

1. Radio valovi

1. 1. Propagacija elektromagnetskih valova

Opcenito o radiovalovima

Uopćeno, električni protok je struja elektrona u vodiču između tocaka različitog električnog potencijala. Istosmjerna struja teče stalno u istom pravcu. To se događa ako se ne mijenja polaritet izvora (na primjer u bateriji ili akumulatoru). Ako se međutim električni napon stvara indukcijom, to jest gibanjem vodiča u magnetskom polju, te ako vodič rotira u magnetskom polju (što se događa rotacijom rotora u stroju koji se zove generator) polaritet izvora pravilno se mijenja, pa elektromotorna sila mijenja smjer ovisno o položaju rotora. Takav električni tok zove se izmjenični tok ili izmjenična struja.

Energija električnog toka troši se na dva načina: ili toplina (gubici energije proporcionalni su jačini električnog toka i otporu vodiča) ili kao elektromagnetsko polje raspoređeno simetrično oko vodiča. Orijentacija elektromagnetskog polja funkcija je polariteta izvora električnog toka. Kad električni tok prestane strujati vodičem, elektromagnetsko polje oko njega vraća se vodiču.

Ako se polaritet električnog polja u vodiču mijenja, smjer induciranog elektromagnetskog toka koji se iz prostora vraća u vodič suprotan je smjeru električnog toka vodiča. Zbog toga u vodiču postoje gubici, a vodič ne može u potpunosti preuzeti energiju induciranog elektromagnetskog polja. Ako se te promjene sinkroniziraju (smjer toka u svakom je trenutku suprotan smjeru induciranog i jednak po intenzitetu), cjelokupna energija induciranog elektromagnetskog polja zadržava se izvan vodiča i u obliku vala (elektromagnetski val) rasprostire se brzinom svjetlosti kroz prostor. To je načelo rada predajne antene. Nailaskom na slobodni vodič električni val koji se rasprostire prostorom izaziva u njemu induksijski tok čija je promjena polariteta istovjetna onoj u vodiču koji ga je generirao (frekvencija). To je načelo rada prijemne antene.

Terminologija radio valova

Jakost elektromagnetskog polja u blizini vodiča (predajne antene) ravno je proporcionalna električnom toku u vodiču. Rotor generatora generira električni tok oblika sinusoide, što znači da se intenzitet toka (magnituda) mijenja kao funkcija položaja rotora u odnosu na stacionarno magnetsko polje. Električno polje počinje s nulom, raste do najveće vrijednosti (amplituda) tijekom jedne četvrtine punog okretaja rotora (90°) i pada do nule u slijedećoj četvrtini rotacije rotora. Nakon u narednoj polovici rotacije električni tok mijenja polaritet i nakon rotacije od 270° postiže najveću negativnu vrijednost (amplituda toka suprotnog polariteta). Nakon potpuno izvršenog okretaja rotora (360°) intenzitet električnog toka u vodiču opet pada na nulu. Prema tome jačina električnog toka mijenja se po funkciji sinusa kuta kojeg zatvara smjer magnetskog polja i položaj rotora generatora.

Period električnog toka (T) je vrijeme koje protekne od najveće vrijednosti električnog toka do slijedeće najveće vrijednosti električnog toka (vrijeme jednog okretaja rotora generatora).

Amplituda (A) je najveći intenzitet električnog toka.

Magnituda je intenzitet električnog toka u nekom trenutku, mijenja se od nule do vrijednosti amplitude.

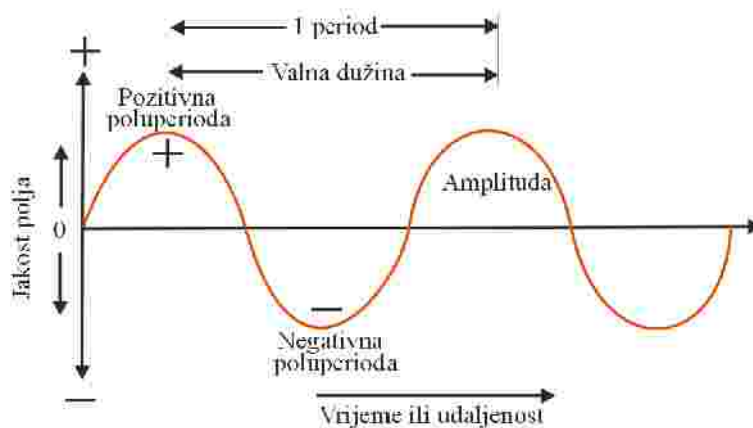
Front vala je prednja strana svakog impulsa. Za neusmjerene antene i se rasprostiru kružno, tvoreći u prostoru ekspanzirajuću hemisferu koja se širi brzinom svjetlosti.

Valna dužina (λ) je udaljenost između dva uzastopna vrha ili dola vala. Izražava se u jedinicama dužine (kilometri, metri, centimetri).

Frekvencija (f) je broj ciklusa koji se izmijeni u jednoj sekundi. Izražava se u **hertzima (Hz)**. Frekvenciju jednog hertza ima izmjenicna struja s jednim ciklusom u sekundi. Frekvenciju jednog kilohertza (kHz) ima izmjenicna struja ili radioval s tisuću ciklusa u jednoj sekundi. Više jedinice su **megahertz (MHz)** za frekvenciju od milijun ciklusa u sekundi i **gigahertz (GHz)** za frekvenciju od milijardu ciklusa u sekundi. Suvremeni elektronički uređaji uglavnom koriste frekvencije koje se izražavaju gigahertzima, na primjer komunikacijski sustav INMARSAT koristi frekvencije frekventnog područja između 1,5 GHz i 1,6 GHz (MES ili SES stanice), odnosno 5 GHz i 6 GHz (LES ili CES stanice); GPS sustav za pozicioniranje koristi ista frekventna područja (1,5 do 1,6 MHz), dok magnetron radara radi na frekvencijama od čak 10 GHz.

Faza vala je vrijeme za koje front vala prethodi ili zaostaje nekom određenom trenutku od kojeg se mjeri početak svakog ciklusa.

Elementi elektricnog toka izmjenicne struje ili elektromagnetskog vala prikazani su na slici 1.



Slika 1. Elementi elektricnog toka izmjenicne struje ili elektromagnetskog vala

Matematički međuodnosi elemenata radiovalova

Impulsna modulacija je jedan od načina prijenosa informacija na daljinu. Frekvencija je u ovoj vrsti modulacije definirana brojem impulsa koji predajnik emitira u jednoj sekundi, a valna dužina udaljenošću između dva uzastopna impulsa. Impulsi se kroz prostor prostiru brzinom svjetlosti (c) i ako predajnik emitira jedan impuls svake sekunde udaljenost između dva impulsa iznosit će 300.000 km (frekvencija 1 Hz, valna dužina 300.000 km). Ako predajnik emitira dva impulsa u sekundi (frekvencija 2 Hz), udaljenost između dva uzastopna impulsa (valna dužina) bit će 150.000 km. Ako predajnik u jednoj sekundi emitira f impulsa, valna dužina (λ) će biti:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300.000 \text{ km}}{f}$$

Analogno:

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

Period vala (T) definiran je kao vrijeme trajanja jednog impulsa. Ako je jednoj sekundi emitiran samo jedan sinusoidni impuls ($f = 1$) njegovo trajanje također jednu sekundu ($T = 1$). Ako su u jednoj sekundi emitirana dva impulsa ($f = 2$) svaki od njih trajao je pola sekunde ($T = 0,5$). Ako je u jednoj sekundi emitirano f impulsa, svaki od njih je trajao:

$$T = \frac{1}{f}$$

Period vala obrnuto je proporcionalan frekvenciji. Analogno:

$$f = \frac{1}{T}$$

Frekvencija izmjenicnog elektricnog toka ili elektromagnetskog vala obrnuto je proporcionalna periodu.

Frekventna područja

Frekvencijski spektar karakteriziraju različita svojstva pojedinih frekvencija. Najniža frekvencija koju može registrirati ljudsko uho je 20 titraja u sekundi (20 Hz). Frekvencije na kojima se registriraju pozadinska kozmicka zracenja dosežu vrijednosti od $4,8 \times 10^{15}$ Hz (4.800 terahertza ili 4.800.000 milijardi treptaja u jednoj sekundi). Radiofrekvencije zauzimaju frekventno područje između 10 kHz i 300 GHz, a podijeljene su na frekventno uža područja koja se nazivaju bendovi (bands). Frekvencija svakog benda deset je puta veća od frekvencije prethodnog benda.

Elektromagnetski valovi čija je valna dužina manja od 1 cm (frekvencija viša od 1 GHz) zovu se mikrovalovi i definiraju područje ultravisokih, supervisokih i ekstremnovisokih radio frekvencija.

U tabeli 1 prikazana je podjela po kojoj su distribuirana frekventna područja.

TABELA 1. Podjela frekventnih područja

Band	Oznaka	Frekventno područje	Valna dužina
Zvucne frekvencije	AF	20 do 20 kHz	15.000 km do 15 km
Radio frekvencije	RF	10 kHz do 300 GHz	30 km do 0,1 cm
Vrlo niske frekvencije	VLF	10 kHz do 30 kHz	30 km do 10 km
Niske frekvencije	LF	30 do 300 kHz	10 km to 1.000 m
Srednje frekvencije	MF	300 do 3,000 kHz	1,000 m do 100 m
Visoke frekvencije	HF	3 do 30 MHz	100 m do 10 m
Vrlo visoke frekvencije	VHF	30 do 300 MHz	10 m do 1 m
Ultra visoke frekvencije	UHF	300 do 3,000 MHz	1m do 10 cm
Super visoke frekvencije	SHF	3,000 do 30,000 MHz	10 cm do 1 cm
Ekstremno visoke frekvencije	EHF	30,000 do 300,000 MHz	1 cm do 0.1 cm
Infracrveni spektar*		10^6 to 3.9×10^8 MHz	0.03 do 7.6×10^{-5} cm
Spektar vidljivog svjetla*		3.9×10^8 to 7.9×10^8 MHz	7.6×10^{-5} to 3.8×10^{-5} cm
Ultraljubičasti spektar*		7.9×10^8 to 2.3×10^{10} MHz	3.8×10^{-5} to 1.3×10^{-6} cm
X-zrake*		$2. \cdot 10^9$ to 3.0×10^{13} MHz	1.5×10^{-5} to 1.0×10^{-9} cm
Gama zracenja*		2.3×10^{12} to 3.0×10^{14} MHz	1.3×10^{-8} to 1.0×10^{-10} cm
Pozadinsko kozmicko zracenje*		$> 4.8 \times 10^{15}$ MHz	$< 6.2 \times 10^{-12}$ cm

* Procijenjene vrijednosti.

Polarizacija radiovalova

Radiovalovi uzrokuju elektromagnetsko polje, istovremeno elektricno i magnetsko. Smjer elektricne komponente određuje polarizaciju elektromagnetskog polja. Ako je elektricna komponenta položena vertikalno elektromagnetsko polje je vertikalno polarizirano, a ako je elektricna komponenta horizontalna elektromagnetsko polje je horizontalno polarizirano. Prostiruci se otvorenim prostorom elektromagnetsko polje može biti polarizirano u bilo kojem smjeru, ali ako se elektromagnetski val prostire površinom zemlje uvijek je vertikalno polariziran. Magnetska komponenta elektromagnetskog polja okomita je na elektricnu komponentu.

Refleksija

Kad radio val u prostoru naide na prepreku dio energije odbija se od prepreke u prostor. To se svojstvo radio vala zove refleksija. Sva frekventna područja posjeduju svojstva refleksije. Snaga reflektiranog vala ovisna je o kutu upada, tipu polarizacije vala, frekvenciji, koeficijentu refleksije prepreke i rasipanja reflektiranog vala. Na frekvencije postižu veći stupanj prodiranja (penetracije) u prepreku, a vrlo niske frekvencije mogu prodirati i ispod površine mora.

Odbijeni valovi mijenjaju fazu, a promjena zavisi o provodljivosti Zemlje i polarizaciji elektromagnetskog vala. Najvišu vrijednost (fazni pomak od 180°) dostiže horizontalno polariziran val kad se odbije od morske površine.

Kad direktni elektromagnetski val emitiran iz predajnika i reflektirani val dodu do prijemnika, primljeni signal sastavljen je od dva impulsa. Ako su direktni i reflektirani val u fazi prijem se pojačava. Ako je reflektirani val u protufazi direktnom valu, snaga signala se međusobno poništi (ako su amplitude signala jednake). Ako se dva signala razlikuju za neku faznu vrijednost signal se u većoj ili manjoj mjeri pojačava ili slabi. Taj se proces naziva **interferencija**, a izaziva pojavu koja se zove **dutching**. Pojava je posebno izražena ako se elektromagnetski val rasprostire na veliku udaljenost i na prijemnik dolazi s više strana: direktnim rasprostiranjem te refleksijama od ioniziranih slojeva atmosfere.

Interferencija je manje izražena kod niskih frekvencija. Za frekvencije iznad VHF frekventnog područja interferenciju može osnažiti i položaj antene ako je val vertikalno polariziran. Refleksiju mogu također izazvati planinski masivi, šume i ostale prirodne prepreke. Ova vrst smetnji sasvim je zanemariva za niska frekventna područja, ali porastom frekvencije smetnje zbog refleksije od prirodnih prepreka postaju sve izraženije. Kod radio komunikacija ovaj se problem može riješiti uporabom usmjerenih antena, ali takva rješenja najčešće nisu primjenjiva na pomorske navigacijske sustave.

U atmosferi postoje različiti refleksijski slojevi. Kod visokih frekvencija signali se reflektiraju od kiše ili oblaka, posebno onih koji uzrokuju kišu. Refleksija se javlja i kod zračnih masa različitih svojstava, na primjer kad tople i vlažne zračne mase struje iznad hladne i suhe. Ako su takvi slojevi atmosfere paralelni s morskom površinom radio valovi i elektromagnetski impulsi mogu se prostirati mnogo dalje u prostor.

Glavni izvor refleksije radiovalova u atmosferi su slojevi ionosfere.

Refrakcija

Refrakcija radiovalova slična je svjetlosnoj refrakciji, no ako se radioval rasprostire iz atmosferskih slojeva određene gustoće u atmosferske slojeve druge gustoće povija se u odnosu na prethodni smjer rasprostiranja. Najvažniji razlog refrakcije je razlika u temperaturi i pritisku uzrokovanih visinskim razlikama i različitim svojstvima zračnih masa.

Refrakcija postoji kod svih frekvencija, ali ispod 30 MHz utjecaj ionosferskih efekata (rasipanje i absorpcija) mnogo je manji. Na višim frekvencijama refrakcija u slojevima atmosfere neposredno uz morsku površinu proširuje udaljenost radio horizonta za oko 15% u odnosu na morski horizont. Efekt je ekvivalentan udaljenosti morskog horizonta koja bi, bez utjecaja refrakcije, bila kad bi polumjer Zemlje bio za trećinu veći.

Ponekad su niži dijelovi atmosfere slojevito raspoređeni. Ta slojevitost rezultira nestandardnim vertikalnim rasporedom temperature i vlažnosti. Ako se pojavi inverzija (porast temperature porastom visine) može se pojaviti efekt valanja (dutching). Radiovalovi visokih frekvencija rasprostiru se među slojevima atmosfere kao u valovodu dosižući ogromne domete. Ta se pojava zove **superrefrakcija**. Najveći se dometi dostižu ako su predajnik i prijemnik u istom zračnom sloju. Donja granica frekvencija koje podliježu dutchingu varira od 200 MHz do više od 1 GHz.

Nocu se pojava dutchinga može, zbog hladenja, javiti i na kopnu. Na moru sloj debljine do 15 m (50 stopa) koji izaziva dutching može se, zbog utjecaja vjetra, pojaviti bilo kada. Zracni sloj koji izaziva dutching debljine do 30 m ili više može se s kopna rasprostirati i iznad površine mora kad topliji zrak s kopna struji iznad hladnije površine mora. Visinski dutching širine od nekoliko metara do više od 300 metara može se pojaviti na visinama od 300 do 1500 metara, a zbog utjecaja zracnih masa različitih svojstava. Ova je pojava cesta uz obale južne Kalifornije i na nekim područjima Tihog oceana.

Povijanje radiovala u horizontalnoj ravnini događa se val prelazi s mora na kopno ili s kopna na more pod malim kutom u odnosu na obalu. Ovu pojavu mogu uzrokovati različita svojstva zracnih masa iznad kopna u odnosu na zracne mase iznad površine mora. Pojava se zove **obalna refrakcija** ili **efekt kopna**.

Ionosfera

Ako atom posjeduje jednak broj negativno nabijenih elektrona i pozitivno nabijenih protona on je električno neutralan. Ion je atom ili grupa atoma koji električno nisu neutralni, bilo da je riječ o negativnom ili pozitivnom polaritetu uslijed manjka ili viška elektrona.

Gubitak elektrona u atomu može biti posljedica različitih uzroka. U atmosferi se ioni najčešće stvaraju sudarima pokretnih atoma ili djelovanjem kosmičkog odnosno ultraljubičastog zračenja. Niži slojevi atmosfere sadrže manji postotak iona, ali bliže površini Zemlje koncentracija pozitivnih ili negativnih iona ponovo se naizmjenično povećava i smanjuje. Brojni slojevi s povećanim brojem pozitivnih ili negativnih iona i slobodnih elektrona zajedničkim se imenom zovu ionosfera. Intenzitet ionizacije zavisi o vrsti atoma (kemijskim svojstvima zraka), gustoci atmosfere i utjecaju suncevih zraka (dobu dana ili godišnjem dobu). Nakon zalaza Sunca ioni i slobodni elektroni brže se oslobađaju povećavajući intenzitet ionizacije atmosfere.

Elektron se iz atoma može izdvojiti samo djelovanjem energije koja je veća od one koja elektron povezuje s jezgrom atoma. Ta energija ovisna je o vrsti atoma i položaju elektrona na energetskej razini u atomu, ali različite vrste energetskih zračenja također mogu uzrokovati ionizaciju nekih atoma.

U najvišim djelovima gustota atmosfere je toliko niska da kisik egzistira češće u obliku međusobno nepovezanih atoma nego kao molekule (kao što je slučaj u donjim slojevima atmosfere). U velikim visinama energetska razina atoma je niska i ionizacija uslijed djelovanja sunceve radijacije je najveća. Taj je ionizacijski sloj poznat kao F sloj. Iznad njega ionizacija slabi zbog manjeg broja atoma koji mogu biti ionizirani. Ispod tog sloja ionizacija slabi jer prodire manja količina sunceve radijacije. Za vrijeme dnevnog svjetla formiraju se dva sloja maksimalne ionizacije tipa F. S F2 nalazi se na visini od oko 200 km od površine Zemlje, a sloj F1 na visini od oko 150 U tijeku noci ta se dva sloja spajaju u jedinstveni F sloj.

Na visini od 100 km zbog veće koncentracije molekula ozona ionizacija je ponovo povećana tako da se formira novi ionizacijski sloj poznat pod oznakom E sloj. Visina ovog sloja stabilnija je nego visina slojeva F. Nocu E sloj postaje slabiji.

Ispod sloja E formira se slabije ioniziran sloj D, na visini od oko 70 km. Sloj nastaje zbog pojačane ionizacije ozona. Ovaj sloj apsorbira radiovalove HF frekventnog područja, a za vrijeme dnevnog svjetla reflektira radiovalove LF i VLF frekventnog područja.

Ionosfera i radio valovi

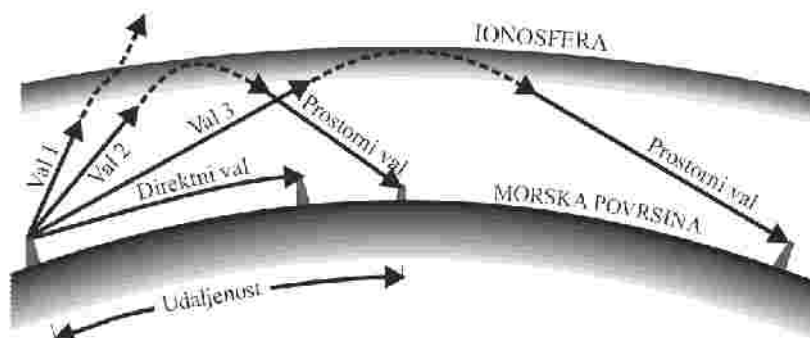
Kad radioval naiđe na česticu s električnim potencijalom uzrokuje njezine vibracije. Vibracijom čestica absorbira energiju elektromagnetskog vala. Zbog toga se mijenja polarizacija i smjer kretanja elektromagnetskog vala. dio vala koji se rasprostire

ioniziranim slojem kreće se brže uzrokujući skretanje vala prema slojevima s manjom ionizacijom.

Na slici je shematski prikazano širenje radiovalova ioniziranim slojevima atmosfere. Val 1 na ionizirani sloj upao pod takvim kutom da je ulaskom u ionizirani sloj skrenuo za veći kut u odnosu na okomicu upada, ali nakon prolaska slojem ponovo je skrenuo prema okomici i nastavio se kretati u slobodnom prostoru. Porastom kuta upada u odnosu na okomicu Val 2 skrenuo je pod kutom toliko velikim da ne prolazi kroz ionizirani sloj već se iz njega vraća u prostor iz kojeg je i upao. Tako se val reflektira prema površini Zemlje. Ako je kut upada vala još veći (val 3), val može doseći vrlo velike udaljenosti u odnosu na položaj predajnika.

Ako se val kroz prostor rasprostire odbijanjem od ioniziranog sloja atmosfere zove se **prostorni val**. Tako se zove i val koji se odbija od slojeva zračnih masa različite gustoće, s obzirom da su karakteristike vala jednake. Ako val dosegne prijemnik rasprostiranjem između površine mora i najnižeg ioniziranog sloja atmosfere (u obliku valovoda) zove se **površinski val**.

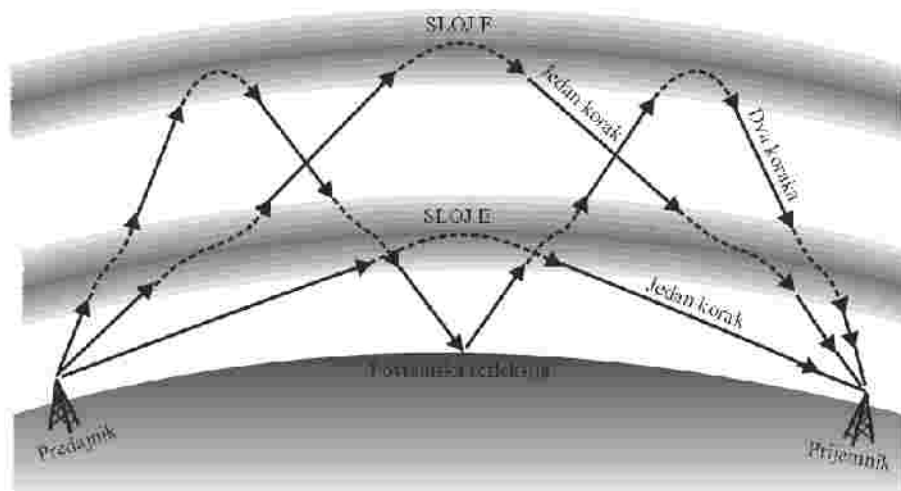
Kod kutova koji su manji od kritičnih radioval prolazi kroz ionizirane slojeve i gubi se u slobodnom prostoru. Prema tome postoji namanja udaljenost od predajnika na kojoj će se primiti prostorni val. Ta se udaljenost zove **korak** ili **skok**. Ako površinski val ne može doseći prijemnik, a udaljenost prijemnika je manja od udaljenosti jednog koraka (skoka) veza se neće uspostaviti (slika 2).



Slika 2. Propagacija radio valova

Kritični kut rasprostiranja ovisi o intenzitetu radijacije i frekvenciji radio vala. Porastom frekvencije vrijednost kuta opada. Kod frekvencija viših od 30 MHz svu energiju radio vala apsorbira ionizirani sloj. Prema tome za svaki položaj prijemnika postoji neka najpovoljnija frekvencija kod koje je primljeni signal najjači (**Maximum Usable frequency – MUF**). Suprotno tome postoji i suprotna, donja granica frekvencije (**Lowest Usable Frequency – LUF**) kod koje je primljeni signal najslabiji. Između te dvije krajnosti može se izabrati frekvencija za optimizaciju prijema. Optimalna frekvencija ne može biti preblizu MUF frekvencije jer se frekvencija najboljeg prijema signala mijenja ovisno o kolebanjima ioniziranih slojeva atmosfere (po intenzitetu ionizacije ili visini). Za vrijeme magnetskih oluja intenzitet ionizacije opada, frekvencija MUF-a opada a LUF-a raste, tako da je širina optimalnog frekventnog područja manja. U ovim uvjetima područje optimalnog prijema može sasvim nestati onemogućujući bilo kakav prijem signala.

Prostorni val može na određeni prijemnik doći iz bilo kojeg smjera (slika 3). Signal koji se od ioniziranog sloja odbije samo jedanput rasprostire se u obliku jednog koraka. Ako se signal odbije u više perioda rasprostire se u dva ili više koraka. Krajnji domet signala ovisan je o broju koraka i sloju od kojeg se signal reflektira.



Slika 3. Propagacija u više koraka

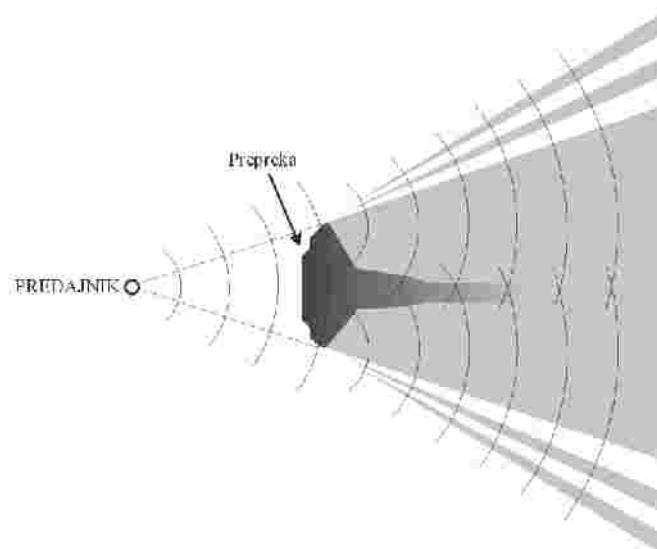
Zbog razlicitih faznih pomaka signala koji dolaze s razlicitih strana, u prijemniku se primljeni signali mogu medusobno ojacavati ili slabiti. Ta se pojava zove **fading (fejdning)**. Ovaj se fenomen u propagaciji radiovalova može javiti zbog interakcija komponenti od kojih je sacinjen val, a kod samo jednog skretanja. Ionosferske promjene u fazi uzrokovane su suncevom radijacijom koja je glavni uzrok ionizacije sloja F, tako da je tim kolebanjima najviše podložan radioval koji se odbija od tog sloja.

Najveća udaljenost prijema signala koji se u jednom koraku odbija od sloja E može iznositi do 1400 M. Za rasprostiranje na takvu udaljenost signal iz predajnika izlazi skoro u horizontalnoj ravnini. Najveća udaljenost prijema signala koji se u jednom koraku odbija od sloja F može biti oko 2500 M. Signal emitiran na niskim frekvencijama može se, efektom valovoda kao površinski val, rasprostirati na mnogo veće udaljenosti.

Prostorni val koji se odbio od ionosfere i promijenio fazu može interferirati s valom koji se širi površinski. Smetnje koje se pritom javljaju zovu se **pogreške polarizacije**. U vrijeme blizu izlaza ili zalaza Sunca, kad se u ionosferi događaju najintenzivnije promjene, ova pogreška postane najveća. Ta se pojava zove **noćni efekt**.

Lom radiovalova (difrakcija).

Kad radioval naide na prepreku, dio se njegove energije odbija ili apsorbira uzrokujući zasjenjenje iza prepreke. Ipak dio energije prodire i iza prepreke zbog pojave koja se zove **lom** ili **difrakcija**. Ova se pojava objašnjava Huygensovim pravilom koje govori da je svaka točka na frontu vala poseban izvor radijacije a koji emitira energiju u svim smjerovima ispred radiovala. Ovo svojstvo radio vala nije vidljivo sve do trenutka dok front vala ne naide na prepreku. Kad val naide na prepreku iz svake točke rasipa se energija od koje dio prodire i u prostor djelomicno iza prepreke. Tako se manji dio energije povija u sjenu prepreke (slika 4). U području sjene formiraju se alternativne zone u kojima se komponente radiovala koji se povija s obje strane prepreke interferiraju. Praktični efekt ove pojave je značajno slabljenje snage signala i veli smetnje neposredno u sjeni iza prepreke.



Slika 4. Lom radio vala

Utjecaj difrakcije obrnuto je proporcionalan frekvenciji i veci je što je frekvencija niža.

Absorpcija i rasipanje radiovalova

Amplituda radio vala koji se širi prostorom mijenja se s udaljenošću rasprostiranja i postaje sve manja što je udaljenost rasprostiranja veća. Slabljenje snage s udaljenošću zove se **rasipanje**. U normalnim uvjetima rasipanje u atmosferi veće je nego u slobodnom prostoru.

Rasprostiranjem po površini Zemlje radio val predaje nešto vlastite energije površini preko koje se rasprostire. Kao rezultat gubitka energije front vala povija se prema dolje, što uzrokuje još veću absorpciju. Gubitak energije je to veći što je površina preko koje se val rasprostire slabiji električni vodič. Rasprostiranjem preko morske površine val gubi relativno malo energije s obzirom da je more dobar vodič za niske frekvencije. Zbog toga se površinski valovi niskih frekvencija mogu preko morske površine rasprostirati na velike udaljenosti.

Prostorni val prolazom kroz ionizacijske slojeve gubi više energije. Gubitak ovisi o intenzitetu ionizacije i frekvenciji vala. Najveći gubici su kod frekvencije 1.400 kHz.

Opcenito, atmosferska absorpcija raste s frekvencijom. Problemi su posebno izraženi kod SHF i EHF frekventnim područjima. Kod tih frekvencija absorpcija je pojačana i rijetkom atmosferom, vlagom, vodenom parom i kišnim oblacima.

Smetnje

Pojava nepoželjnih šumova zove se interferencija. Namjerno izazivanje interferencija u svrhu onemogućavanja zloupotreba radiofrekvencija zove se **ometanje (jamming)**. Neželjene interferencije zovu se **smetnje**.

Smetnje nastaju izvan prijemnika. Šum je najčešće rezultat indukcija radiovalova bliskih frekvencija. Pojava je jednaka na svim frekventnim područjima.

Smetnje mogu uzrokovati i prirodne pojave ili rad strojeva, iskrenje, sustavi za grijanje ili ostali uređaji i strojevi koji koriste električnu struju.

Prirodni šumovi su uzrokovani statičkim električnim u atmosferi. Ti se šumovi nazivaju **atmosferske smetnje**. Ekstremni primjer su elektromagnetske oluje poznate pod nazivom **Vatra svetog Elma** koja se manifestira kao iskrenja na vrhovima jarbola, krajevima dizalica ili samarica itd.

Svojstva antene

Izgled i orijentaciju antene određuju svojstva propagacije radiovalova. Kod horizontalno položenih predajnih antena najjači signal rasprostire se okomito na položaj antene. Kod vertikalnih štapnih odašiljackih antena signal se rasprostire na sve strane horizonta jednakom snagom. Kod takvih antena signal se najbolje prima ako je i prijemna antena vertikalno orijentirana.

Radio signali nižih frekvencija emitiraju se interakcijom površine Zemlje i antene. Za štapne vertikalne antene veća djelotvornost postiže se većom duljinom antene. Za štapne horizontalne antene veća djelotvornost postiže se udaljenošću između antene i površine Zemlje. Najdjelotvornija emisija postiže se antenom čija je dužina jednaka polovini valne dužine (λ). Zbog toga valovi nižih frekvencija zahtijevaju antene vrlo velikih dimenzija, na primjer, radio val frekvencije 10 kHz ima valnu dužinu od 30 km, pa bi optimalna dužina antene morala biti 15 kilometara. Dužine antena radio valova niskih frekvencija obratno razmjerna višekratnicima valne dužine ($\lambda/4$, $\lambda/8$, $\lambda/16$ itd). Drugim riječima kod radiovalova nižih frekvencija dužina antene nije optimalna.

Na visokim frekvencijama Zemlja se ne koristi kao provodnik već su oba dipola smještena na anteni. Time se ne samo poboljšava djelotvornost antene već se postiže i veća snaga signala. Snaga primljenog signala obrnuto je proporcionalna kvadratu udaljenosti prijemne od predajne antene, pod uvjetom da ne postoji rasipanje ili absorpcija.

Domet

Domet do udaljenosti na kojoj se signal može ispravno (krajnji domet) ovisi o snazi predajnika, osjetljivosti prijemnika, frekvenciji, području rasprostiranja, razini smetnji i drugim mogućim faktorima. Za jednaku snagu predajnika površinski kao i prostorni val imaju veći domet što su više valne dužine, odnosno što su niže frekvencije, ali to u velikoj mjeri ovisi o dužini predajnih antena. Kod vrlo visokih i ultra visokih frekvencija korisno se može koristiti samo direktni val čime je domet ograničen, a na prijenos mogu utjecati svi spomenuti elementi. Zbog toga se danas glavna komunikacija odvija na optičkim vidljivostima, a za prijenos na daljinu koriste se posredne primopredajne stanice (releji). U tu svrhu danas se koriste guste kopnene i obalne mreže te mnogobrojni satelitski sustavi koji osiguravaju međusobnu optičku vidljivost.

Svojstva frekventnih područja

Propagacija (rasprostiranje) radio valova funkcija je frekvencije, tako da svako frekventno područje ima posebna svojstva koja određuju propagaciju. U slijedecem pregledu kratko su opisana svojstva pojedinih frekventnih područja.

Vrlo niska frekvencija (Very low frequency – VLF, 10 kHz do 30 kHz): signal emitiran na VLF rasprostire se u međuprostoru između površine Zemlje i ionosfere, pa se efektom valovoda može prenijeti na ekstremno velike udaljenosti (na primjer OMEGA). Lom vala je najveći. Zbog velikih valnih dužina antene moraju biti ekstremno dugacke. Magnetske oluje imaju male utjecaje na rasprostiranje, ali interferencije zbog atmosferskih utjecaja mogu uzrokovati ozbiljne smetnje. Signali se mogu primati i ispod površine mora.

Niska frekvencija (Low Frequency – LF, 30 kHz do 300 kHz): porastom frekvencije na LF frekventno područje smanjuje se difrakcija, rasipanje kao funkcija udaljenosti više je nego kod VLF, a domet kao funkcija snage manji. Ipak, ovo je frekventno područje mnogo više u uporabi zbog lakše prilagodbe antena. Široko korištena frekvencija za impulsne signale kreće se oko 100 kHz. Rasprostiranje je moguće do 1500 km, u određenim okolnostima i 2000 km. Frekvencije ovog frekventnog područja koristi hiperbolični sustav Loran C, a najviše se koristi i kod obalnih radio farova.

Srednje frekventno područje (Medium Frequency – MF, 300 kHz do 3 MHz): mnogo je u uporabi kod komunikacija, pokriveno je gustom mrežom obalnih stanica, omogućava kvalitetan prijenos informacija ali domet ovog frekventnog područja vrlo je ograničen i kreće se od 400 M na donjem frekventnom području do 15 M na gornjem za signal emitirane snage 1 kW. Dometi u mnogom ovise i o prilagodjenosti antene i vrsti terena preko kojeg se signal širi. Na nižem frekventnom području može se rasprostiti kao prostorni val i to danju i noću. Porastom frekvencije ionosfera se povećava i postaje najveća kod frekvencije 1400 kHz. Prostornom propagacijom u više koraka domet se može povećati i do 8000 M za signal emitirane snage od 1 kW. Općenito ovo je područje dovoljno pouzdano danju i noću, ali na donjoj razini frekvencije (300 kHz) pouzdanije je noću.

Visoka frekvencija (High Frequency – HF, od 3 MHz do 30 MHz): budući da se s višim frekvencijama domet površinske propagacija radio valova smanjuje, površinsko rasprostiranje valova visoke frekvencije ograničeno je na sasvim kratke domete od svega nekoliko milja, ali mnogo bolja može omogućiti veći domet direktnog vala. Također dužina antene uzrokuje efekt koji omogućava vrlo velik domet prostornim valom što ovisi o visini antene. Najbolja uporabljiva frekvencija (MUF) uglavnom pada u HF frekventno područje. Danju to područje može varirati između 10 MHz i 30 MHz, a noću od 8 MHz i 10 MHz. Ova se frekvencija najčešće upotrebljava za komunikacije brod – brod, brod – kopno i kopno – brod. U sustavu GMDSS u funkciji upozoravanja u najširoj su uporabi DSC frekvencije na bendovima 4 MHz, 6 MHz, 8 MHz, 12 MHz i 16 MHz.

Vrlo visoka frekvencija (Very High Frequency – VHF, od 30 MHz do 300 MHz): komunikacije su ograničene na direktni val ili kombinaciju direktnog vala i vala odbijenog od površine Zemlje. Veći domet efikasno se postiže podizanjem antene na veću visinu. Rasipanje je mnogo manje nego kod nižih frekventnih područja, ali je mnogo izraženije ako val naide na smetnje kao što su planinski vrhovi i brda. U idealnim situacijama i prostorno rasprostiranje je vrlo djelotvorno, ali se to rijetko događa. Interferencije zbog ionosferskih smetnji su beznačajne. Vrlo se mnogo koristi u pomorskim komunikacijama, s međunarodnim frekvencijama 156,8 MHz za komunikacije pogibelji (16 kanal) i 156,525 MHz za DSC poziv pogibelji (70 kanal).

Ultra Visoke Frekvencije (Ultra High Frequency – UHF, od 300 MHz do 3 GHz): na ovim frekvencijama ne postoji prostorni val jer ionosfera ne reflektira frekvencije ovog valnog područja, tako da se radio val bez gubitaka energije probije kroz ionosferu i rasprostire se u slobodan prostor. Iz tog se razloga ove frekvencije koriste kao direktni valovi za vrlo velike udaljenosti prema satelitima (INMARSAT, GPS). Koriste se kao površinski, kvazipovršinski i direktni valovi iako se nižim slojevima atmosfere javljaju interferencije. Zbog refrakcije radio horizont je oko 15% veći od morskog. Ne javlja se ni fejdging. Može se koristiti za komunikacije brod – brod, brod – kopno i kopno – brod.

Super Visoka Frekvencija (Super High Frequency – SHF, od 3 GHz do 30 GHz): ove frekvencije imaju valne dužine koji se izražavaju centimetrima, pa se nazivaju mikrovalnim frekventnim područjem. Ne javlja se interferencija ni posebno izražene atmosferske smetnje, kao ni rasipanje. Izražena je refleksija od oblaka, vodene pare, čestica prašine, ledenih čestica i ostalih atmosferskih sadržaja, tako da se ovo frekventno područje koristi u svim oblicima radarske tehnike. Kod povoljnih uvjeta izražen je površinski fejdging. Pomorski radar koristi frekvencije od 3 GHz (valna dužina 10 cm) na S bandu i 10 GHz (valna dužina 3 cm) na X bandu.

Ekstremno visoke frekvencije (Extremely High Frequency – EHF, od 30 GHz do 300 GHz): nema fejdginga, interferencije, rasipanja. Koriste se kao direktni i kvazipovršinski valovi. Izražena je apsorpcija u atmosferi, što predstavlja prepreku u komunikacijskoj tehnici.

Pravna regulacija korištenja frekvencija

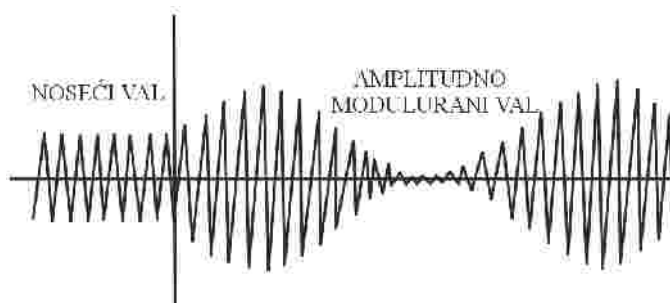
Osim tehničkih svojstava frekventnih područja, zbog izvanredno velike primjene u komunikacijama kao i u brojnim drugim djelatnostima nužna je i zakonska regulacija kod korištenja frekvencija. Raspodjelu frekvencija obavlja specijalizirana ustanova Ujedinjenih Naroda **ITU (International Telecommunication Union)**. Nacionalne ustanove dijele frekventna područja u skladu s odredbama ITU-a. Ponekad se može dogoditi da su brodskim stanicama dodijeljena toliko bliska frekventna područja koja izazivaju interferencije. Neke su frekvencije izdvojene i služe točno određene svrhe, na primjer frekvencije 2182 kHz, 2187,5 kHz, 156,8 MHz, 156,525 MHz, 406 MHz itd. Za globalne navigacijske sustave koriste se takve izdvojene frekvencije.

1. 2. Tipovi radio emisija

Serijski valovi emitiranih na stalnoj frekvenciji zovu se **kontinuirani val (continuous wave – CW)**. Takav val može biti izravno korišten u nekim oblicima (na primjer kod radiotelegrafije, radio goniometra ili faznog hiperbolicnog navigacijskog sustava Decca), ali mnogo češće se na neki način prilagođava frekvencijama koje sadrže potrebne informacije. Tada se takav val zove **noseći val**, a postupak prilagodbe zove se **modulacija**.

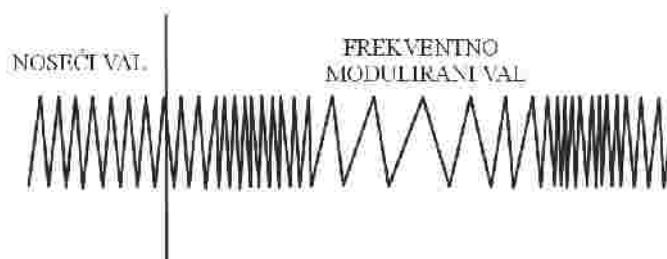
Vrst modulacije određuje vrijednost kojoj se noseći val prilagođava, tako da postoji amplitudna, frekventna i fazna modulacija, a poseban oblik predstavlja impulsna modulacija, naročito u najnovije vrijeme.

Amplitudna modulacija (Amplitude Modulation – AM) je vrst modulacije kad se amplituda nosećeg vala prilagođava amplitudi vala koji sadrži informaciju. U toj vrsti modulacije u modulatoru se miješaju amplitude nosećeg i vala koji sadrži informaciju, te se u prostor emitiraju superponirane (zbrojene) vrijednosti amplituda. Da bi se izdvojila korisna informacija u demodulatoru prijemnika iz moduliranog radio vala izdvaja se amplituda nosećeg vala, a preostala vrijednost se, nakon mnogostrukog povećanja, pretvara u audio ili video signal koji sadrži korisnu informaciju. Ova vrst modulacije najčešća je u radiotelefonskoj komunikaciji, ali i u mnogim drugim vrstama prijenosa informacija na daljinu (slika).



Slika 5. Amplitudna modulacija

Frekventna modulacija (Frequency Modulation- FM) je vrst modulacije kad se u modulatoru frekvencija nosećeg vala prilagođava frekvenciji radnog vala (vala koji sadrži informaciju). U demodulatoru prijemnika iz primljenog vala izdvaja se frekvencija nosećeg vala a preostala vrijednost se, nakon višestrukog pojačanja, pretvara u informaciju.



Slika 6. Frekventna modulacija

Fazna modulacija (Phasic Modulation – PhM) je vrst modulacije u kojoj se u modulatoru prilagodavaju faze nosećeg i radnog vala.

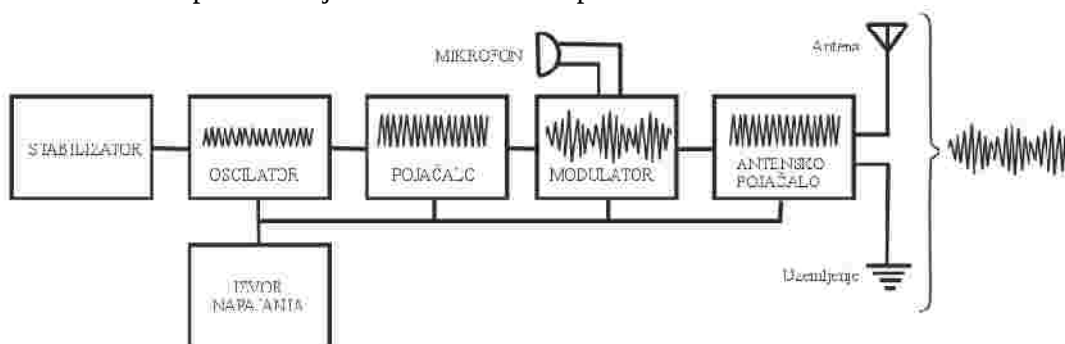
Impulsna modulacija (Pulse Modulation – PM) je modulacija po vremenu. U ovoj vrsti modulacije emitiraju se vrlo kratki impulsi nosećeg vala međusobno odijeljeni relativno dugim periodima tišine (slika 7). Ova se vrst modulacije koristi, na primjer, kod Lorana C.



Slika 7. Impulsna modulacija

Predajnici

Opcenito predanik je sastavljen od izvora napajanja, oscilatora koji pretvara električni tok u noseći val, sklop koji nadzire stabilnost frekvencije, pojačala, modulatora, antenskog pojačala i antene. Ako se prenosi govor, nužan dio predajnika je i mikrofoni iz kojeg se signali uvode u modulator. Modulirani signal pojačava se antenskim pojačalom, a iz antene impuls se emitira u prostor. Djelovi su shematski prikazani na slici 8.



Slika 8. Blok shema osnovnih elemenata predajnika

Prijemnici

Kad se radio val kreće preko vodica u njemu se inducira električni tok. Radio prijemnik je uređaj koji registrira induciranu snagu u prijemnoj anteni i pretvara je u uporabljivi oblik, na primjer audio ili video signal. Omogućava pr... signala željene frekvencije između svih koji dolaze na antenu. U demodulatoru prijemnika razdvajaju se noseća frekvencija od frekvencije koja sadrži informaciju. Iz... signal može se manifestirati u različitim varijantama: kao audiosignal na zvučniku ili razglasu odnosno kao videosignal na zaslonu katodne cijevi. Prema tome za obradu primljenog signala nužno su potrebna tri osnovna elementa: antena, prijemnik i displej.

Radio prijemnici razlikuju se prema:

- frekvencijskom opsegu na kojem rade,
- selektivnosti, odnosno mogućnosti što preciznijeg izdvajanja željenih frekventnih opsega,
- osjetljivosti, odnosno mogućnostima primanja što slabijih signala otklanjanju šumova,
- stabilnosti, odnosno svojstva da se ne mijenja kvalitet primljenog signala,
- reproduksijskoj kvaliteti ili svojstvu da su emitirani i primljeni signal što identičniji.

Prijemnici mogu imati dodatne komponente za poboljšanje prijema, na primjer automatsko biranje frekvencija, automatsko otklanjanje šumova itd.

Neke od navedenih karakteristika mogu biti u suprotnosti. Na primjer, preosjetljivi prijemnik može, kao smetnju, primati i neželjene signale. Ta se pojava zove **prelijevanje (spillover)**, a posljedična interferencija **križani govor (crosstalk)**.

Primopredajnik (transponder) je uređaj koji sacinjavaju predajnik i prijemnik u jednom sklopu. Istovremeno omogućava emitiranje i primanje radiosignala.

1. 3. Planirani razvoj elektroničke navigacije

U.S. Federal Radionavigation Plan

Američki *Federalni radio navigacijski plan (Federal Radionavigation Plan - FRP)* donio je U.S. Departments of Defense and Transportation (Ministarstvo obrane i prometa). Planom je definirana politika razvoja elektroničkih navigacijskih sustava u skladnosti s nacionalnim interesima SAD i raspoloživim resursima. P...ivilnih i vojnih navigacijskih sustava, kako postojećih tako i onih koji se tek planiraju razvijati, a odnosi se na pomorsku, zračnu, kopnenu i svemirsku navigaciju. Izradio ga je *National Technical Information Service, Springfield, Virginia*.

Prvi put plan je predstavljen 1980. kao dio izvješaja Kongresu. Međunarodni karakter dobio je dostavom IMO-u, ICAO-u (*International Civil Aviation Organization*), IALA-i (*International Association of Lighthouse Authorities*) i ostalim međunarodnim organizacijama.

U slučaju opasnosti za nacionalne interese SAD-a plan predviđa poseban nadzor nad radom svih sustava, a prema odlukama *National Command Authority*. Predviđa se rad sustava samo ako oni mogu koristiti Sjedinjenim Državama i njezinim saveznicima više nego protivniku. Operativni uredi ovlašteni su ugasiti rad sustava te izmijeniti formate ili karakteristike signala sustava za vrijeme dok traju opasnosti.

Provođenje plana stalno se nadzire, a odredbe plana dopunjuju se svake druge godine. Industrija, savjetodavne grupe i ostali zainteresirani partneri predlažu unapređenja ili poboljšanja. Predviđena je odgovornost kako za nacionalnu tako i za javnu sigurnost te ekonomski prosperitet transportnih sustava. Sustavi koje pokriva Plan su: radiofarovi, Omega, TACAN, MLS, GPS, Loran C, VOR/VOR-DME/VORTAC, ILS i Transit.

Planovi za postojeće navigacijske sustave

U nastojanju zadovoljenja potreba civilne i vojne navigacije vlada USA ustanovila je brojne i različite navigacijske sustave, a svaki je od njih bio temeljen na najnovijim tehnološkim rješenjima u vremenu kad su pojedini sustavi bili instalirani. Planom je bilo predviđeno da se svi sustavi vremenom prilagode jednom jedinstvenom sustavu kao komponente s posebnim namjenama. Sustavima koji se tim promjenama ne mogu prilagoditi predviđeno je postupno gašenje. FRP je 1992. izradio smjernice za postojeće sustave: mrežu obalnih radiofarova, Loran C, Omega, Transit, GPS i diferencijalni GPS.

Radio farovi: mreža sustava zračnih i pomorskih radio farova pružala je jeftinu uslugu avionima i brodovima kojima je omogućavala pozicioniranje sa preciznostima srednje preciznosti. Prema FRP obalni radiofarovi su bili predviđeni da u mješovitom sustavu ostanu do 2000. godine. Nakon te godine u funkciji su one stanice koje su se prenamijenile kao referentne stanice diferencijalnog GPS sustava, dok su preostale ugašene.

Loran C: Loran C je hiperbolicni sustav koji omogućava pozicioniranje na moru, u zraku i na kopnu. Koristi se u područjima s gustim prometom pomorskim ili zračnim prometom. Sustavi koji su u funkciji uz obale Sjedinjenih država i na Aljasci, s izuzetkom sustava na Havajima ostat će u primjeni do 2015. godine. Ratna mornarica prestala je koristiti Loran C 1994. godine, a sustav na Havajima je isključen.

Omega: bio je prvi sustav koji je omogućavao pozicioniranje srednjim stupnjem preciznosti) na bilo kojem dijelu globusa. Vojno korištenje sustava prekinuto je još 1994. a u civilnoj se navigaciji sustav održao do 2005. godine kad je ugašen.

Transit: sateliti sustava Transit potpuno prestaju s radom u prosincu 2006.

GPS: početkom tisućljetca postao je dominantan sustav za pozicioniranje, kako u ratnoj mornarici (*P Code*) tako i u civilnoj (*C/A Code*). Omogućava dvije razine preciznosti:

Standard Positioning Service (SPS) je sustav pozicioniranja i tocnog vremena koji omogućava pozicioniranje s horizontalnom pogreškom manjom od 300 metara s vjerojatnošću 99,99 %, ili manjom od 100 m s vjerojatnošću 95 %.

Precise Positioning Service (PPS) omogućava ekstremno visoku točnost i koristi se samo za vojne potrebe.

Diferencijalni GPS (DGPS): ovaj je servis planiran od strane civilnih navigacijskih vladinih agencija i Ministarstva prometa (Department of Transport - DOT) a s namjerom da se poboljša preciznost sustava a bez zadiranja u PPS. Prvi je diferencijalni GPS počeo koristiti američki Coast Guard u svom obalnom moru. DGPS je sustav koji uračunavanjem razlike između koordinata određenih GPS prijemnikom i pravih koordinata referentne obalne stanice izračunava pogrešku sustava i tu informaciju proslijeđuje ostalim stanicama. Coast Guard je sustavom pokrio sve luke i cjelokupnu obalu SAD, uključujući Havaje i Velika Jezera. Sustav omogućava pozicioniranje s pogreškom između 4 m i 20 m.

Suradnja američkog Ministarstva za obranu (Department of Defense – DOD) i Ministarstva transporta (Departments of Transportation – DOT) u pogledu razvijanja navigacijskih sustava počela je još 1978. kad je potpisan Memorandum koji je dopunjavan i poboljšavan 1984. i ponovo 1990. Prepoznata je potreba da se paralelno razvijaju vojni i civilni programi elektroničke navigacije i uspostavljena suradnja u tom pravcu.

Mnogo faktora utječe na izbor navigacijskog sustava koji može zadovoljiti očekivanja korisnika kojima je potrebno ekstremno točno pozicioniranje. Svako rješenje mora zadovoljavati međunarodne standarde, a visoki troškovi instaliranja i održavanja sustava zahtijevaju pomno i dugoročno financijsko planiranje. Federal Radionavigation Plan (FRP) predvidio je da standardi GPS sustava neće zadovoljavati očekivanja svih korisnika tako da je predvidio razvoj i drugih sustava, neovisno o razvoju GPS sustava. Nakon prikupljenih iskustava iz korištenja GPS sustava bit će donesena odluka o razvoju novih sustava, ali je općenit pristup korištenje što manjeg broja sustava. Nakon početka realizacije sustava **Galileo** kojeg je pokrenula **Europska svemirska agencija (European Space Agency – ESA)** planirano je da se dva postojeća satelitska sustava GLONASS i GPS uključe, zajedno s Galileom, u sustav **GNSS (Global Navigational Satellite System)**, te da se rad svih sustava međusobno uskladi.

U skoroj budućnosti planiran je razvoj sustava koji će u mnogo većoj mjeri koristiti terestricke resurse, s obzirom da je jedan od najvećih prepreka u korištenju satelitskih sustava visoka cijena instalacije i održavanja, unatoc sigurnosti, jednostavnosti i masovnom korištenju.