1 UVOD

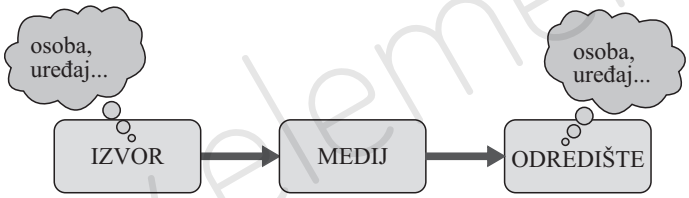
www.element.hr

1.1. Komunikacijski lanac

Komunikacijskim lancem smatra se cjelokupni put širenja informacija od izvorišta do odredišta. Iako informacija načelno može imati mnogo oblika (brojka, slovo, riječ, slika, videozapis, itd.), ovdje se razmatranje ograničava na prijenos zvuka kao informacije od mjesta nastanka do mjesta prijama, bez obzira na transformacije koje zvučna informacija prolazi na tom putu.

1.1.1. Osnovni elementi komunikacijskog lanca

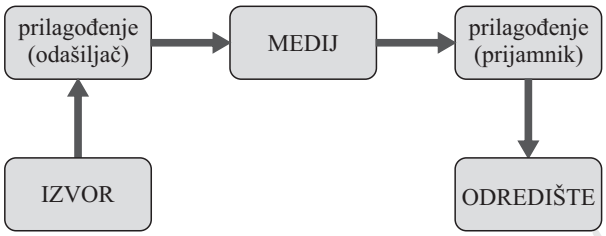
U osnovne elemente komunikacijskog lanca ubrajaju se izvor informacije, medij kroz koji se informacija prenosi te odredište informacije. Kad govorimo o zvuku, obično je izvor informacije osoba koja govori (govorna informacija). S druge strane, informacija može biti i bilo kakav drugi zvuk, npr. glazba ili naprosto zvuk iz prirode. Zvučna informacija ne mora biti proizvedena "uživo", već može biti i snimljena u analognom ili digitalnom formatu u bilo kojem ranijem trenutku. Stoga izvor informacije u komunikacijskom lancu može biti i uređaj na kojemu je pohranjen zvuk. Isto vrijedi i za odredište informacije: to može biti uređaj na koji se zvučna informacija pohranjuje, odnosno osoba koja sluša zvuk nakon svih potrebnih pretvorbi signala (npr. električni u akustički). Cjelokupni fizički put koji postoji između izvora i odredišta informacije naziva se medijem. Slika 1.1 prikazuje osnovne elemente komunikacijskog lanca.



Slika 1.1. Osnovni elementi komunikacijskog lanca

Da bi se informacija mogla nekim medijem prenijeti od izvora do odredišta, potrebno je prilagođenje. Ako se zvučna informacija šalje radiodifuznim sustavom putem elektromagnetskog vala, onda se ona treba prilagoditi tako da bude pogodna za odašiljanje s pomoću antene, odnosno na prijamnoj strani treba pristigli elektromagnetski val prilagoditi prijamniku. Jednostavna shema takvog prijenosa informacija prikazana je na slici 1.2.

www.element.hr



Slika 1.2. Prilagođenje izvora i odredišta informacije na prijenosni medij

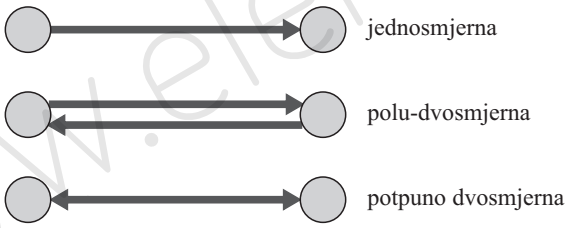
1.1.2. Vrste komunikacija

Komunikacije možemo podijeliti u nekoliko kategorija. Pritom se i zvuk može razmatrati kao informacija koja se prenosi.

Komunikacije prema smjeru njihova odvijanja možemo podijeliti na:

- jednosmjerne (engl. *simplex*) – npr. slušanje radijske postaje na prijamniku
- dvosmjerne (engl. *duplex*) – dijele se na polu-dvosmjernu i potpuno dvosmjernu:
  - polu-dvosmjerna (engl. *half duplex*) – nema istovremene komunikacije u oba smjera, primjer su bežične radiostanice (engl. *walkie-talkie*) kod kojih se komunikacija odvijala istim prijenosnim kanalom
  - potpuno dvosmjerna (engl. *full duplex*) – uobičajena vrsta komunikacije između ljudi, npr. razgovor s drugom osobom, telefoniranje.

Podjela komunikacija s obzirom na smjer njihova odvijanja prikazana je grafički na slici 1.3.



Slika 1.3. Jednosmjerna (gore), polu-dvosmjerna (sredina) i dvosmjerna komunikacija (dolje)

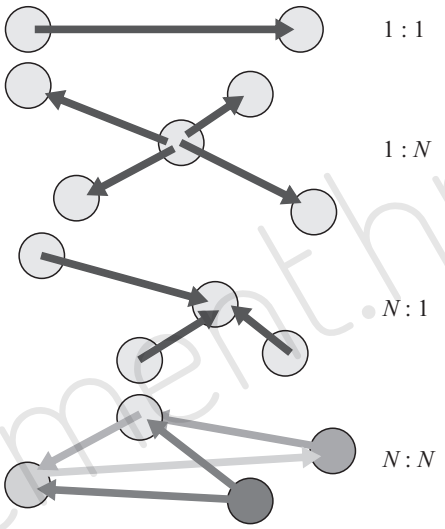
Nadalje, komunikacije se mogu podijeliti i prema broju sudionika:

- 1 : 1 – tipična komunikacija između dviju osoba

www.element.hr

- $1 : N$ – uobičajena komunikacija kod radiodifuzije zvuka i slike (radio, televizija)
- $N : 1$ – npr. glasovanje, izbori
- $N : N$ – tipičan primjer je Internet.

Podjela komunikacija prema broju sudionika prikazana je grafički na slici 1.4.



Slika 1.4. Komunikacije prema broju sudionika

1.1.3. Značajke komunikacijskog kanala

Komunikacijski kanali imaju svoje značajke koje se također mogu grupirati u nekoliko kategorija. Slijedi kratki opis tih značajki.

Aktivni ili pasivni: Aktivni kanali su oni koji zahtijevaju neku vrstu izvora energije kako bi bili funkcionalni, primjerice radiodifuzni kanal koristi aktivne odašiljače i prijamnike. Pasivni to ne zahtijevaju, primjerice zrak kao medij kod govorne komunikacije između dviju osoba.

Smjer: Određen je sustavom – pasivni kanali su recipročni, aktivni nisu.

Kapacitet: Kapacitet kanala može biti konstantan i promjenjiv. Iako je uobičajeno da je kanal konstantnog kapaciteta kao što je slučaj u analognoj radiodifuziji, u digitalnoj su radiodifuziji sustavi često građeni tako da se količina informacija koja se šalje kroz kanal prilagođava raspoloživoj širini, odnosno kapacitet kanala se može proširiti ako postoji takav zahtjev.

Broj kanala: Najmanji broj zvučnih (audio) kanala je 1 (monosustav), najčešće su 2 (stereo) ali postoje i sustavi s većim brojem kanala (višekanalni sustavi za snimanje i/ili reprodukciju zvuka).

Pouzdanost: U pouzdanost kanala se s jedne strane ubraja zaštita od smetnji što je obrađeno u sljedećem poglavlju, no s druge strane tu spada i zaštita od neovlaštenog korištenja. Kod digitalnih sustava se zaštita od neovlaštenog korištenja puno jednostavnije tehnički rješava uporabom zaštitnih i identifikacijskih kodova, pa tako postoje pretplatnički digitalni radijski kanali koje mogu slušati samo ovlaštene osobe koje su pretplaćene na njihov prijam.

www.element.hr
www.element.hr

Raspoloživost: To je vrijeme potrebno za uspostavljanje veze. Ono ovisi o nizu tehničkih parametara sustava, kao i o kvaliteti samog komunikacijskog kanala.

Kvaliteta: Može se govoriti o tehničkoj, ali i uporabnoj kvaliteti kanala. Tehnička kvaliteta kanala redovito se mjeri normiranim postupcima kako bi se dobiveni rezultati mogli međusobno uspoređivati.

1.1.4. Smetnje u sustavu

U svakom komunikacijskom sustavu postoje i smetnje koje načelno narušavaju kvalitetu prijenosa informacija tako da na razne načine izobličuju i degradiraju informaciju. Smetnje se dijele s obzirom na mjesto gdje mogu nastati.

Smetnje ovisne o okolini izvora i odredišta: To su obično akustičke smetnje, odnosno buka koja smanjuje razinu signal/šum na mjestu pretvorbe akustičkog signala u električki (mikrofon), odnosno električkog u akustički (zvučnik). One se smanjuju odgovarajućom akustičkom obradom radijskih i televizijskih studija (npr. poboljšana zvučna izolacija), odnosno slušanjem u tihom prostoru bez prisutnosti buke na mjestu prijama.

Smetnje u odašiljaču i prijamniku: U ove se smetnje ubrajaju sve smetnje koje djeluju na zvučnu informaciju dok se ona nalazi u obliku električkog signala: međukanalne interferencije, elektromagnetska zračenja, inducirani naponi smetnje, vlastiti šum uređaja, smetnje elektroenergetske mreže, itd. Smanjuju se kvalitetnom izvedbom svih elektroničkih komponenata i uređaja koji sudjeluju u prijenosnom komunikacijskom lancu.

Smetnje u kanalu: U smetnje u prijenosnom kanalu se kod radiodifuzije zvuka ubrajaju smetnje u eteru koje utječu na propagaciju elektromagnetskog vala. Tu se ubrajaju selektivno slabljenje u nekom ograničenom vremenu i frekvencijskom pojasu (engl. *fading*), utjecaj atmosfere na propagaciju elektromagnetskog vala, postojanje fizičkih prepreka širenju kao što su razvedeni reljef terena ili visoke građevine, itd. Na te smetnje se gotovo i ne može utjecati, ali se mogu i moraju uzeti u obzir kod projektiranja svakog radiodifuznog sustava.

1.1.5. Zaštita od smetnji

Iako se na neke smetnje u praksi ne može utjecati u smislu njihova otklanjanja (primjer su smetnje u kanalu), ipak postoje različiti postupci kojima se može povećati zaštita komunikacijskog sustava od smetnji. Takva zaštita nije jednaka za analogne i digitalne prijenosne sustave, pa se navode metode zaštite za svaku od tih dviju skupina.

www.element.hr

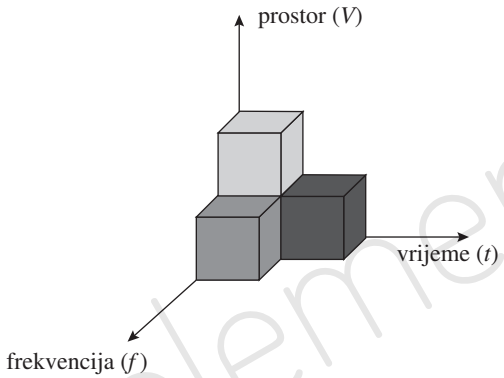
Analogni sustavi

Smetnje se mogu smanjiti sljedećim postupcima: ponavljanjem informacije, smanjivanjem opsega informacije (npr. smanjivanje frekvencijskog pojasa audioinformacije koja se šalje) i promjenom parametara prijenosnog sustava (npr. povećanje snage odašiljača, povećanje indeksa modulacije, itd.).

Digitalni sustavi

Kod digitalnih sustava vrijede sve metode zaštite od smetnji kao i kod analognih, ali postoje i dodatne metode smanjivanja smetnji. To su: organiziranje digitalne informacije u kanalne kodove koji su prilagođeni mediju i informaciji, dodavanje zaštitnih kodova (šifriranje), itd.

Ako svaki prijenosni kanal opišemo trima parametrima: frekvencijskim pojasom koji zauzima informacija, vremenom koje je potrebno da se neka informacija prenese i prostornim zauzećem prilikom prijenosa informacije kroz medij, onda se povećanje zaštite od smetnji u kanalu, odnosno povećanje količine informacija koje se mogu poslati kroz kanal postiže povećanjem bilo kojeg od tih triju parametara. Primjeri su upotreba više frekvencijski odvojenih kanala, uporaba duljeg vremena prijenosa informacija, ili uporaba fizički odvojenih medija prijenosa kao što su npr. dvije paralelne žice. To je grafički prikazano na slici 1.5.



Slika 1.5. Načini povećanja sigurnosti komunikacijskog kanala povećanjem jednog od triju parametara prijenosnog kanala

www.element.hr

1.2. Prijenos informacije elektromagnetskim valom

Radiodifuzija zvuka predstavlja veliku grupu komunikacijskih sustava koji prenose zvuk kao osnovnu informaciju na veće udaljenosti, [143], [144]. Glavna značajka svih radiodifuznih sustava je uporaba etera kao medija prijenosa zvučne informacije koja se modulira na signal vala nosioca. Budući da se radiodifuzija odvija od najnižih frekvencija elektromagnetskog vala (od 150 kHz), pa do vrlo visokih frekvencija predviđenih za satelitske komunikacije (više od 10 GHz), potrebno je razmotriti koje se poteškoće javljaju u širenju elektromagnetskog vala kroz atmosferu. Na slici 1.6 prikazan je elektromagnetski spektar, te istaknuto frekvencijsko područje najčešće korištenog frekvencijskog područja za radiodifuzijski prijenos televizijskih i radijskih signala.

Kod prijama zvuka na frekvencijama ultrakratkog vala elektromagnetski se valovi od odašiljača šire praktički pravocrtno – slično kao i svjetlost. Stoga je doseg ultrakratkovalnog (UKV) odašiljača prvenstveno ovisan o visini odašiljača i snazi odašiljanja. Uobičajene vrijednosti dosega iznose od 50 do 150 km.

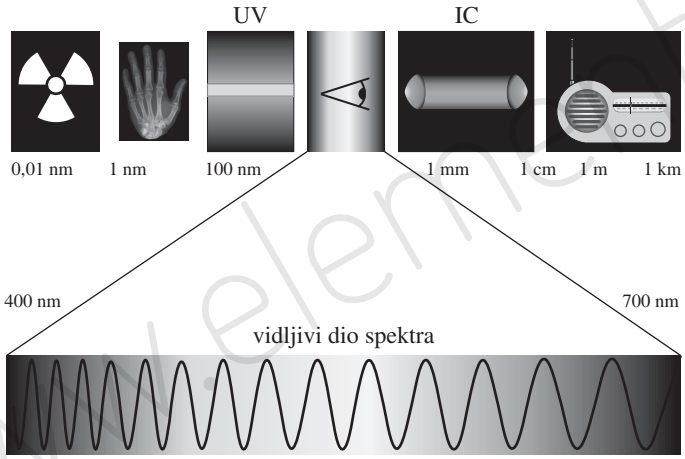
Dugi valovi (DV) se kod propagacije naprotiv prilagođavaju zakrivljenosti Zemlje. Zato odašiljači, koji rade na tom frekvencijskom području, imaju doseg do 1000 km, pa i više. Međutim, na tom frekvencijskom području u Europi na raspolaganju stoji samo 15 kanala analogne radiodifuzije tako da niti svaka država ne može upravljati vlastitim odašiljačem na dugom valu bez ometanja radijskih postaja u drugoj državi.

Srednji val (SV) osjetno manje slijedi zakrivljenost Zemlje tako da tijekom dana doseg srednjovalnih odašiljača iznosi oko 300 km. Takav se val naziva površinskim valom. U večernjim i noćnim satima atmosferske pojave dodatno povećavaju doseg na tom frekvencijskom području: nastaje prostorni val. Refleksijom od ionosfere doseg se može povećati na više od 1000 km. Međutim, ta refleksija nije ujednačena: signal prostornog vala se s vremena na vrijeme apsorbira u ionosferi tako da prijam postaje nemoguć. U tim slučajevima signal analognog odašiljača nestaje u šumu. Taj efekt se prema engleskom još naziva i *fading*. U srednjovalnom području radiodifuzije u Europi na raspolaganju stoji 121 kanal koji se mogu isključivati u noćnim satima, ali i koristiti za pokrivanje cjelokupnog europskog prostora u ovisnosti o trenutnom širenju prostornog vala.

Na kratkovalnom području (KV) površinski val gotovo i ne postoji. Prijenos do prijamnika se u prvoj liniji odvija s pomoću prostornog vala. U ovisnosti o dobu godine, dobu dana i broju Sunčevih pjega, koje osjetno utječu na djelotvornost reflektiranja ionosfere, pojedini radiodifuzijski pojasevi u kratkovalnom se području mogu upotrebljavati za različite ciljane dosege. Pritom se doseg može povećati na nekoliko tisuća kilometara višestrukim refleksijama kratkog vala između ionosfere i površine Zemlje (engl. *hops*). Tada dolazi do slabljenja signala

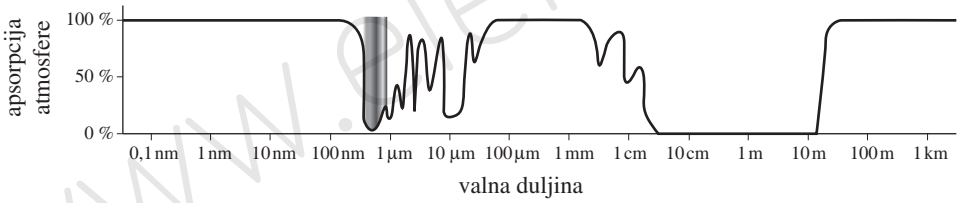
www.element.hr

koji je spomenut pri širenju srednjeg vala, iako je manje izražen u kratkovalnom području. Ovdje se pojavljuje tzv. selektivno slabljenje signala koje smeta prijenosu samo na određenim frekvencijama. Na analognim se prijamnicima takva pojava manifestira u izobličenju audiosignala. U ovisnosti o gore spomenutim parametrima, na kratkom valu stoji na raspolaganju nekoliko stotina prijenosnih kanala.



Slika 1.6. Elektromagnetski spektar (izražen u valnim duljinama)

Nije svako frekvencijsko područje elektromagnetskog vala jednako povoljno za prijenos zvuka, bez obzira na valnu duljinu koja uvelike određuje i dimenzije odašiljačke i prijamne antene. Naime, Zemljina atmosfera vrlo različito prigušuje elektromagnetski val ovisno o njegovoj frekvenciji, slika 1.7. Analiziranjem slike 1.7 vidljivo je kako se za satelitsku komunikaciju treba odabrati najpovoljnije frekvencijsko područje kako prigušenje elektromagnetskog vala u atmosferi ne bi bilo preveliko, odnosno kako snaga odašiljača na satelitu ne bi morala biti jako velika.



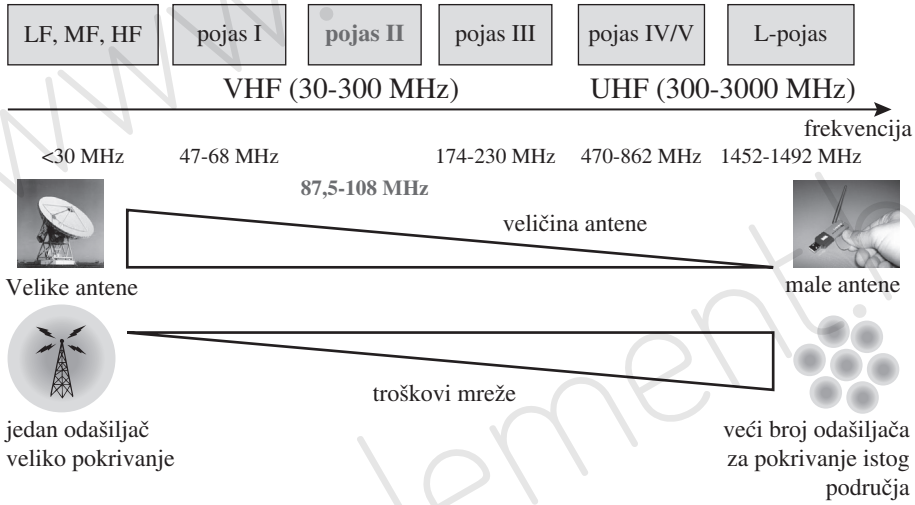
Slika 1.7. Frekvencijski ovisna apsorpcija elektromagnetskog zračenja u atmosferi

Prijenos zvuka, videosignala i različitih multimedijskih informacija najčešće se odvija u pojasevima označenima na slici 1.8. Na niskim frekvencijama elektromagnetskog vala na kojima se nalazi signal vala nosioca, npr. u pojasu visokih

frekvencija (HF od engl. *High Frequency*) u području od 30 kHz do 30 MHz, valna duljina elektromagnetskog vala je puno veća nego u pojasu II ili L-pojasu (za frekvencije 300 MHz – 3 GHz). Veza valne duljine i frekvencije bilo elektromagnetskog ili akustičkog vala dana je izrazom (1.1). Brzina elektromagnetskog vala je $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s dok brzina akustičkog vala u zraku pri temperaturi 20°C iznosi ≈ 343 m/s.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1.1}$$

Zbog toga što je u pojasu većih valnih duljina (KV, SV i DV) odnosno manjih frekvencija (LF od engl. *Low Frequency*, MF od engl. *Medium Frequency* i HF od engl. *High Frequency*) gušenje elektromagnetskog vala manje, moguće je postići puno veći doseg uz istu snagu u usporedbi s odašiljačima na visokim frekvencijama (manjim valnim duljinama). U Hrvatskoj se za emitiranje radijskog programa metodama analogne radiodifuzije (FM odašiljanje uz frekvencijsku modulaciju) koristimo frekvencijskim područjem u pojasu II od 87,5 MHz do 108 MHz (slika 1.8).



Slika 1.8. Frekvencijski pojasevi u kojima se emitiraju programi (radijski, televizijski)

Antene obično rade kao rezonatori duljine $\lambda/4$ ili $\lambda/2$, te je veličina napona inducirana na anteni U_{ef} proporcionalna jakosti električnog polja elektromagnetskog vala na mjestu prijama E i efektivnoj visini antene h_{ef} koja obično iznosi polovicu ili četvrtinu valne duljine (npr. $h_{ef} = \lambda/2$) izraz (1.2).

$$U_{ef} = E \cdot h_{ef} \tag{1.2}$$

Tako je za radiokomunikacije u području nižih frekvencija elektromagnetskog spektra potrebna puno veća antena nego za područje viših frekvencija.

www.element.hr

2 Sustavi analogne radiodifuzije

www.element.hr

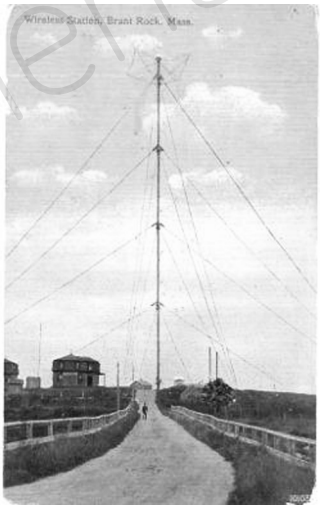
U analognu radiodifuziju ubrajaju se načini prijenosa različitih tipova signala bez korištenja digitalnih modulacijskih tehnika. Iako danas usporedno uz FM postoje i aktivni digitalni sustavi radiodifuzije, svi pokazatelji govore kako će analogna radiodifuzija, odnosno FM sustav, biti aktivna još barem jedno desetljeće. Stoga je opravdano detaljno proanalizirati značajke sustava analogne radiodifuzije i kasnije ih usporediti s digitalnima. FM sustavi kojima se danas koristimo u sustavima analogne radiodifuzije rade na principu moduliranja frekvencije signala nosioca signalom informacije (frekvencijska modulacija) pri čemu se signal nosioca nalazi na nekoj puno većoj frekvenciji od signala informacije. Signal informacije je govor i glazba te zauzima odgovarajuće frekvencijsko područje u osnovnom pojasu (govor do 4,5 kHz, glazba do 15 kHz), a frekvencija signala nosioca nalazi se u frekvencijskim pojasevima navedenima na slici 1.8. U početcima analogne radiodifuzije signal informacije je najprije modulirao amplitudu signala nosioca te se takav postupak naziva amplitudna modulacija, a sustavi koji rade na tome principu su AM sustavi.

2.1. Povijest radiodifuzije

2.1.1. Povijest AM radija

Prve teorijske mogućnosti bežičnog prijenosa prikazao je kroz niz predavanja Nikola Tesla u osamdesetim godinama 19. stoljeća. Njegova razmatranja su bila usmjerena na prijenos energije, ali se u osnovi radilo o prijenosu neke vrste informacije.

U veljači 1895. godine je Tesla nakon niza eksperimenata uspješno demonstrirao bežični prijenos signala unutar kampusa vojnog učilišta West Point. U ožujku iste godine uspješan bežični prijenos ostvaruje i Aleksandar Popov. Samozatajan i znanstveni idealist, Tesla nije bio zainteresiran za komercijalizaciju svojeg pronalaska, pa nije požurivao prihvaćanje patentne prijave za ovaj pronalazak. Godinu dana kasnije, primjenjujući zapažanja Tesle, Popova, ali i niza drugih znanstvenika, Guliermo Marconi 1896. prijavljuje patent o izumu radijskog prijenosa. Već sljedeće godine Britanski ured za patente prihvaća njegov podnesak i tako Marconi ulazi u povijest kao izumitelj radija. Zanimljivo je napomenuti kako se 1906. na Badnjak emitirala emisija Reginalda Fessendena iz Brant



Slika 2.1. Prva antena za radiodifuziju zvuka

www.element.hr

Rocka, Massachusetts, SAD, te se ona smatra prvom radiodifuznom emisijom [75]. Na slici 2.1 je vidljiva fotografija antenskog sustava odašiljača. Zbog niskih frekvencija signala nosioca (nekoliko 100 kHz) valna duljina je velika pa je bilo potrebno konstruirati i velike antene.

Ured za patente SAD-a tek je nakon Tesline smrti 1943. godine prihvatio njegov podnesak i tako, pravno gledano, Tesla (p)ostaje izumitelj radija. Očitu manipulaciju tehničkim saznanjima i teoretskim postavkama koje je prikazao Nikola Tesla, pokušalo se ublažiti dodjelom Nobelove nagrade 1912. godine. Čuvši da bi nagradu trebao podijeliti s Marconijem i Edisonom, Tesla odbija primiti nagradu. Marconi je, naravno, prihvatio nagradu.

2.1.2. Razvoj AM stereoradija

Iako danas pod pojmom AM radio podrazumijevamo monosustav radiodifuzije zvuka, u SAD-u je u povijesti bilo pokušaja uvođenja stereosustava s amplitudnom modulacijom nosioca. Iako sustav nije nikada zaživio na području cijelog SAD-a, zanimljivo je pogledati kronologiju događaja koji su pratili ovaj razvoj [3], [87]:

- 1960. prva prezentacija AM stereosustava korištenjem AM ISB (engl. *Independent Side Band*) modulacije (XTRA-AM sustav, emitiran iz Tijuane u Meksiku zbog toga što sustav nije odobren u SAD-u zbog administrativnih problema). Ovaj sustav se temelji na činjenici da je informacija sadržana u jednom bočnom pojasu oko nosioca.
- 1963. početak komercijalnog emitiranja AM sterea.
- 1980. SAD prihvatile *Magnavox* sustav (AM sustav razvijen od tvrtke Magnavox u Americi, kao normu, a koji je nekompatibilan s XTRA-AM).
- 1982. ukinuta odluka iz 1980. Odluka prepuštena tržištu.
- 1988. Kanada i Meksiko prihvatili C-QUAM (C-QUAM je način AM prijenosa koji se temelji na kvadraturnoj modulaciji dvokanalnog zvuka, razvijen 1977. godine).
- 1992. Japan prihvatio C-QUAM.
- 1993. od nekoliko predloženih sustava u SAD-u prihvaćen C-QUAM. Započelo ispitivanje AMAX sustava (AMAX je sada sustav kvalitete koji se bavi certificiranjem AM prijenosa na odašiljačkoj i prijamnoj strani radiodifuzijskog lanca).
- 2006. do danas – podrška AMAX sustavu s *chipsetom* za HD Radio (engl. *High Definition Radio*).

www.element.hr

2.1.3. Povijest radiodifuzije zvuka u Republici Hrvatskoj

Sve je počelo 29. ožujka 1924. godine – zagrebački ljubitelji radija udružili su se na konstituirajućoj sjednici u Radio-klubu Zagreb i za predsjednika izabrali dr. Otona Kučeru, astronoma i fizičara [101]. 14. lipnja 1924. uprava Radio-kluba Zagreb šalje Vladi Kraljevine Srba, Hrvata i Slovenaca u Beogradu molbu da joj "dozvoli odmah postaviti radio-odašiljač u Zagrebu" navodeći da su "novčana sredstva za podignuće osigurana". 26. ožujka 1926. nakon izdane koncesije skupini članova Radio-kluba Zagreb, Vlada napokon odobrava osnutak i nacrt pravila dioničarskog društva Radio Zagreb. 15. svibnja 1926. prvi put se u eteru na srednjem valu od 350 metara oglasio odašiljač Radio-stanice Zagreb snage 350 W na Markovu trgu 9.

Lokacija odašiljača u gradu nije bila najpovoljnija te je traženo i nađeno bolje mjesto i to u selu Otok pokraj Samobora. Tu je 1932. izgrađena zgrada i antena, pa je 1933. preseljen odašiljač s Markova trga. Iako se radilo o istom odašiljaču, zbog povoljnije lokacije, bolje vodljivosti tla i bolje antene odašiljač s Otoka imao je veći domet nego s prethodne lokacije. Međutim, odašiljač Otok nije mogao pokriti hrvatsko govorno područje. Republika Hrvatska je svojim zemljopisnim oblikom i reljefom nepovoljna za pokrivanje radiovalovima. Kako se na srednjem valu radiovalovi danju šire samo u vidu površinskog vala, a noću i površinskog i prostornog vala, problem pokrivanja još je kompliciraniji.

Nakon najčešće skromnih početaka snage odašiljača većine radiostanica u Europi su rasle, kako zbog želja i potreba za čim većim dometom, tako i zbog rastućih industrijskih i ostalih smetnji. Tako je primjerice Čehoslovačka već 1931. imala odašiljač snage 120 kW, Mađarska 20 kW 1928., a 120 kW već 1933. godine.

I u Radio Zagrebu d.d. razmišljalo se o povećanju snage odašiljača, pa je o tome, prema pisanim tragovima, bilo govora već 1933. godine. Poznato je da je Phillips 1936. nudio 5 kW odašiljač, a Telefunken 1937. godine 20 kW za Zagreb i 5 kW za Split. Međutim, nije došlo do realizacije tih planova. Sve do 1940. godine ostalo se na odašiljaču Otok s tada već premalom snagom od 700 W budući da je već tridesetih godina bilo obznanjeno da ministarstvo PTT-a neće produžiti 14-godišnju koncesiju, pa dioničari Radio Zagreba d.d. nisu imali razloga ni računa ulagati u odašiljače koji će biti nacionalizirani.

Kad je Radio Zagreb d.d. 1. svibnja 1940. postao državnim poduzećem, nova uprava je odmah počela razmatrati mogućnost pojačanja odašiljača na Otoku te gradnje jačeg odašiljača koji bi bio tako smješten da pokrije čim veći dio Banovine Hrvatske. Noću je isti odašiljač prostornim valovima trebao pokriti veći dio Europe. Odašiljač na Otoku je već 7. studenog 1940. bio pojačan na 2 kW, a 12. ožujka 1941. neposredno pred rat, na 4,5 kW. Veliki je pomak u kvaliteti prijama programa ostvaren 29. studenoga 1949. Tog je dana proradio srednjovalni 135 kW odašiljač Deanovac.

www.element.hr

15. svibnja 1956. na dan 30. obljetnice Radija Zagreb u Tomislavovu domu na Sljemenu proradio je prvi televizijski odašiljač u tadašnjoj Jugoslaviji, ali i u ovom dijelu Europe. Početak je to medija koji će uskoro promijeniti život i navike ljudi. Od 11. lipnja 1957. započinje odašiljanje radijskih programa na UKV području u novoj kvaliteti, a ubrzo i u stereo tehnici. 15. svibnja 1966. započinje s radom UHF (engl. *Ultra High Frequency*) odašiljač snage 10 kW kojim počinje emitiranje TV slike u boji. Signal se prenosio preko mikrovalnih veza iz Rima. Zajedno s izgradnjom radijskih i televizijskih odašiljača izgrađuje se i mreža mikrovalnih veza kojima se povezuju odašiljači sa studijima i RTV centrima.

1986. godine instaliran je prvi profesionalni satelitski prijamnik, dok 1992. započinje odašiljanje analognog programa sa satelita. 11. kolovoza 1997. započinje odašiljanje digitalnog satelitskog programa. 1998. godine postavljen je DAB odašiljač na Sljemenu i na kraju 2002. godine započinje odašiljanje DVB-T programa.

2.2. Amplitudna modulacija (AM)

2.2.1. Matematički prikaz

Amplitudna modulacija je prvi modulacijski postupak koji se razmatra u prijenosu informacije s pomoću elektromagnetskih valova [93]. Odlikuje ju jednostavnost generiranja signala koji se emitira, pa se ovom modulacijom koristimo od prvih dana radiodifuzije. Signal informacije $u_m(t)$ umeće se u amplitudu signala nosioca $u_p(t)$. Signal informacije može općenito biti bilo koji signal (govor, glazba). Zbog jednostavnosti, u svim izvodima modulacijskih postupaka koristimo se kao informacijom sinusnim signalom jedne frekvencije [117]. Njegova amplituda je U_m, a frekvencija ω_m i dan je izrazom (2.1):

$$u_m(t) = U_m \cdot \cos(\omega_m \cdot t). \tag{2.1}$$

Prijenosni signal u_p u čiju se amplitudu umeće signal informacije dan je izrazom (2.2):

$$u_p(t) = U_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t), \tag{2.2}$$

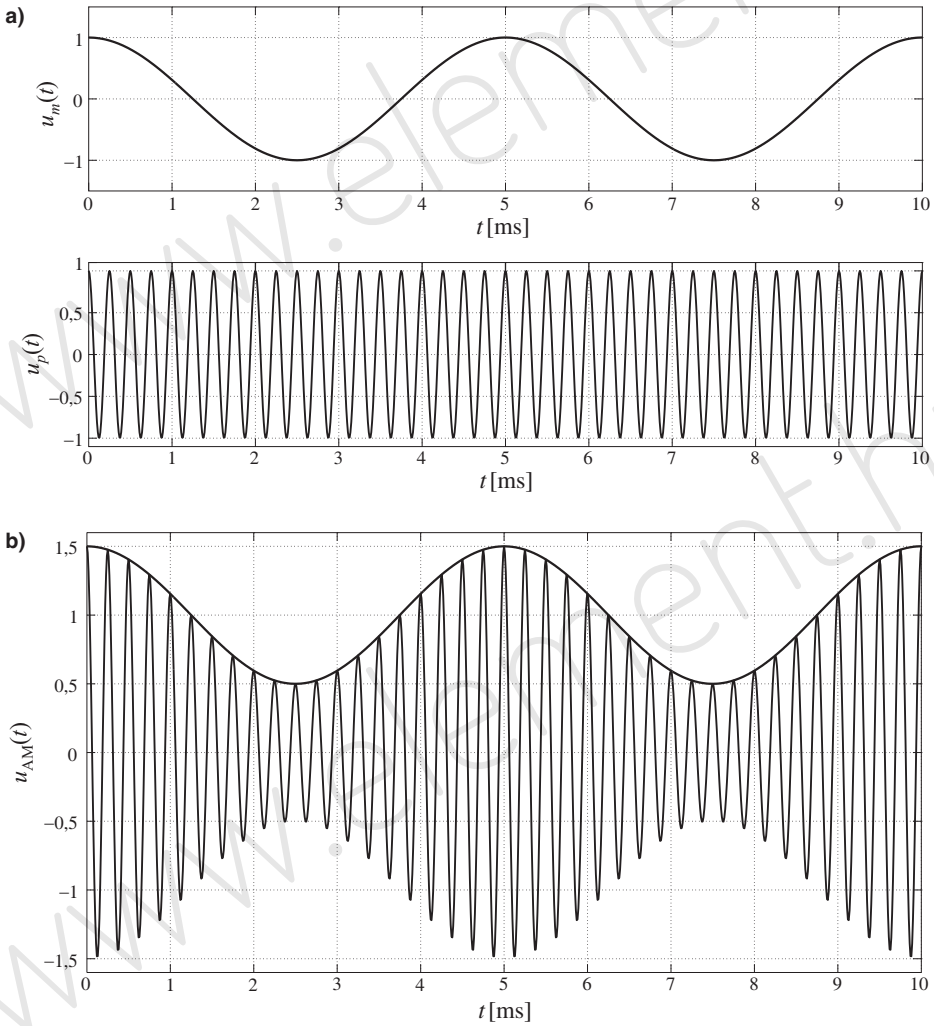
pri čemu je njegova amplituda U_p, a frekvencija ω_p. U postupku modulacije se signal informacije umeće u amplitudu prijenosnog signala prema izrazu (2.3) gdje je k konstanta modulatora. Amplituda nosioca obično ostaje ispred uglate zagrade

$$u_{AM}(t) = [U_p + k{\cdot}u_m(t)]{\cdot}\cos(\omega_p{\cdot}t) = U_p{\cdot}\left[1 + \frac{k{\cdot}u_m(t)}{U_p}\right]{\cdot}\cos(\omega_p{\cdot}t). \tag{2.3}$$

Ako se u izraz (2.3) uvrsti signal informacije na jednoj frekvenciji i vrijednost $k \cdot U_m/U_p$ nazove indeksom modulacije m_a, tada se dobije matematička jednadžba za AM modulirani signal s informacijom na jednoj frekvenciji u obliku izraza (2.4)

$$u_{AM}(t) = U_p \cdot [1 + m_a \cdot \cos(\omega_m \cdot t)] \cdot \cos(\omega_p \cdot t). \tag{2.4}$$

Na slici 2.2 prikazani su valni oblici prijenosnog signala amplitude $U_p = 1$ V i frekvencije $f_p = 4000$ Hz sa signalom informacije amplitude $U_m = 1$ V i frekvencije $f_m = 200$ Hz. Indeks modulacije je $m_a = 0,5$.



Slika 2.2. a) Signal informacije i prijenosni signal na jednoj frekvenciji i b) AM modulirani signal uz indeks modulacije $m_a = 0,5$

www.element.hr

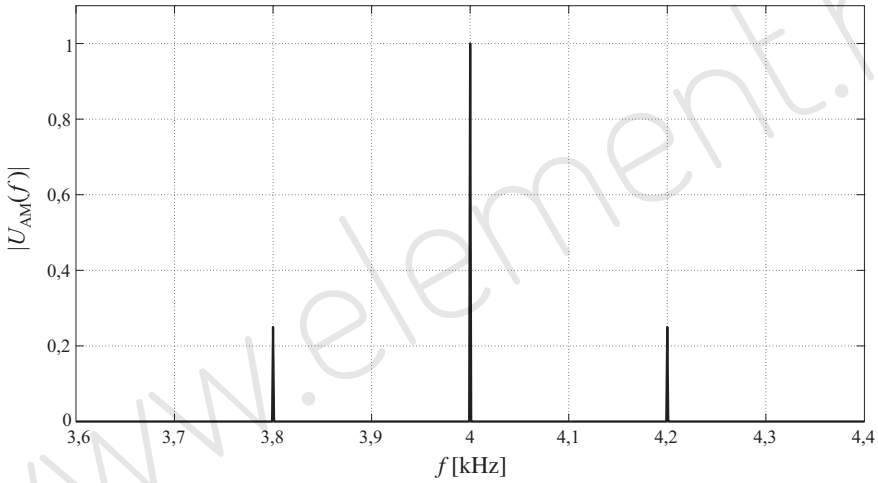
Za normalni rad pretpostavlja se da je $|m_a| < 1$, pa nakon množenja i trigonometrijskog razvoja za umnožak dvaju kosinusa dobivamo izraz (2.5) za amplitudno modulirani signal u kojemu se vidi njegov frekvencijski sadržaj

$$u_{AM}(t) = U_p \cdot \left\{ \cos(\omega_p \cdot t) + \frac{m_a}{2} \cdot \cos[(\omega_p + \omega_m) \cdot t] + \frac{m_a}{2} \cdot \cos[(\omega_p - \omega_m) \cdot t] \right\}. \quad (2.5)$$

AM signal s informacijom sadržanom u jednoj frekvenciji sastoji se od komponente na frekvenciji prijenosnog signala ω_p i dviju bočnih komponenata amplitude $\frac{m_a}{2} \cdot U_p$. Ove dvije komponente nalaze se na frekvencijama $\omega_p \pm \omega_m$, tj. na razmaku od ω_m u odnosu na prijenosnu frekvenciju ω_p. Amplituda prijenosne frekvencije nakon modulacije jednaka je amplitudi signala na ulazu u modulator. Za razliku od nje, amplitude bočnih komponenata određene su indeksom modulacije m_a. Snaga amplitudno moduliranog signala obično se razmatra na karakterističnoj impedanciji tereta $Z = 50\ \Omega$. Ukupna snaga dobije se sumiranjem snaga svih pojedinačnih komponenata na frekvencijama ω_p, $\omega_p - \omega_m$ i $\omega_p + \omega_m$ [93], [22]. Ukupna snaga po komponentama dana je u izrazu (2.6) (veza između efektivne i maksimalne vrijednosti signala je $U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$).

$$P_{AM} = \frac{U_p^2}{2 \cdot Z} + 2 \cdot \frac{U_p^2}{8 \cdot Z} \quad (2.6)$$

Amplitudni spektar AM signala u frekvencijskoj domeni prikazan je na slici 2.3, pri čemu je frekvencija na osi x prikazana linearno, $f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$.



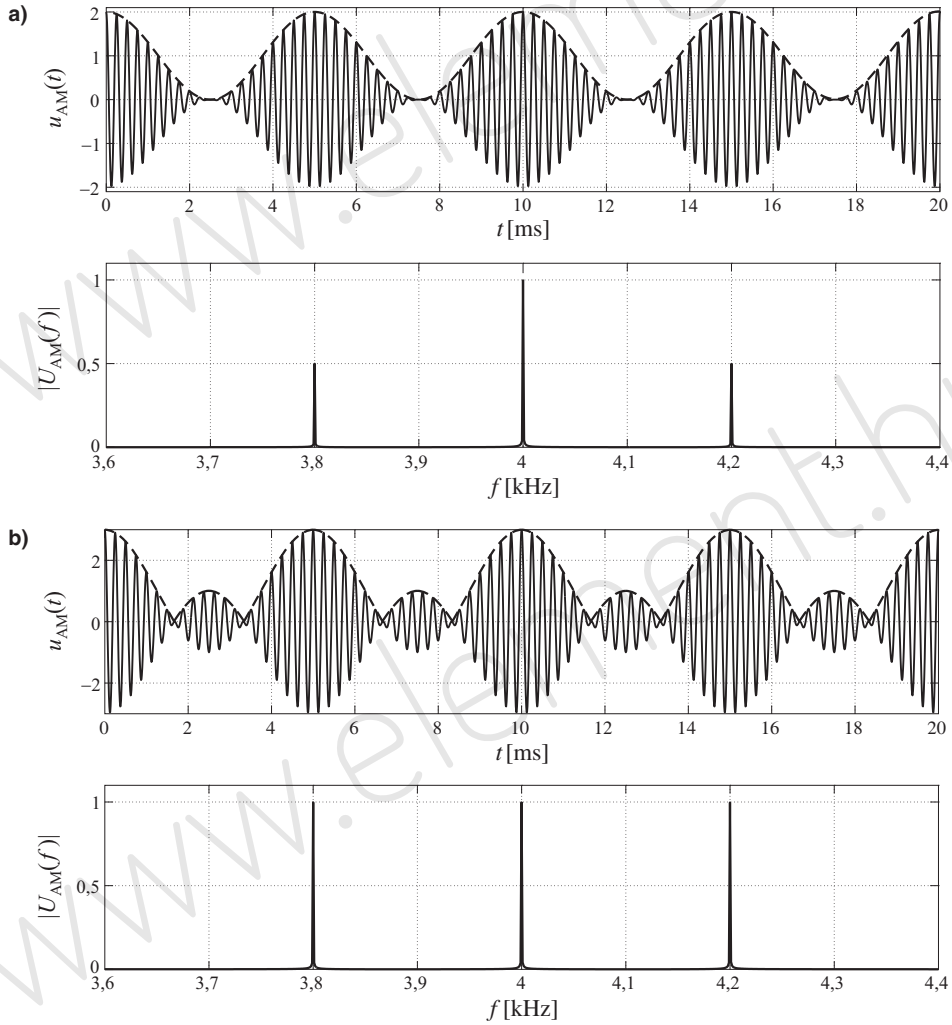
Slika 2.3. Amplitudni spektar AM signala

Maksimalna vrijednost amplitude bočnih komponenata dobiva se za indeks modulacije $m_a = 1$, tj. za slučaj kad je $U_p = U_m$ i iznosi 50 % amplitude prijenosne frekvencije U_p. To znači da je za povoljan odnos signal/šum (S/Š) potrebno

www.element.hr

koristiti se modulacijom uz vrijednost indeksa modulacije blizu 1, no to ujedno postavlja dodatne uvjete na parametre modulacije.

Naime, ako bi amplituda modulacijskog signala premašila amplitudu prijenosnog signala, došlo bi do skokovitog povećanja izobličenja zbog premodulacije, tj. slučaja kad je $m_a > 1$. U stvarnosti je modulacijski signal govorna ili glazbena informacija koja nije konstantne amplitude kao modulacijski signal iz prikazanog primjera. Zbog toga je potrebno sklopovima limitera ograničiti amplitudu modulacijskog signala prije same modulacije. Izbjegavanje izobličenja smanjivanjem indeksa modulacije nije dobro rješenje, jer se time smanjuje amplituda bočnih komponenata, što izravno utječe na odnos S/Š.



Slika 2.4. AM modulirani signali u vremenskoj i frekvencijskoj domeni s indeksom modulacije a) $m_a = 1$ i b) $m_a = 2$

www.element.hr

Na slici 2.4 prikazan je AM modulirani signal u vremenskoj i frekvencijskoj domeni uz iste parametre prijenosnog signala i signala informacije kao u prethodnom slučaju, samo je indeks modulacije povećan na $m_a = 1$ i $m_a = 2$. Na slici 2.4 b) vidi se izobličenje ovojnice prijenosnog signala kada je signal nosilac premoduliran.

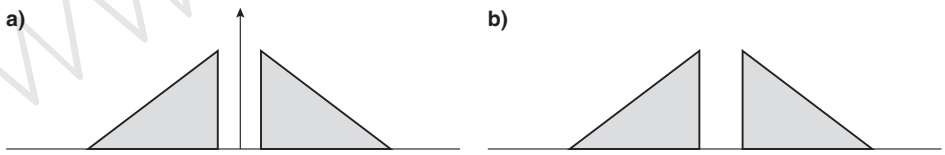
Iz matematičkog prikaza možemo zaključiti kolika je potrebna frekvencijska širina prijenosnog kanala. Ako frekvencija modulacijskog signala odgovara najvišoj frekvenciji audioinformacije koju želimo prenijeti, odnosno $f_m = f_{m(\max)}$ tada potrebna širina kanala mora biti barem dvostruko veća od maksimalne frekvencije modulacijskog signala [93]. Budući da fluktuacijski šum samog kanala raste s $\sqrt{f}$, širinu pojasa treba uzeti što manjom.

AM modulirani signal najčešće se dobiva miješanjem signala informacije (modulacijski signal) i prijenosnog signala na nelinearnom elementu (tranzistor). Taj element ima nelinearnu prijenosnu karakteristiku između napona i struje tako da se u izlaznom krugu selektiraju frekvencijske komponente koje odgovaraju AM moduliranom signalu.

2.2.2. Vrste AM modulacije

U početnom razmatranju vidjeli smo matematički prikaz nastajanja AM signala. Vidljivo je kako se modulirani signal sastoji od prijenosnog signala i dvije bočne komponente. U stvarnosti modulacijski signal nije sinusoidalni signal jedne frekvencije, nego se radi o pojasu frekvencija koje odgovaraju sadržaju audiosignala na ulazu u modulator.

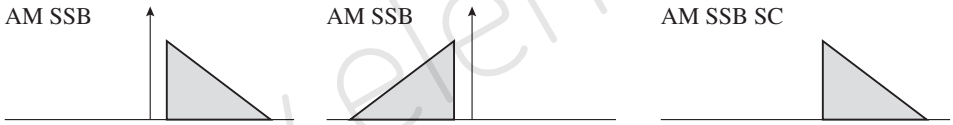
Oblik najjednostavnijeg moduliranog signala naziva se AM signal s dvama bočnim pojasevima. Kratica kojom se označava ovaj oblik je AM DSB (engl. *Amplitude Modulation Dual Side Band*). Spektar AM DSB signala prikazan je na slici 2.5a). Osim ovog, u uporabi su i drugi oblici AM signala. Neki češći su AM DSB signal s potisnutim nosiocem (AM DSB SC – engl. *Suppressed Carrier*) koji je našao svoju primjenu npr. kod prijenosa stereoinformacije u UKV radiodifuziji, slika 2.5b). Po frekvencijskom spektru vrlo sličan, ali po sadržaju bitno različit je oblik signala AM ISB (engl. *Independent Side Band*). Posebnost ovog signala je što svaki bočni pojas sadrži odvojene i međusobno neovisne informacije. Odnos S/Š time se smanjuje, ali je moguće prenijeti veću količinu informacije. Kao primjer navodimo prijenos mono $(L + D)$ informacije u jed-



Slika 2.5. a) Spektar AM DSB signala; b) spektar AM DSB SC signala

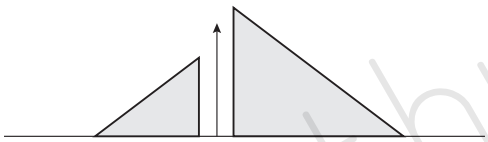
nom, a stereo $(L-D)$ informacije u drugom bočnom pojasu. Ovim se postupkom koristilo kod prvih AM stereosustava [93].

Za prijenos govora kod kojeg nije potrebno postići veliki odnos S/Š koristimo se moduliranim signalom sa samo jednim bočnim pojasom (gornjim ili donjim). Ova vrsta AM signala naziva se AM SSB prijenos (engl. *Single Side Band*), slika 2.6. Osim uštede u zauzeću spektra, smanjuje se potrebna snaga odašiljača što ovaj sustav čini pogodnim za primjenu kod mobilnih AM komunikacijskih sustava. Dodatna ušteda u potrebnoj izračenoj energiji je korištenje AM SSB prijenosa s potisnutim nosiocem (oznaka AM SSB SC). Budući da je audioinformacija promjenjivog spektralnog sadržaja, kod AM SSB SC prijenosa teško je otkriti referentnu frekvenciju moduliranog signala (prijenosna frekvencija), pa je ovaj sustav zgodan za primjenu u zaštićenim komunikacijskim mrežama.



Slika 2.6. Spektar AM SSB signala

Na kraju, kao još jednu posebnu vrstu AM signala, spomenimo prijenos s djelomično potisnutim jednim bočnim pojasom – AM VSB (engl. *Vestigial Side Band*), slika 2.7. Ovom vrstom prijenosa koristimo se kod analogne TV radiodifuzije.



Slika 2.7. Spektar AM VSB SC signala

2.2.3. Osnovni parametri AM radiodifuzije

Osnovni parametri amplitudne modulacije zvučnog signala za potrebe radiodifuzije zvuka su:

- preneseno audiopodručje s gornjom graničnom frekvencijom audiosignala: $f_g = 4,5$ kHz ili 5 kHz (Amerika)
- način prijenosa: AM-DSB
- širina kanala: 9 kHz (Europa) ili 10 kHz (Amerika)
- frekvencijska područja u kojima se nalazi frekvencija prijenosnog signala:
  - DV 150 kHz – 400 kHz
  - SV 500 kHz – 1605 kHz
  - KV 1,605 MHz – 30,55 MHz (diskontinuirano)
- indeks modulacije m_a može biti između 0 i 1.

www.element.hr