz koristi za slanje «tona točke» ili «razmaka». Točka = 1615 Hz i razmak = 1785 Hz. NBDP/telex se može slati koristeći SSB modulaciju, mod emisije J2B. Zadana frekvencija prijenosa je definirana, u ovom slučaju, kao centar frekvencije između bočnih frekvencija točke i razmaka, npr. 1700 Hz iznad noseće frekvencije.

Tip frekvencijske modulacije (FSK) se može također koristiti za NBDP/telex, i u tom slučaju prenesena frekvencija varira ± 85 Hz oko frekvencije prijenosa. Ovo se opisuje kao model emisije F1B. Zbog toga što su dvije bočne frekvencije 85 Hz iznad i ispod J2B moda zadane frekvencije ili F1B moda zadane/noseće frekvencije, može se vidjeti da mod emisije J2B i mod emisije F1B su u osnovi jednaki prijenosu dva tona NBDP/telex.

Na VHF-u frekvencija modulacija (F3E model) i fazna modulacija (G3E model) se koriste za govor. ITU lista obalnih stanica pokazuje neke VHF kanale kao F3E i neke kao G3E, ali što se tiče operatora, nema razlike s obzirom da promjena u frekvenciji nosača također rezultira u različiti odgovarajućih nosioca faza , kao i obrnuto.

S obzirom na vrstu opreme koja se koristi, također može biti nužno optimizirati <BANDWIDTH> tj. širinu pojasa , da ona odgovara modelu emisije. Mnogi moderni prijammnici postavljaju širinu pojasa automatski u liniju s <MODE> kontrolom. No, ako širina pojasa mora biti postavljena odvojeno onda je potrebno uzeti u obzir da J3E prijenos zahtijeva širinu pojasa od 3 kHz dok NDBP/telex zahtijeva samo 300 Hz. Postavke širine pojasa od 100 Hz su optimalne za prijenos Morzea.

Ako je širina pojasa postavljena preširoko za mod emisije onda će biti prisutno više šuma. Također, više interferencija neželjenih stanica bliskih frekvencija će biti priman problem, bez obzira na smanjivanje kvalitete prijema od željene stanice.

Frekvencijska i fazna modulacija daje bolju kvalitetu prijama od amplitudne modulacije zbog toga što demodulacijski proces može potisnuti slabije interferencijske prijenose kao i varijacije amplitudno vala nosioca, npr. zbog električnih oluja, električnih uređaja i sl. Frekvencija/fazna modulacije generira nekoliko bočnih pojasa iznad i ispod nosioca za svaku modulacijsku frekvenciju, oviseći o dubini modulacije. Isto tako, širina pojasa zauzetog kanala za frekvencijski moduliran prijenos (oko 16 kHz) govora je širi od onog potrebnog za J3E amplitudno-moduliran prijenos (2,8 kHz).

U satelitskim sustavima, nekoliko je složenih analognih i digitalnih modulacijskih metoda koje se koriste, ali pošto su to potpuno automatizirani sustavi, tehnički detalji nisu vidljivi operateru.

11. ANTENE

Antena je uređaj koji pretvara titranje visokofrekventne električne struje generirane u odašiljaču u elektromagnetski val koji se širi u prostor, i obratno, pretvara primljeni elektromagnetski val u titraje električne struje koji se pojačavaju i obrađuju u prijemniku. Antene se dijele na *aktivne ili pasivne* ovisno o tome da li su odašiljačke ili prijemne. Elektromagnetski valovi koje emitira antena predajnika sastoji se od električnog i magnetskog polja koje se kreće kroz prostor i kada dođe na antenu prijemnika, u njoj inducira struju koja se preko pojačala pretvara u pogodan oblik za registriranje.

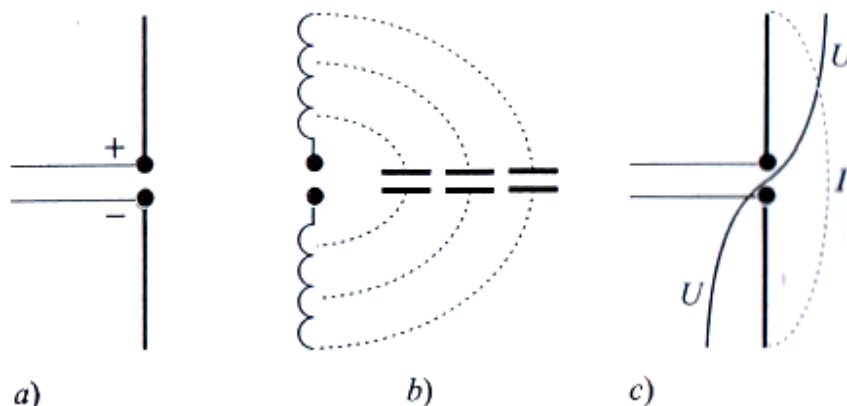
11.1. Općenito o antenama

Antena je otvoreni titrajni krug, za valne duljine veće od nekoliko metara ostvaren najjednostavnije komadom vodiča (žice) postavljene okomito, vodoravno ili pod nekim kutom prema tlu. Titranje izmjenične struje visoke frekvencije u anteni koja se dobiva iz odašiljača izaziva stvaranje električnog i magnetskog polja oko antene. Elektromagnetski val se brzinom svjetlosti širi od antene u okolni prostor. Najefikasnije su antene čija je duljina jednaka cijeloj, polovici ili četvrtini valne duljine elektromagnetskog vala kojeg primaju ili odašiljaju.

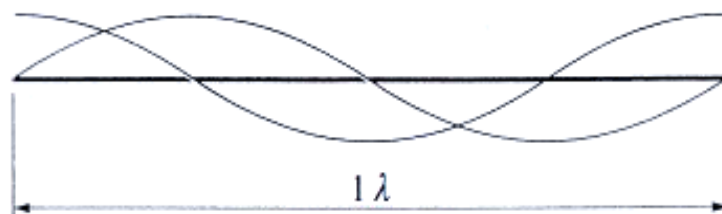
Ovisno o duljini žice, visini iznad tla, položaju i dr., antena ima određeni kapacitet (otvorene ploče kondenzatora), i induktivnost te je na taj način ugođena na određenu frekvenciju signala kojim se napaja radi odašiljanja zračenjem elektromagnetskih valova ili radi prijama takvih valova odašiljanih od prostorno udaljenog odašiljača. Električno polje je u ravnini antene, a magnetsko je okomito na njega. Vertikalna antena isijava vertikalno električno polje i govori se o vertikalno polariziranom valu za razliku od horizontalne antene koja emitira horizontalno polariziran val.

Na slikama 11.1 prikazan je osnovni poluvalni dipol. Na slici 11.1 a) prikazan je Hertzov dipol, na slici 11.1 b) njegova nadomjesna shema, a na slici 11.1 c) prikazana je raspodjela napona i struje na dipolu (trbuh struje i čvor napona). Na slici 11.2 prikazana je punovalna antena te raspodjela struje i napona u anteni čija je cijeljoj valnoj duljini.

U svakoj točki uzduž antene omjer napona i struje daje vrijednost *otpora antene ili točnije impedanciju antene*, jer ovisno o duljini, taj otpor može biti rezistivan (otporan) ili reaktivan (kapacitivan, induktivan). Važno je poznavati vrijednosti ulazne impedancije, tj. impedancije npr. poluvalne antene u točki napajanja. Iz dijagrama na sl. 11.1 c) vidi se da je u središnjoj točki impedancija najmanja, dok je na krajevima antene najveća (impedancija je kvocjent napona i struje).

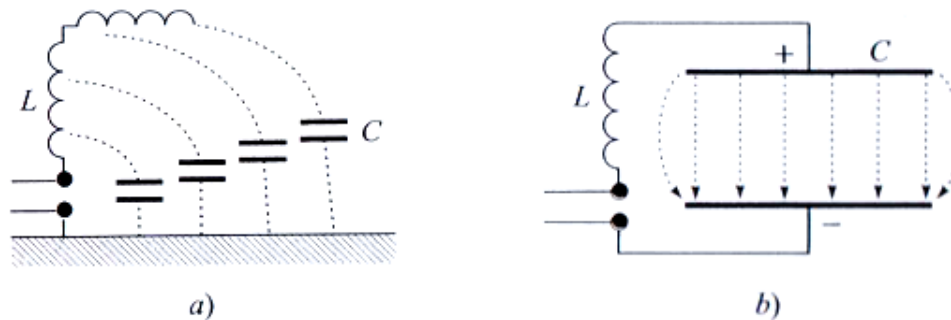


Slika 11.1 Osnovni poluvalni dipol ($\lambda/2$ dipol) : a) Hertzov dipol, b) nadomjesna shema, c) raspodjela napona i struje u anteni



Slika 11.2. Punovalna antena

Postoje i druge vrste antena. Na slici 11.3 a) prikazana je Antena L-oblika s raspodijeljenim induktivitetima i kapacitetima, te na slici 11.3 b) antena L-oblika s koncentriranim L i C elementima.



Slika 11.3. Antena L-oblika: a) s raspodijeljenim induktivitetima i kapacitetima
b) prikaz s koncentriranim L i C elementima

Neki od parametara antene su:

Otpor zračenja R_z neke antene je zamišljeni otpor na kojem se troši zračena snaga. Na vrijednost otpora zračenja utječu mnogi čimbenici : izmjere antene, oblik antene, visina iznad tla, blizina objekata, raslinje i slično.

Gubici u anteni nastaju zbog gubitaka na djelatnom otporu R antene i gubitaka u dielektriku.

Stupanj učinkovitosti μ antene jednak je omjeru otpora zračenja R_z idealne antene i zbroja otpora zračenja realne antene R_{ZR} i djelatnog otpora R realne antene.

$$\mu = \frac{R_z}{R_{ZR} + R}$$

U idealnom slučaju, kada bi djelatni otpor antene bio nula, stupanj učinkovitosti takve antene bio bi ravan jedinici. Da se realna antena približi idealnom slučaju potrebno je da djelatni otpor R bude što manji, pa se antene rade od materijala velike vodljivosti.

Antene koje imaju duljinu jednaku cjelobrojnom umnošku osnovne poluvalne antene pokazuju slične promjene napona i struje poznate kao stojni valovi. Takve antene nazivaju se rezonantske antene.

11.1.1 Duljina antene

Duljina poluvalne antene je jednaka polovici valne duljine za koju je izrađena.

$$l = \frac{150}{f} [MHz]$$

Stvarna duljina antene je nešto manja iz slijedećih razloga

a) zbog izolatora na krajevima antene, kao i blizine objekta i prema njima izraženih kapaciteta krajeva antene (učinak krajeva),

b) zbog omjera promjera žice prema valnoj duljini (deblja žica ima nižu rezonantsku frekvenciju).

Stvarna duljina antene je za 5-7 % manja od električne duljine antene, pa se može izračunati iz prilagođenog izraza:

$$l = \frac{142,5}{f} [MHz]$$

U tablici 1 prikazane su približne duljine poluvalnih dipola

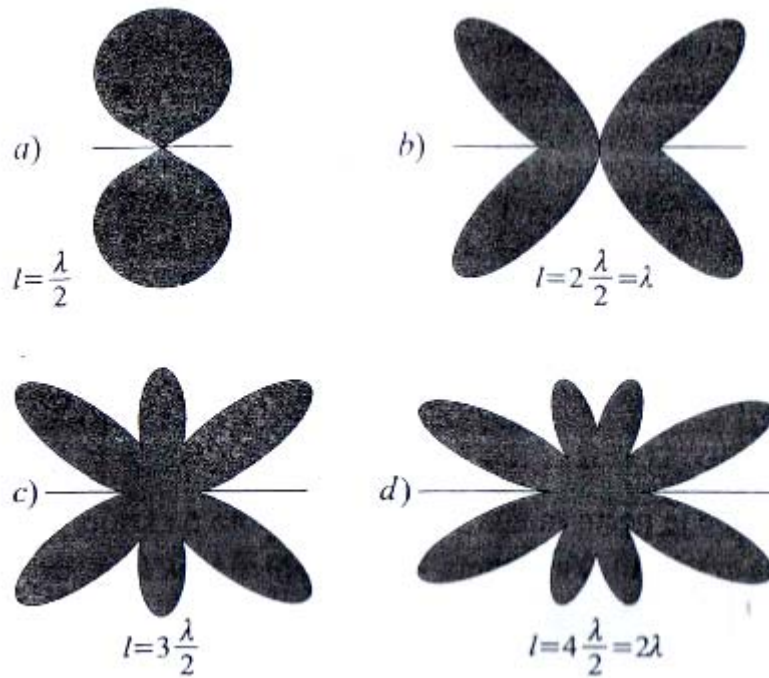
Tablica 1: Približne duljine nekih poluvalnih dipola:

Frekvencije [MHz]	Duljine [m]
1,810... 1,850	79,4
3,500... 3,800	39,2
7,000... 7,100	20,3
10,100... 10,500	14,1
14,000... 14,350	10,05
18,000... 18,160	7,9
21,000... 21,450	6,7
24,89... 24,90	5,70
28,00... 29,70	4,93
50,00... 52,00	2,80
144... 146	0,98
430... 440	0,32

11.1.2. Dijagrami zračenja

Dijagram zračenja antene grafički je prikaz raspodjele zračenja antene u horizontalnoj, vertikalnoj ili nekoj odabranoj ravnini.

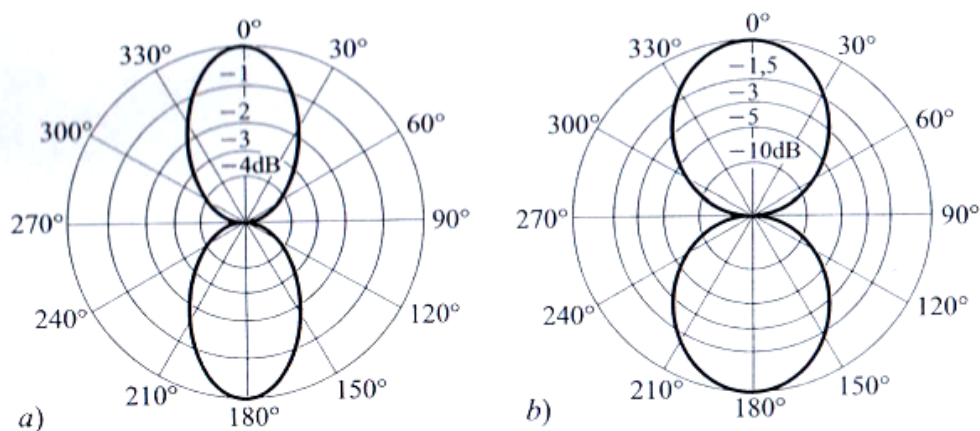
Primjeri dijagrama zračenja idealnih antena koje su paralelne s tlom i najmanje na visini $h = \lambda$ iznad idealno vodljivog tla, dovoljno udaljenima od svih objekata, u slobodnom prostoru, date su na slici 11.4.



Slika 11.4. Dijagrami zračenja rezonantnih antena u horizontalnoj ravnini; a) za poluvalnu antenu, b) za cijelovalnu antenu, c) za tripolovinsku antenu, d) za antenu dvostruke valne duljine

Dijagrame na slici 11.4 valja vidjeti prostorno kao likove zarotirane oko antene kao osi.

Na slici 11.5 dani su primjeri dvaju dijagrama zračenja za poluvalni dipol. Dijagrami su crtani u polarnim koordinatama. U središtu koordinatnog sustava je antena, a jakosti polja njenog zračenja u raznim smjerovima dane su relativnim iznosima prema onoj u smjeru najjačeg zračenja, koja doseže vanjski krug označen kao 0 dB i s azimutom 0° . Iako se dijagrami na slici a) i b) odnose na istu antenu, oni izgledaju različito. Dijagram na sl. 11.5 a) je s mrežom koncentričnih kružnica razmaknutih u linearnom mjerilu snage zračenja, dok su na dijagramu na sl. b) kružnice razmaknute u linearnom mjerilu napona signala. Mjerilo može biti i logaritamsko ili neko drugo, što mijenja oblik dijagrama zračenja.



Slika 11.5. Primjeri dijagrama zračenja za poluvalni dipol

Normirano se crtaju dijagrami zračenja neke antene u horizontalnoj i u vertikalnoj ravnini u polarnome koordinatnom sustavu, mreži koncentričnih kružnica razmaknutih u zadanom mjerilu i polarnih pravaca koji s pravcem najvećega zračenja, uobičajeno na 0° , grade azimutne kutove, npr. 30° , 60° , 90° , 330° , 360° , tako da se u svakome od tih smjerova lako može očitati vrijednost snage zračenja (ili napona signala), u omjeru s onom najvećom referentnom od 0 dB na pravcu s azimutom 0° .

Uz dijagram zračenja neke usmjerene antene daju se i sljedeće karakteristične veličine:

1. *usmjerenost*: svojstvo antene koncentrirati energiju zračenja u jednu ili više glavnih latica;
2. *širina snopa zračenja*: širina u stupnjevima glavne latice između dvaju pravaca na kojima je nanižeta relativna vrijednost zračene snage jednake polovici najveće zračene snage (- 3dB);
3. *omjer naprijed-natrag*: omjer snaga zračenja prema naprijed i prema natrag, npr. omjer naprijed-natrag kod dipola iznosi 1 (tj. 0 dB);
4. *omjer naprijed-bočno*: omjer snage zračenja u smjeru glavnog zračenja u smjeru 0° i snage bočnog zračenja u smjeru 90° ;
5. *dobitak antene*: porast efektivne izračene snage u željenom smjeru glavne latice;
6. *efektivna izračena snaga (e.r.p.)*: umnožak snage privedene antene u odnosu na poluvalni dipol u danome smjeru;
7. *efektivna izotropno izračena snaga (e.i.r.p.)*: umnožak snage privedene anteni i dobitka antene u odnosu na izotropnu antenu (apsolutno izotropni dobitak);
8. *izotropna antena*: idealno zamišljeni točkasti radijator koji zrači u svim smjerovima jednako, tako da je u svakoj točki oplošja kugle, u čijem je središtu tako zamišljena antena, polje jednake jakosti.

Značajke nekih antena

1. Dijagrami zračenja za antene s duljinom $l \leq \lambda/2$ nemaju bočnih latica,
2. Antene koje rade na višim harmonicima s $l = n \lambda/2$, za $n = 2, 3, 4$, imaju bočne laticе, i kako n raste, energija zračenja sve se više koncentrira u bočne, položenije laticе.
3. Kada se antena iz vodoravnog položaja jednim svojim krajem nagne prema tlu, bočne laticе teže u jednu stranu i koncentriraju se prema nižem kraju antene.
4. Kada je poluvalna antena vertikalna, dijagram zračenja je toroidan, pa je zračenje u svim smjerovima, osim okomito, uvis.

11.1.3. Kut zračenja

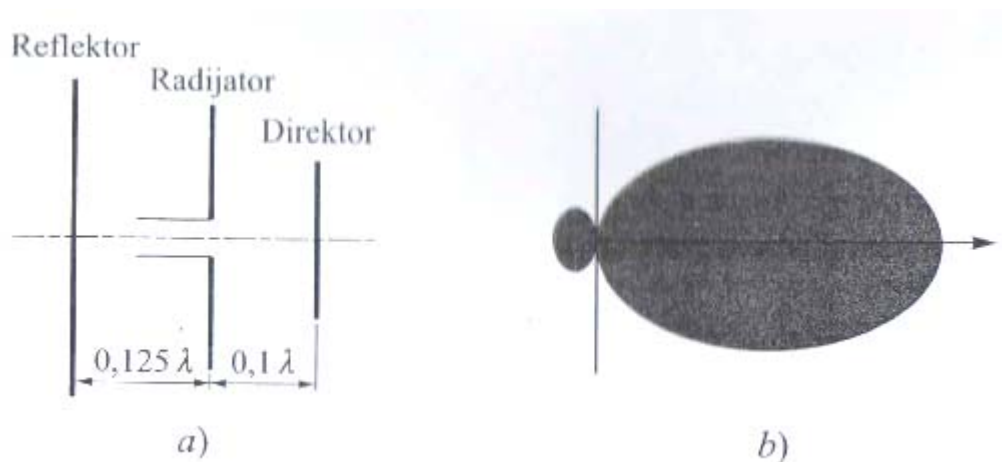
Kut zračenja je kut između pravca najvećeg zračenja i tangente na površinu tla. Vrijednost toga kuta ovisi o međudjelovanju izravne i od tla odbijene zrake, pa je ovisan o visini antene iznad tla i o svojstvima tla. Povećanjem visine antene iznad $h = \lambda/2$ jedna se latica u okomitoj ravnini dijeli u dvije : jednu s većim, a drugu s manjim kutom zračenja. Kad se visina dalje povećava, gornja latica povećava kut i jakost zračenja.

U primjeru višepojasne kratkovalne antene koja je na visini 7-8m, uočljiva je promjena kuta zračenja pri promjeni frekvencijskih pojasa. Tako je pri $f = 3,5$ MHz polovica valne duljine

39,2 m pa je visina antene ispod zahtijevane visine, dok je za $f = 28 \text{ MHz}$, polovica valne duljine 4,92 m, pa je ista antena na povoljnoj visini od 8 m, što je približno valnoj duljini. To znači da je gornja latica s povećanim kutom i većinom zračenja, što odgovara povećanom doseg.

11.1.4. Usmjerenost antene

Često se zahtijeva koncentrirati i usmjeriti zračenje antene u željenom smjeru. U načelu, to se postiže dodavanjem osnovnoj anteni – radijatoru, parazitskih elemenata – reflektora, i direktora. Na sl. 11.6 prikazan je najjednostavnija konstrukcija usmjerene antene, Yagijev niz sastavljen od aktivnog elementa – radijatora s $l = \lambda/2$, jednog reflektora s $l > \lambda/2$ i jednog direktora s $l < \lambda/2$.



Slika 11.6 Usmjereni snop – antena; a) Yagijev niz, b) dijagram zračenja

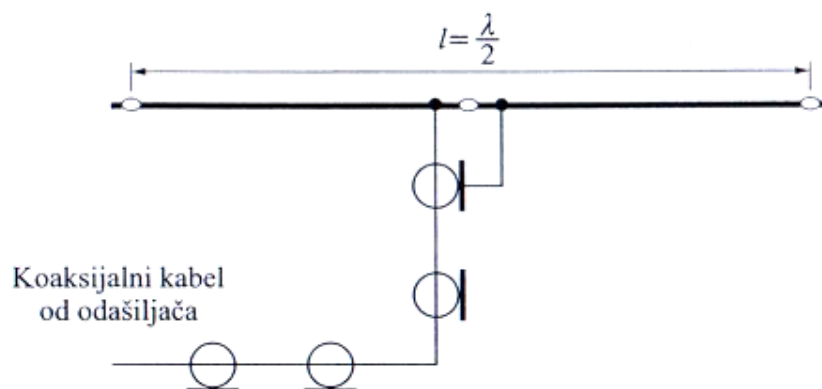
Pri konstrukciji i praktičnoj izvedbi valja voditi računa o izmjerama elemenata Yagijeva niza, o njihovoj duljini, o promjeru, kao i o međurazmacima. Pri tome se pravi kompromis npr. između dobitka i širine frekvencijskog pojasa.

11.2 Primjeri antena

11.2.1. Poluvalni dipol napajan u sredini

Upotrebljava se kao jednopojasna antena za frekvencijski pojas u HF frekvencijskom području (KV), tipično za frekvencijski pojas 7 MHz kao „treća harmonik antena“, jer tada otpor središnje točke iznosi 90Ω što je još prihvatljivo. Na slici 11.7 prikazan je poluvalni dipol.

- izmjere: $l = \frac{142.5}{f} [\text{MHz}]$
- impedancija: u središnjoj točki napajanja djelatni otpor $R = 50 \Omega$ ili 70Ω ;
- dobitak: $G_i = 2.14 \text{ dB}$,
- napojni vod: koaksijalni kabel 50Ω ili 70Ω ;
- impedancijska prilagodba: kada se upotrebljava za više frekvencijskih pojava;
- prilagodba simetrično-nesimetrično: koaksijalni kabel-balun-dipol;

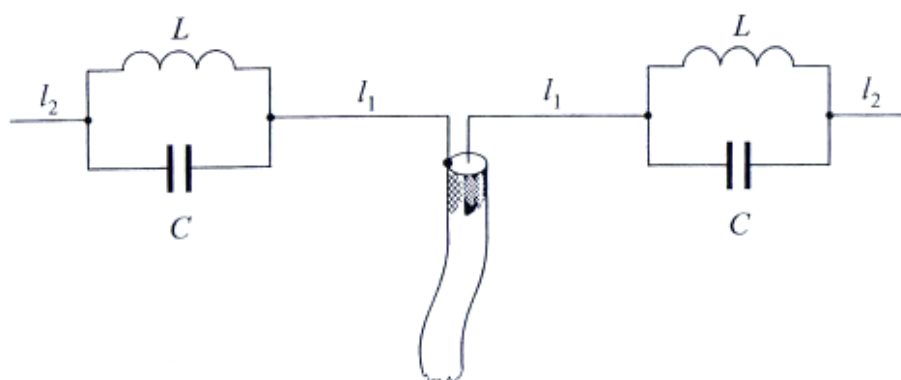


Slika 11.7 Poluvalni dipol

11.2.2. Trap-dipol (W3DZZ-antena)

Postavlja se kao višepojasna antena u KV području. Za rezonantnu frekvenciju 7 MHz trap (paralelni rezonantni krug), predstavlja golem otpor (izolator), pa je to tada poluvalna antena. Pri 3.5 MHz antena se električki produži jer LC nije u rezonanciji, pa je sada ukupna duljina antene $2(l_1 + l_2) = \lambda/2$. za frekvencije 14 MHz, 21 MHz i 28 MHz trap je kapacitivan, antena djeluje kao $3 \lambda/2$, $5 \lambda/2$ i $7 \lambda/2$. Na slici 11.8 prikazan je dipol sa trapovima.

- izmjere: $l_1 = 9.75-10\text{m}$, $l_2 = 6.50-6.70\text{m}$,
- impedancija: na frekvencijama nižim od rezonantne-induktivna, u rezonanciji, $R = 50-75 \Omega$, iznad rezonantske frekvencije impedancija je kapacitivna;
- dobitak: 0dB;
- napojni vod: dvostruki vod (twin-lead) ili koaksijalni kabel;
- trap (prigušnik): LC paralelni titrajni krug ugođen na frekvenciju 7.1MHz;
- prilagodba impedancijska: potrebna.



Slika 11.8. Dipol s trapovima

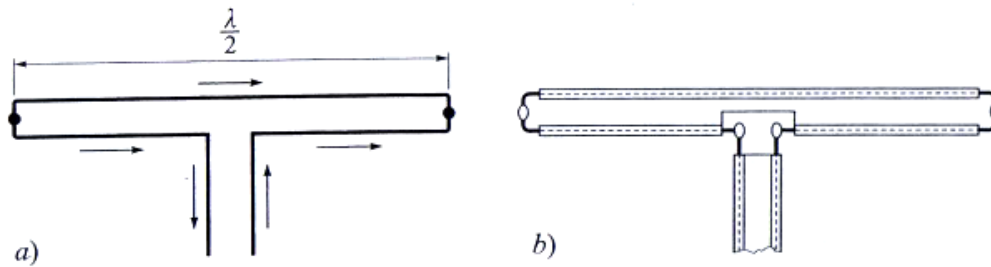
11.2.3 Savijeni dipol

Kada je napojni vod vrlo dugačak ta antena napajana s 300-omskim dvojnim vodom (twin-feederom) ima nešto manje gubitke od koaksijalnog napojnog voda.

- izmjere: $l = \lambda/2$;

- impedancija: $4 \times 75 \Omega = 300 \Omega$;
- napojni vod: dvojni vod (twin lead) 300Ω , bez prilagodbe;
-

Antena možemo napraviti od dvojnog voda, kao što pokazuje slika 11.9



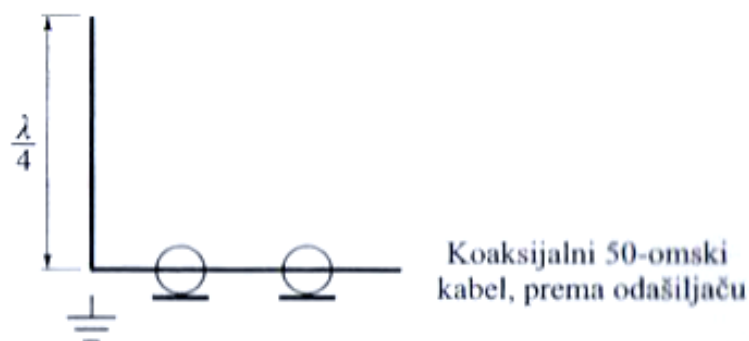
Slika 11.9. Savijeni dipol; a) načinjen od jednostrukoga voda, b) načinjen od dvostrukoga voda

11.2.4. Vertikalna antena

Namjena: jednopojasna antena; može biti i višepojasna s umetanjem trapa (prigušnika).

- izmjere: $l = k \lambda/4$;
- impedancija u napojnoj točki: $\sim 40 \Omega$;
- napojni vod: koaksijalni kabel 50Ω .

Najveću teškoću predstavlja postizanje odgovarajuće vodljivosti tla. Polaganje dviju do triju metalnih cijevi, dugačkih 2 m, međusobno povezanih u samom podnožju vertikalne antene, u tlo pripremljeno dodatkom soli, može smanjiti otpor tla. Dobro vodljivo tlo ispod antene može se stvoriti umjetno postavljanjem veće bakrene ploče. Tada je to tzv. GP antena (engl. ground plane antenna). Utjecaj tla je presudan. Na slici 11.10 prikazana je vertikalna GP antena.

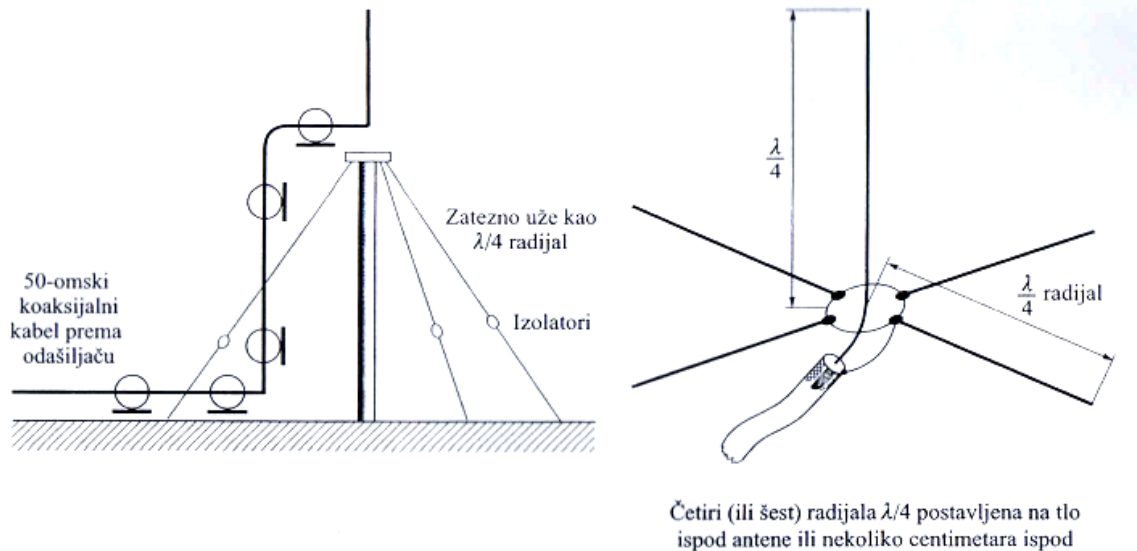


Slika 11.10 Vertikalna GP antena

U pokretnim komunikacijama ova antena na krovu automobila ili broda učinkovita je u VHF području.

11.2.5 GP antenna na stupu

Ima mnogo različitih izvedbi tih antena: sa zavojnicom na donjem kraju, s umetnutim trap-prigušnikom i dr. Savijena vertikalna monopol-antena ima nešto veći otpor u točki napajanja i bolje je prilagođena za napajanje s 50-omskim koaksijalnim kabelom. Djelotvorna je u frekvencijskim pojasevima 1,8 MHz i 3,5 MHz. Na slici 11.11 prikazana je vertikalna GP-antena na stupu.



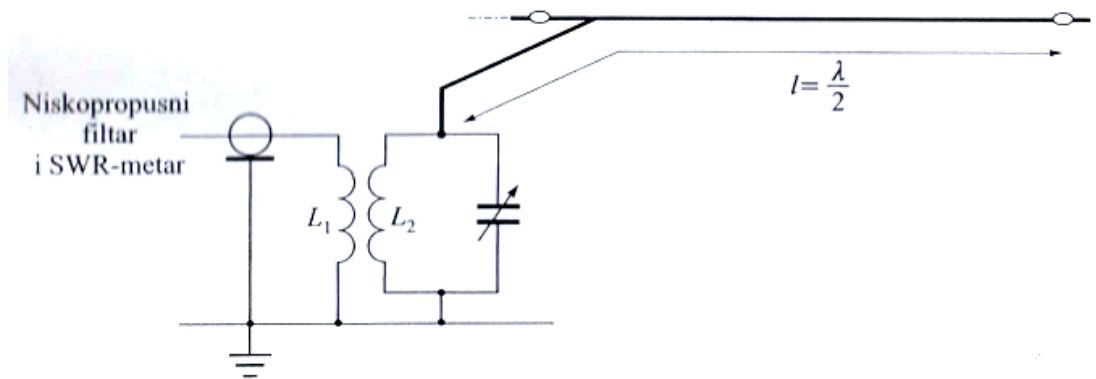
Slika 11.11. GP-antena na stupu (četiri ili šest radijala $\lambda/4$ postavljena su na tlo ispod antene (a) ili nekoliko centimetara ispod tla (b))

Vertikalna, štap ili monopol antena, općenito ima u horizontalnoj ravnini kružni dijagram zračenja, dok su u vertikalnoj ravnini bočne laticice s većim kutom zračenja što je utjecaj tla veći.

11.2.6. Antena s napajanjem na kraju

Koristi se za sve frekvencijske pojaseve u HF području; duljine $l = 40$ m, za 3.5 MHz, 7 MHz, 14 MHz, 21 MHz i 28 MHz, a duljine $l = 80$ m za 1.8 MHz. Na slici 11.12 prikazana je antena napajana na kraju.

- izmjere: $l = k \lambda/2$;
- napojni vod s najviše točke antena se izravno spaja s izlazom odašiljača (niskopropusni filter, SWR-metar).



Slika 11.12. Antena napajana na kraju

11.2.7. Troelementna Yagi snop-antena

Višepojasna HF antena. najniža frekvencija 14 MHz, s radijatorom duljine 10m. Na tržištu postoje trap-prigušnice za 14MHz, 21Mz i 28MHz.

Impedancija u točki napajanja mijenja se pri promjeni frekvencijskog pojasa, ali se dobri rezultati dobiju s 50-omskim koaksijalnim vodom bez prilagodbe.

Dodavanjem parazitskih elemenata (direktora) usmjerenost antene raste, frekvencijski pojas je uži, impedancija u napojnoj točki opada.

S odgovarajućim izmjerama elemenata i njihovim razmacima te se antene izvode kao Yagijev niz za VHF i UHF frekvencijsko područje s dobitkom i do 16dB. Na slici 11.13 prikazana je troelementna snop antena.

- izmjere: $l_{\text{radijator}} = k \lambda/2$, $l_{\text{reflektor}} = l_{\text{radijator}} + (3-5)\%$, $l_{\text{direktor}} - (3-5)\%$;
- impedancija središnje točke: moguće je postići različite vrijednosti od $20 \dots 80 \Omega$ i više;
- napojni vod: moguć je simetrični twin-lead ili asimetrični aksijalni vod s balun-transformatorom ili bez njega.



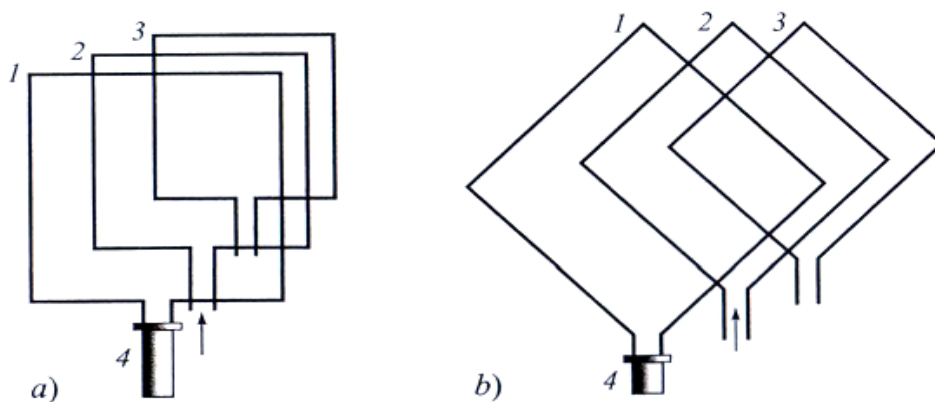
Slika 11.13. Troelementna Yagi snop antena

Kada se uz ravni dipol-radijator dodaju direktor i reflektor, impedancija padne na 20Ω . Kada se umjesto ravnog dipola upotrebi savijeni dipol, impedancija se poveća na $4 \times 20 \Omega = 80 \Omega$.

11.2.8. Kvad-antena W9LZX

Osnovna troelementna kvad-antena (engl. quad-antena, kvadratična antena), s kvadratičnim petljama reflektora 1, radijatora 2 i direktora 3, s dijagonalom petlje a) pod 45° i b) okomitom. Polarizacija je u oba slučaja horizontalna. Za vertikalnu polarizaciju napojna točka bi bila ona pokazana crtkanom strelicom na slikama a) i b).

- izmjere: stranica petlje radijatora svaka s $l = \lambda/4$, stranice reflektora za 3-5 % dulje, a direktora za 3-5 % kraće. Često se upotrebljava takva antena samo s radijatorom i reflektorom;
- napojni vod: za dva elementa (jedan frekvencijski pojas) 75-omski koaksijalni vod, za 3×2 elementa (tri frekvencijska pojasa) 50-omski koaksijalni vod;
- frekvencijski pojasi: u HF području 14 MHz, 21 MHz i 28 MHz.
-



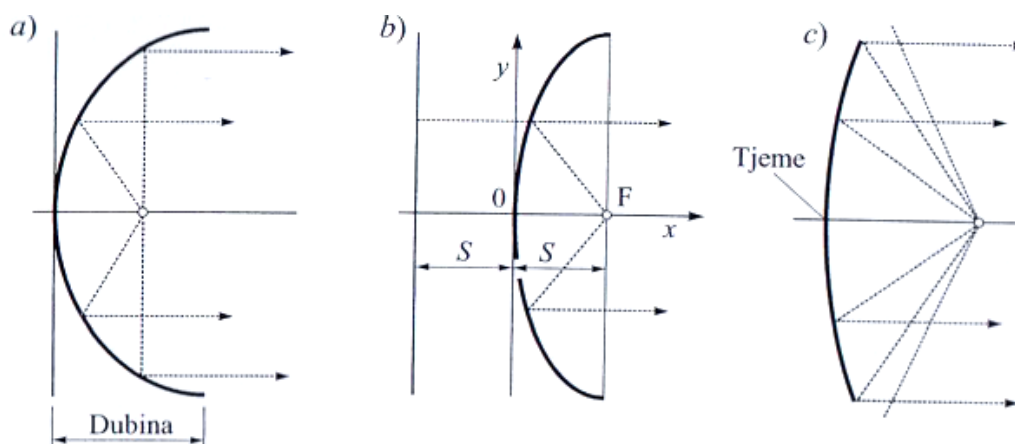
Slika 11.14 Kvad-antena

Usporedivo s Yagijevom antenom, kvad ima nešto veći dobitak (do 2dB) i bolji omjer naprijed-natrag koji se s pomoću stuba 4 i SWR-metra može ugađati. Na slici 11.14 prikazana je kvad-antena.

11.2.9 Parabolična antena

Antensko zračilo (radijator) smješten je u žarište paraboličnog reflektora (tanjura), pa antena može imati dobitak $G > 50\text{dB}$. Dobitak ovisi o promjeru D reflektora, finoći i točnosti izrade njegove površine i od kvalitete i potpunosti elektromagnetskog zračenja.

Dobitak je u odnosu na izotropni radijator $G = 10 \log k (\pi D/\lambda)^2$ (u dB), uz širinu snopa $\psi = 70 \lambda/D$ (u stupnjevima), gdje je k faktor učinkovitosti, uobičajeno $\sim 55\%$, a D promjer tanjura (u metrima), λ valna duljina (u metrima).



Slika 11.15. Parabolična antena

Takve antene su učinkovite za frekvencije iznad 400 MHz. Umjesto homogenog reflektora može se upotrijebiti mrežasti, uz uvjet da otvori u mreži ne smiju biti veći od $(1/12)\lambda$, što za $f = 430$ MHz ($\lambda = 0.6$ m) daje izmjere „mrežnih rupa“ od 5 cm, a za 10 GHz jedva 2.5 mm. Takve antene su lakše i otpornije na udare vjetrova.

11.3. Brodske antene

11.3.1 Brodska VHF antena

Visina VHF antene je vrlo bitna za postizanje maksimalne iskoristivosti. Zato recimo na jahtama najpogodnije mjesto za lokaciju i instaliranje antene je dakle vrh jarbola. Dva broda, oba sa antenama smještenima na vrhovima jarbola od 18.29 metara od razine mora mogu teoretski komunicirati na otprilike 20 milja, dok odašiljač na obalnoj radio stanici koji se nalazi na otprilike 304.8 metara od razine mora može sa ta dva broda komunicirati na 50 nm. Da bi VHF antene bile što efikasnije potrebno je nabaviti kvalitetnu antenu i kvalitetno je instalirati. Loše dizajnirana antena, sa lošim kabelom i lošim spojem će smanjiti performanse VHF uređaja.

Prilikom odabira antene treba imati u vidu nekoliko parametara ključnih za rad antene. Pojačanje antene (eng. gain) je izraženo u decibelima (dB). Ako naprimjer imamo antenu koja ima pojačanje od 3 dB to znači da takova antena pojačava snagu primljenog signala signala za 2 puta, 6 dB antena povećava za 4 puta, a 8 dB povećava osam puta. Antena sa pojačanjem od 3 dB se najviše se koristi za brodove.

Antena 3dB ima radijator koji izgleda, poput diska, i ima vrlo dobar omjer signala naprijed-nazad. Koliko god se brod ljuljao i naginjao ta antena će imati dobar i jak prijemni signal.

Drugi kriteriji za selektiranje antena, posebno one koje se instaliraju na vrh jarbola su:

- otpor prema UV degradaciji
- otpor udarima vjetrova i naletu ptica. Whip antena je manje podložna oštećenju nego obična plastična antena
- sposobnost demontaže kad se jarbol zamjenjuje. Spajanje antene bi trebalo vršiti sa SO239 koji mora imati standardni konektor PL259

- mala težina.

Dakle kad se ti kriteriji zadovolje tada se kaže da smo dobili odgovarajuću antenu. Ta antena se naziva METZ antena i ona najbolje odgovara ovim kriterijima.

11.3.2 METZ antena

METZ antena zadovoljava sve potrebne kriterije. Ona je izbor Američke Obalne Straže, kao i njihove Spasilačke ekipe. Na slici 11.1 prikazana je METZ antena.



Slika 11.,1 Metz antena

Za priključak na ovu vrstu antene potreban je 50-ovski koaksijalni kabel koji moraju biti vodootporni. Česti su kvarovi zbog lošeg kabela u kojeg voda prodire, pa nastupi korozija kabela i vodova. Spoj antene sa koaksijalnim kabelom je jedan od najčešćih uzroka kvarova na radio uređaju. Zato su potrebni visoko kvalitetni konektori. Najbolji konektor je PL 259 koji odgovara kabeleu RG-213 (slike 11.2 i 11.3).

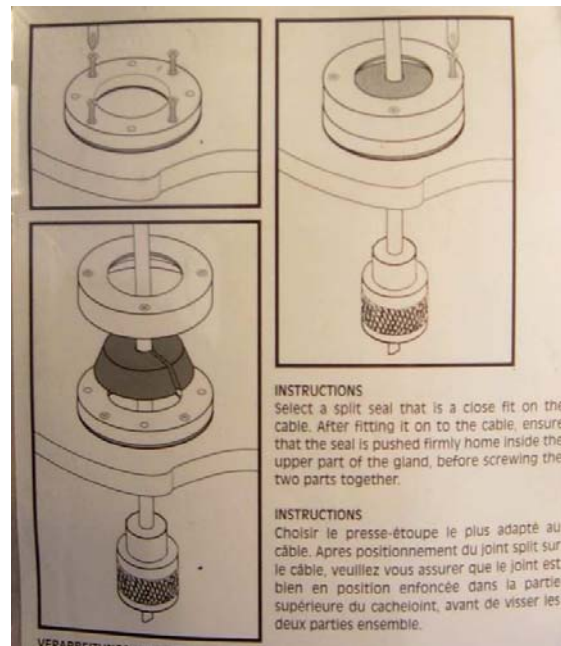


Slika 11.2. SO239 priključak na bazi Metz antene



Slika 11.3 PL 259 konektor

Koaksijalni kabel može se nalaziti unutar jarbola ili izvan njega. Ako se nalazi izvana, vrlo je važno da ima UV zaštitu. Ako se nalazi unutar jarbola, tada mora biti dobro izoliran da se ne sopleće sa drugim kabelima. Moderni jarboli danas imaju napravljene kanale kroz koje se instaliraju ti kabeli da bi se što više očuvali. Na slici 11.4 prikazan je koaksijalni kabel.



Slika 11.4

11.3.3 MF/HF antene

Valna duljina MF/HF antene može iznositi i do 180 metara (1650 kHz) pa sve do otprilike 12 metara (25 MHz). Rezonancijska $\frac{1}{4}$ ili $\frac{1}{2}$ duljina antena ne može pokrivati cijelo područje. Problem može biti riješen upotrebljavajući odvojene antene. U ovom procesu mora biti što bolja rezonancija i mora biti što bolja instalacija antene da bi bio što bolji prijem signala na MF/HF uređaju.

Na brodu se koriste žične (wire) antene i vertikalne (whip) antene. Žičana antena može biti smještena između dva jarbola ili među drugom brodomskom opremom koja se nalazi na sredini ili drugom djelu broda usko povezanim za navigaciju. Ipak danas zbog nedostatka prostora na brodu mnogi moderni brodovi koriste GMDSS vertikalne whip antene za uspostavljanje MF/HF veze.

Na slici 11.5 je pokazana HF/ MF antena, u ovom slučaju Whip antena. Spoj između odašiljača i antene mora biti što kraći da bi osigurala što veći prijenos energije do antene. Na slici 11.6 pokazano je kako su spojene dvije HF whip antene, što je jako čest slučaj na brodu jer se tim dobiva bolji signal.



Slika 11.5 MF/HF antene



Slika 11.6 HF Whip antene



Slika 11.7 HF whip antena

Antena na slici 11.7 je HF whip antena i tuner koji se nalazi na oplati od dimnjaka. Udaljenost između prijemnika, antenskog pojačala te glavne antene mora biti što kraća moguća da bi se osigurala dobra i što jača provodljivost energije u antenu.

Žična (wire) antena može se protezati između jarbola ili između jarbola i neke druge po veličini sličnog dijela brodske superstrukture (slika 11.8).



Slika 11.8 Wire antena



Slika 11.9 Povezivanje wire antena

Slika 11.9. pokazuje kako je spojena wire antena preko «feed boxa» koji je montiran na prednjoj strani dimnjaka dok drugi kraj je spojen sa prednjim jarbolom. Slika 11.9 također prikazuje jedan model wire antene, doduše malo stariji model, ali se još koristi na brodovima. Dakle danas na brodovima imamo kombinaciju rada sa wire, whip antenama, satelitskim antenama i sl.

11.4. Održavanje antena

Sve antene moraju biti čiste, nakupine soli se trebaju ukloniti te sve dijelove antene provjeravati po propisima. Zamjenska antena se mora također pregledati te je treba smjestiti u blizini da se lako može zamijeniti sa glavnom ako dođe do kvara antene.

Prije početka bilo koje radnje održavanja treba provjeriti i isključiti svaki dovod električne energije u antenu. U praksi se ne događa često ozbiljnija ozljeda uslijed udara struje, nego se dešavaju slabi udari i peckanje, no naponi su ipak dovoljni za ozbiljnija ozljeđenja. Nije zdravo boraviti blizu odašiljačkih aktivnih antena u radu, posebno radarskih jer mikrovalovi mogu izazvati lokalna zagrijavanja tkiva, oštećenja očiju i slično.

Literatura

1. Bilić : « Komunikacije u GMDSS» , Split 1995.
2. Zenter : » Radiokomunikacije « , Zagreb 1980.
3. GMDSS Handbook, IMO, London 1995.
4. Gregurević : Radio-prijemna tehnika
5. Haykin: Communication Systems
6. Tehnička Enciklopedija
7. ***www.wikipedia, the free encyclopedia
8. ***www.astro.hr/
9. ***www.ZEA-Prijamnici