

Sl. 44. Veza između polumjera područja  $r_0$  i stranice  $d_0$  istostraničnog elementarnog trokuta

točkama u mreži. Ulazna pojačala mogu unutar svog pojasa propuštanja istodobno pojačavati signale više kanala ali signali stignu na ulaz. Zbog nelinearne karakteristike ulaznog pojačala i mješaća nastaju smetnje zbog intermodulacije. Veza između ulaznog  $x$  i izlaznog napona  $y$  nelinearnog sklopa može se prikazati redom potencija:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots \quad (122)$$

Ako se na ulazu pojave tri signala s frekvencijama  $f_1, f_2$  i  $f_3$ , ukupni je signal

$$x = U_1 \cos 2\pi f_1 t + U_2 \cos 2\pi f_2 t + U_3 \cos 2\pi f_3 t, \quad (123)$$

gdje su fazni kutovi izostavljeni, jer ne utječu na spektralnu raspodjelu. Uvrštavanjem jednadžbe (123) u (122) pojavit će se velik broj signala na svim mogućim kombinacijama frekvencija, od kojih su za planiranje radiokanala važne kombinacije frekvencija trećeg reda:  $2f_1 - f_2, 2f_1 - f_3, 2f_2 - f_1, 2f_2 - f_3, 2f_3 - f_1, 2f_3 - f_2, f_1 + f_2 - f_3, f_1 + f_3 - f_2$  i  $f_2 + f_3 - f_1$ . Ako su kombinacije frekvencija jednake frekvenciji korisnog signala  $f_k$ , nastat će smetnje zbog intermodulacije. Sve se navedene kombinacije frekvencija trećeg reda mogu obuhvatiti jednom jednadžbom:

$$f_k = f_p + f_q - f_r. \quad (124)$$

Spektralno gledano, kanali su poredani jedan do drugoga, pa je frekvencija kanala s rednim brojem  $n$

$$f_n = f_0 + n \Delta f, \quad (125)$$

gdje je  $\Delta f$  razmak kanala. Iz jednadžbi (124) i (125) slijedi uvjet za nastajanje smetnje zbog intermodulacije:

$$k - p = q - r, \quad (126)$$

gdje su  $k, p, q$  i  $r$  redni brojevi kanala. Na temelju jednadžbe (126) može se postaviti pravilo prema kojemu bi se unaprijed spriječile smetnje zbog intermodulacije. To pravilo glasi: ako se u skupini radiokanala postave sve moguće razlike rednih brojeva radiokanala i ako se sve razlike međusobno razlikuju, onda u toj skupini radiokanala ne mogu nastati smetnje zbog kombinacije frekvencija trećeg reda. Slična razmatranja mogu se provesti za smetnje zbog intermodulacija višeg reda (petog, sedmog, devetog ...), ali se u praksi one mogu gotovo uvijek zanemariti. Ako se želi načiniti skupina radiokanala slobodna od intermodulacija trećeg reda, a da se pri tome zauzme minimalan broj uzastopnih kanala, upotrebljavaju se sljedeći kanali: za skupinu od 3 kanala 1, 2 i 4, za skupinu od 4 kanala 1, 2, 5 i 7, za skupinu od 5 kanala 1, 2, 5, 10 i 12, za skupinu od 6 kanala 1, 2, 5, 11, 13 i 18, za skupinu od 10 kanala 1, 2, 8, 12, 27, 40, 48, 57, 60 i 62. Vidi se da broj zauzetih uzastopnih kanala mnogo brže raste od broja kanala slobodnih od intermodulacija, što znači da se spektar sve lošije iskorišćuje. Ako se veće geografsko područje pokriva samo iz jednog centra, gdje se zbog velikog prometa zahtijeva više radiokanala, neekonomično je slaganje skupina kanala slobodnih od intermodulacije. Ako se šire geografsko područje pokriva mrežom odašiljača, moguće je na svakoj lokaciji načiniti drugu skupinu kanala slobodnih od intermodulacije, ali tako da se u cijeloj mreži iskoriste svi uzastopni kanali.

Primjer četiriju skupina sa po četiri kanala koji su slobodni od interkanalne modulacije glasi: I. skupina 1, 3, 6 i 10, II. skupina 2, 4, 9 i 12, III. skupina 5, 8, 13 i 15, IV. skupina 7, 11, 14 i 16. Vidi se da je u mreži iskorišteno svih 16 kanala, ali to uvijek nije moguće izvesti, jer to ovisi o broju skupina i broju kanala u skupini.

**POKRETNİ RADIOKOMUNIKACIJSKI SUSTAVI**

Pokretni se radiokomunikacijski sustavi razvrstavaju na kopnene, pomorske i zračne. Kopneni su sustavi funkcionalne radiomreže koje služe određenim službama (vatrogasci, policija, hitna pomoć itd.) ili poduzećima (elektroprivreda, naftna industrija, vodoprivreda itd.), radiotelefonske mreže koje omogućuju izravni priključak na javnu automatsku telefonsku mrežu, te mreže za selektivno pozivanje osoba. Pomorski sustavi služe za vezu među plovilima i plovila s kopnom, te kao interna veza brodarskih društava ili za povećanje sigurnosti brodskog prometa. Zračni sustavi služe za vezu među letjelicama i letjelica s kontrolnim centrima na zemlji koji nadziru zračni promet. Danas postoji tendencija da se omogući zračnim i pomorskim radiovezama izravan priključak na javnu telefonsku mrežu na zahtjev putnika ili posade. Kopneni sustavi danas rade u frekvencijskim opsezima 68...88 MHz, 146...174 MHz, 450...470 MHz i 806...960 MHz. Pomorske veze ostvaruju se Morseovom telegrafijom u frekvencijskom opsegu 415...525 kHz, pri čemu je frekvencija 500 kHz rezervirana za poziv u pomoć. Frekvencijski opseg 1605...3800 kHz služi za govorne veze, a frekvencija 2182 kHz rezervirana je za poziv u pomoć. Kratkovalno područje (4...28 MHz) služi za veze Morseovom telegrafijom, telefonijom, te za teleprinterske veze, prijenos podataka i faksimila. Na obalnom području dopušten je rad u frekvencijskom opsegu 156...174 MHz, s time da je frekvencija 156,8 MHz rezervirana za poziv u pomoć. Civilne zračne veze rade u frekvencijskom opsegu 117,975...136 MHz, a za daleke veze, npr. preko oceana, u kratkovalnom području. U posljednje se vrijeme za pomorske i zračne veze uvodi prijenos preko satelita, a istražuju se i mogućnosti upotrebe satelita i za kopnene mreže (v. *Telekomunikacije, satelitske, i radioastronomija*). Grubu podjelu frekvencija do frekvencije od 1 GHz s obzirom na maksimalne udaljenosti pokretne od bazne radiostanice sadrži tabl. 2.

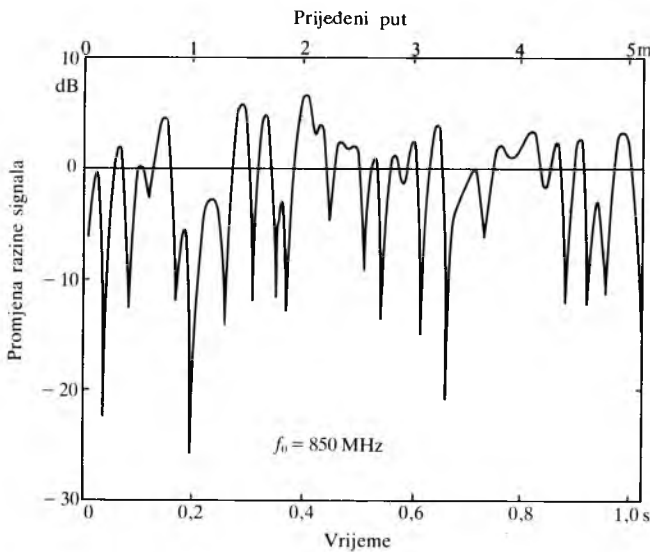
Tablica 2  
NAJPOVOLJNIJI FREKVENCIJSKI OPSEZI ZA POKRETNİ VEZE

Udaljenosti između pokretne i bazne radiostanice km	Najpovoljniji frekvencijski opseg MHz
> 160	2...30
do 160	30...50
do 80	50...100
do 50	100...300
do 30	300...500
do 20	500...1000

**Posebnosti u rasprostriranju elektromagnetskog vala u pokretnim radiokomunikacijama.** Za kopnene je radiokomunikacije teorijski, a zatim i eksperimentalno, utvrđeno da se prostorna raspodjela električnog polja, a to znači vremenska razdioba signala koje primaju antene vozila u pokretu, može matematički vrlo dobro opisati superpozicijom Rayleighove i logaritamske normalne razdiobe. Naime, već prema mikrolokaciji vozila, signal na ulazu prijavnika podložan je u kraćim vremenskim intervalima brzim i velikim fluktuacijama (Rayleighova razdioba) oko srednje vrijednosti, dok je za duže vremenske intervale srednja vrijednost tih kratkotrajnih varijacija podložna logaritamskoj normalnoj razdiobi. Vremenska ovisnost anvelope signala vala nosioca na ulazu prijavnika prikazuje skica na sl. 45, a odnosi se na kraći vremenski interval. Vrijeme na apscisi ovisi o brzini vozila i frekvenciji vala nosioca. Zbog refleksije od Zemljine površine, a i od okolnih objekata, signal se na mjestu prijama sastoji od niza valova koji od odašiljača do prijavnika prijeđu

različite udaljenosti. Između njih mogu nastati razlike u vremenima kašnjenja s obzirom na odaslani signal, a tipične su vrijednosti od dijela mikrosekunde pa do nekoliko mikrosekundi, već prema bližem okolišu pokretne stanice. Zato je uveden pojam *koherentnog frekvencijskog pojasa* koji se definira kao onaj frekvencijski pojas unutar kojeg su krivulje kolebanja signala, kao na sl. 45, za pojedine frekvencije bliskih valova nosilaca gotovo identične, što znači da postoji velika korelacija (0,9 ili veća) između kolebanja tih signala. Za gradska područja koherentni je frekvencijski pojas veći od 40 kHz, a za prigradska naselja veći i od 250 kHz. Kako danas normirana širina radiokanala iznosi 25 kHz, sve su komponente u spektru podložne identičnim fluktuacijama i ne postoji selektivni feding koji bi ugrozio kvalitetu prijenosa. Osim funkcije razdiobe, pri utvrđivanju kvalitete prijenosa važne su još dvije statističke veličine: očekivani broj  $N_R$  prolaza u pozitivnom smjeru kroz određenu razinu signala u jednoj sekundi te srednje trajanje  $\bar{\tau}_R$  fedinga, tj. vremenski interval u kojem je signal manji od određene razine. Da bi se dobili općeniti izrazi, obje se veličine normaliziraju na maksimalnu Dopplerovu frekvenciju, koja nastaje kada se vozilo giba u istom smjeru kao i elektromagnetski val. Dopplerova frekvencija iznosi

$$f_D = \frac{v}{\lambda} \quad (127)$$



Sl. 45. Krivulja kolebanja razine anvelope signala na ulazu prijarnika radiostanice na vozilu u pokretu kao funkcija prijedjenog puta, odnosno proteklog vremena

Na sl. 46 i 47 nacrtane su teorijske krivulje normaliziranog broja prolaza  $N_R/f_D$  i normalizirano srednje trajanje fedinga  $f_D \bar{\tau}_R$ . Obje se krivulje izvanredno slažu s eksperimentalnim rezultatima. Iz slika se vidi da se za relativne razine signala manje od -10 dB krivulje mogu aproksimirati pravicima, tj. izraziti sljedećim jednadžbama:

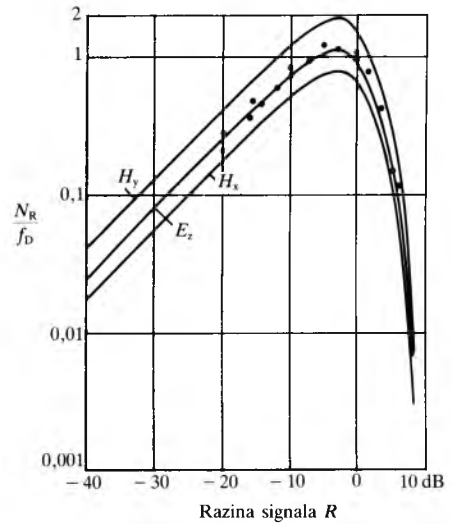
$$N_R = \sqrt{2\pi} \frac{v}{\lambda} 10^{\frac{R/dB}{20}}, \quad (128 a)$$

$$\bar{\tau}_R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{v} 10^{\frac{R/dB}{20}}, \quad (128 b)$$

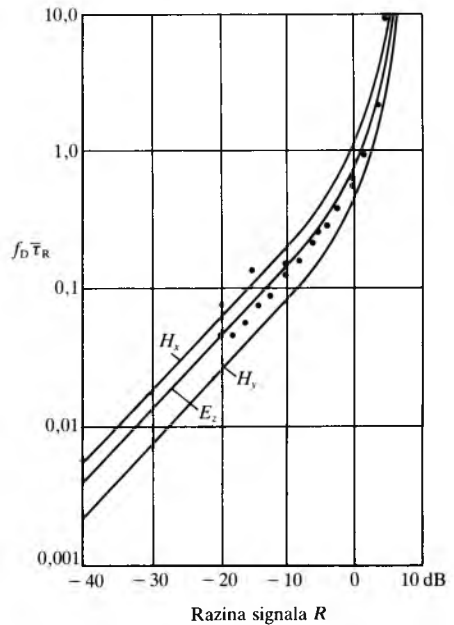
gdje je razina signala u decibelima

$$R = 20 \lg \frac{E}{E_0}, \quad (129)$$

a  $E_0$  efektivna vrijednost jakosti električnog polja (ili signala). Statistička svojstva anvelope signala prema sl. 45 mogu se izraziti još i autokorelacijskom funkcijom, koja je teorijski jednaka kvadratu Besselove funkcije nultog reda i ovisi o normaliziranoj varijabli  $f_D \tau$ , što je prikazano na sl. 48.

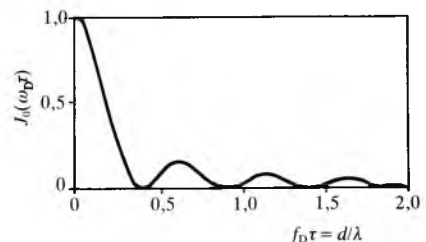


Sl. 46. Teorijska krivulja normaliziranog broja prolaza  $N_R/f_D$  anvelope komponenta jakosti električnog i magnetskog polja u sekundi u pozitivnom smjeru kroz razinu R



Sl. 47. Teorijska krivulja srednjeg normaliziranog trajanja fedinga  $f_D \bar{\tau}_R$  za komponente jakosti električnog i magnetskog polja kao funkcija razine R

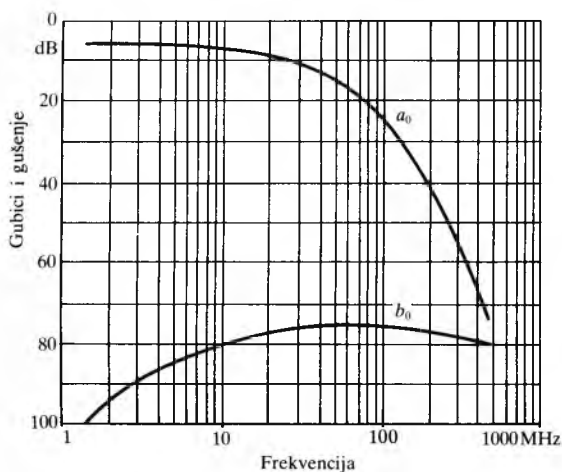
Da bi se smanjilo trajanje i dubina fedinga, dakle poboljšala statistička svojstva signala, može se upotrijebiti tzv. diverzitska tehnika. Ona se sastoji u tome da se modulacijski signal (ista poruka) prima preko dvaju ili više prijenosnih putova. Za pokretne radiokomunikacije ne dolazi u obzir frekvencijski diverzitski prijam zbog ograničenog broja raspoloživih radiokanala. Vremenski diverzitski prijam ima smisla za prijenos digitalnih signala, ali za prijenos govora



Sl. 48. Autokorelacijska funkcija anvelope signala prema sl. 45 u ovisnosti o prijedjenom putu d

nije upotrebljiv. Prema tome, preostaje prostorni diverzitski prijam, uz uvjet da na prostorno razmaknutim antenama nema korelacije između trenutnih amplituda signala koji se primaju istodobno. Za bazne radiostanice taj je uvjet zadovoljen ako je razmak antena najmanje sto valnih duljina vala nosioca. Za najviše frekvencije koje se upotrebljavaju za pokretne radiokomunikacije to bi iznosilo oko 30 m, što se bez problema može ostvariti za bazne stanice. Kad se stanice nalaze na vozilu, taj se razmak ne može ostvariti, ali se na temelju autokorelacijske funkcije na sl. 48 može zaključiti koliki put treba antena vozila prijeći da autokorelacijska funkcija bude malena. Ako je, naime, za vremenski razmak  $\tau$  autokorelacijska funkcija malena, znači da postoji vrlo mala korelacija između bilo kojih dviju trenutnih amplituda signala vremenski razmaknutih za  $\tau$ , što odgovara prostorno određenom prijednom putu  $d$ . Ako se, dakle, na razmaku  $d$  postavje dvije antene, signali su na njihovim stezaljkama nekorelirani i mogu se upotrijebiti za diverzitski prijam. Iz sl. 48 vidi se da je taj minimalni razmak antena  $f_D \tau = d/\lambda = 0,5$ . Tada se može primijeniti samo sekvencijski diverzitski prijam, tj. biranje signala s izlaza samo jedne antene. Simultani diverzitski prijam koji radi na principu superpozicije signala obiju antena nije moguć. Kada se, naime, dvije bliske antene s kružnim zračenjem spoje zajedno, dobiva se antenski sustav s novim usmjerenim dijagramom zračenja, jer su signali iz obiju antena na sumatoru međusobno čvrsto fazno vezani. To znači da je to opet samo jedna antena, ali s dijagramom zračenja koji nije kružan, dakle ne postoje dva kanala i nema diverzitskog prijama. Za sekvencijski prijam prebacuje se prijatelj s jedne na drugu antenu kad signal padne ispod unaprijed namještene razine ili se uvijek prebacuje na onu antenu koja ima veću amplitudu signala.

Poseban je problem održavanja radioveza u tunelima. Elektromagnetski val prodire u unutrašnjost tunela ovisno o frekvenciji, ali se nakon  $\sim 50$  m veza redovito prekida ako bazna stanica nije smještena u blizini ulaza tunela. Postoje dva načina pokrivanja tunela poljem dovoljne jakosti za kvalitetan prijam. Jedan je klasični način postavljanja baznih stanica s usmjerenim antenama na određenim razmacima u tunelu. To je prikladnije za frekvencije više od nekoliko stotina megaherca. Ako tunel nije previše zakrivljen, mogu se jednom baznom stanicom pokriti dionice duljine i do 2 km. Drugi je način da se uzduž tunela ugradi posebna vrsta kabela koji po cijeloj svojoj duljini djelomično zrači, a djelomično vodi elektromagnetski val. Takav se kabel postavlja na zid tunela 3...4 m iznad tla ili na sredinu svoda tunela da bude što bliže anteni na vozilu. To su koaksijalni kabeli koji uzdužno imaju ili prorez na oklopu ili niz malih otvora različitog oblika i rasporeda, ili je pak oklop kabela ispletan od tankih žica, ali ne pregusto, tako da postoji rasipno polje izvan kabela. Takav kabel ima veće gušenje nego obični



Sl. 49. Gubici zbog sprege  $b_0$  i gušenja  $a_0$  po duljini jednog tipa koaksijalnog kabela s nizom malih otvora na oklopu, u ovisnosti o frekvenciji

koaksijalni kabel zbog djelomičnog zračenja, pa je potrebno u pravilnim razmacima postaviti pojačala da kompenziraju to gušenje. Uz pravilno dimenzioniranje odsječaka kabela i pojačanja može se osigurati kvalitetna veza. Razmak pojačala određuju gušenje kabela po duljini i gubici zbog sprege između kabela i antene na vozilu. Ako se kao karakteristična vrijednost  $S$  sustava definira razlika razina između ulaza pojačala i zahtijevanoga minimalnog ulaza u prijatelj na vozilu, može se maksimalna duljina  $L_{max}$  zračećeg koaksijalnog kabela između dvaju pojačala odrediti iz jednadžbe

$$S = a_0 L_{max} + b_0, \quad (130)$$

gdje je  $a_0$  gušenje po duljini kabela, a  $b_0$  su gubici zbog sprege (sl. 49). Gušenje se kabela mijenja (povećanje do 15%) u ovisnosti o onečišćenju i vlažnosti atmosfere, pa se ne smiju ugrađivati pojačala s konstantnim pojačanjem, jer bi se u nepovoljnim uvjetima nedovoljno pojačanje akumuliralo te bi signal u velikom dijelu tunela bio ispod dopuštene razine. Zbog toga se najčešće u svako drugo pojačalo ugrađuje automatska regulacija pojačanja koja se ugađa pilotnim signalom izvan radiokanala.

### Radiomreže

**Problem optimizacije.** Procjena iskorištenja i eventualna optimizacija radiotelefonske mreže mogu se provesti ako se definira koeficijent djelotvornosti. Dobro iskorištenje nekog frekvencijskog opsega ne ovisi samo o njegovoj podjeli na određeni broj užih ili širih radiokanala (koji ovisi o modula-cijskom postupku), već i o mogućnosti da se na određenoj geografskoj udaljenosti ponove isti kanali te o prosječnom vremenu zaposjedanja pojedinog kanala. Prema tome, ukupni je koeficijent djelotvornosti definiran izrazom

$$\eta = \eta_s \cdot \eta_P \cdot \eta_T, \quad (131)$$

gdje se indeksi odnose na parcijalne koeficijente djelotvornosti s obzirom na spektar  $S$ , prostor  $P$  i vrijeme  $T$ . Koeficijenti se djelotvornosti određuju prema zamišljenom, po volji odabranom referentnom sustavu. Spektralni je koeficijent djelotvornosti

$$\eta_s = \frac{\Delta f_i}{\Delta f}, \quad (132)$$

gdje su  $\Delta f_i$  i  $\Delta f$  širine kanala referentnog i razmatranog sustava. Prostorni koeficijent djelotvornosti jednak je broju istokanalnih područja koja postoje na geografskom području jednake površine u razmatranom i referentnom sustavu, pa je

$$\eta_P = \left( \frac{D_i}{D_0} \right)^2, \quad (133)$$

gdje su  $D_i$  i  $D_0$  srednji razmaci istokanalnih baznih stanica u referentnom i razmatranom sustavu. Vremenski je koeficijent djelotvornosti omjer prometa koji se može prosječno prenijeti jednim kanalom u razmatranom i referentnom sustavu, uz istu geografsku gustoću (površinsku gustoću) ponuđenog prometa, pa je

$$\eta_T = \frac{A}{\frac{M(A, B)}{A_i} \cdot \frac{M_i(A_i, B_i)}}{M_i(A_i, B_i)}, \quad (134)$$

gdje su  $A$  i  $A_i$  promet u glavnom prometnom satu po području razmatranog i referentnog sustava, a  $M(A, B)$  i  $M_i(A_i, B_i)$  su brojevi potrebnih kanala po području razmatranog i referentnog sustava koji omogućuju da se postignu spomenuti promet  $A$  i  $A_i$  uz gubitke  $B$  i  $B_i$ . Ukupni je koeficijent djelotvornosti prema jednadžbama (131) do (134)

$$\eta = \frac{\Delta f_i D_i^2 M_i(A_i, B_i)}{A_i} \cdot \frac{A}{\Delta f D_0^2 M(A, B)}. \quad (135a)$$

Površina paralelograma istokanalnih odašiljača ( $S_i$  i  $S_0$ ), unutar koje se svi kanali pojavljuju samo jednom, proporcio-

nalna je kvadratu srednjeg razmaka istokanalnih baznih stanica ( $D_i$  i  $D_0$ ), pa se jednadžba 135a može napisati u obliku

$$\eta = \frac{\Delta f_i S_i M_i(A_i, B_i)}{A_i} \cdot \frac{AN}{S_0 \Delta f N M(A, B)}. \quad (135b)$$

Prvi faktor odgovara referentnom sustavu i može se izjednačiti s jedinicom,  $N$  je broj područja (baznih stanica) unutar paralelograma istokanalnih odašiljača, pa je  $AN/S_0$  površinska gustoća prometa  $a$ . Kako je  $AM(A, B)$  ukupan broj kanala unutar paralelograma istokanalnih odašiljača, to je ukupno potreban spektar  $W = \Delta f N M(A, B)$ . Prema tome, koeficijent se djelotvornosti može izraziti i u obliku

$$\eta = \frac{a}{W}. \quad (136)$$

Za utvrđivanje vremenskog iskorištenja radiokanala potrebno je definirati sustav uspostavljanja veze i način kako pokretna stanica zauzima kanal. Najčešći je sustav bez čekanja, kad se poziv pokretne stanice izgubi ako su svi kanali zauzeti. U sustavu sa čekanjem postoje dvije mogućnosti: poziv pokretne stanice čeka na slobodan kanal u trajanju prosječnog razgovora, ili se čeka u redu na slobodan kanal prema redoslijedu kako nailaze pozivi.

Za dalja razmatranja definirat će se ponuđeni promet izrazom

$$A_p = C t_m, \quad (137)$$

gdje je  $C$  broj poziva, a  $t_m$  srednje trajanje razgovora. Ako se s  $B$  označi gubitak, tj. vjerojatnost da su u trenutku poziva svi kanali zauzeti, promet iznosi

$$A = A_p(1 - B). \quad (138)$$

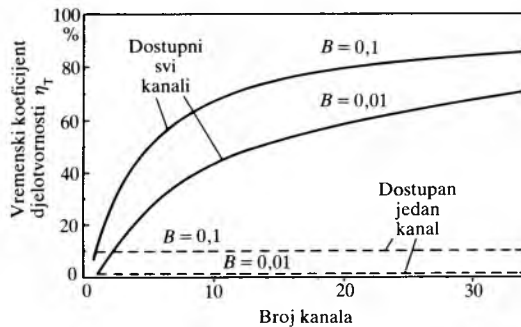
Veza između ponuđenog prometa, broja raspoloživih kanala  $n$  i gubitka poznata je kao Erlangeova formula  $B$  (v. *Teorija informacija*) koja glasi

$$B = \frac{\frac{A_p^n}{n!}}{1 + A_p + \frac{A_p^2}{2!} + \dots + \frac{A_p^n}{n!}}. \quad (139)$$

Vremenski je koeficijent djelotvornosti

$$\eta_T = \frac{A}{n}. \quad (140)$$

S porastom broja kanala koji su dostupni svim pokretnim stanicama raste vremensko iskorištenje kanala (sl. 50). Ako su pokretne stanice podijeljene u skupine tako da je svakoj skupini dostupan samo po jedan kanal, iskorištenje je maleno (crtkani pravac). Da bi vremenska djelotvornost bila što veća, trebaju, dakle, svi kanali jednog područja biti dostupni svim pokretnim stanicama.



Sl. 50. Vremenski koeficijent djelotvornosti  $\eta_T$  kao funkcija broja kanala  $n$  ako su svim pokretnim radiostanicama dostupni svi kanali, odnosno ako su pokretne stanice podijeljene u skupine tako da je svakoj dostupna samo jedan kanal

**Oblici mreža.** Za radiotelefonske i neke funkcionalne mreže potrebno je šire geografsko područje (obično cijela država) pokriveno poljem dovoljne jakosti za kvalitetan prijam. Područja su tada pravilni šesterokuti (ćelije), tako da cijela

mreža izgleda kao pčelinje saće. Bazne se stanice mogu smjestiti u središte šesterokuta s kružnim zračenjem ili zračenjem u sektorima po  $60^\circ$  (6 sektora) ili  $120^\circ$  (3 sektora). Zbog podjele na sektore potrebne su antene s usmjerenim dijagramom zračenja, što uzrokuje manje istokanalne smetnje, jer se one zrače u smjeru koji je suprotan glavnoj latici. Zbog toga se može smanjiti razmak istokanalnih odašiljača i tako povećati prostorni koeficijent djelotvornosti. Čelijski se radiotelefonski sustav može prilagoditi rastućem prometu, što je osobito važno u gradskom području. U prvoj fazi, kad je promet malen, načine se velike ćelije. S povećanjem prometa baznim se stanicama dodjeljuje sve više radiokanala dok se ne iscrpi raspoloživi spektar. Pri daljem povećanju prometa smanjuje se istodobno polumjer ćelija  $R_0$  i razmak istokanalnih baznih stanica  $D_0$ , ali tako da se omjer  $D_0/R_0$  ne mijenja. Tako se kvaliteta prijenosa zbog istokanalne smetnje ne smanjuje, ali se povećava površinska gustoća prometa, jer se tada na manjoj geografskoj površini može posluživati jednaki broj pokretnih stanica.

Površinska gustoća ponuđenog prometa u gradskim i prigradskim područjima može se znatno razlikovati, pa je radiotelefonski sustav potrebno tome prilagoditi. Postoje dva načina prilagodbe mreže. Jedan je da se ne mijenja polumjer područja u cijelom geografskom području, ali tada područjima s većom gustoćom prometa treba pridodati i više kanala. Najjednostavnije je ukupno raspoložive kanale podijeliti u dvije skupine, i to jednu s više kanala za gradska i drugu s manje kanala za prigradska područja. Drugi je način da se iskoristi nepromijenjeni broj kanala po ćeliji, a da se njen polumjer prilagodi ponuđenom prometu. Takav sustav ima povoljniji koeficijent djelotvornosti nego sustav s nepromijenjenim ćelijama, međutim, on postaje složeniji. Postoje i teškoće pri izboru kanala zbog promjenljivog razmaka istokanalnih područja. Najpovoljnije se iskorištenje dobiva kombiniranjem postupka s promjenljivim ćelijama i promjenljivim brojem kanala po ćeliji, ali su takvi sustavi vrlo složeni.

Kad je utvrđen geometrijski oblik mreže i razmak istokanalnih područja, treba svim područjima dodijeliti određeni broj kanala, već prema gustoći prometa. Kanali se moraju odabrati tako da unutar skupine kanala na užem geografskom području bude što manje smetnji. Osim istokanalnih, koje su već potisnute, najopasnije su smetnje zbog intermodulacijskih produkata trećeg reda, bilo u odašiljaču bilo u prijammiku. Najdjelotvorniji je način eliminiranja tih smetnji odabiranje skupine kanala za jedno ili više susjednih područja gdje se niti jedan produkt intermodulacije trećeg reda ne poklapa s odabranim kanalima. To se može učiniti, ali tada od ukupno raspoloživih kanala često mnogi ostaju neiskorišteni. Zbog toga treba smetnje tog tipa svesti na minimum pogodnim izborom kanala i propisanim karakteristikama uređaja. Jedan je od najpovoljnijih postupaka u tom smislu izbor skupine samo parnih, odnosno samo neparnih brojeva kanala za jedno područje, jer se tada smetnje pojavljuju samo unutar iste skupine kanala. Tako se izbjegavaju smetnje između susjednih područja zbog intermodulacije u odašiljaču i prijammiku bazne te prijammiku pokretne stanice. To je vrlo povoljno, jer u susjednim područjima između razina signala koji stvaraju te smetnje i korisnog signala nema korelacije, pa razina smetajućih signala u nekom trenutku može biti mnogo veća od razine korisnoga. Naprotiv, pri smetnjama unutar jednog područja između razine smetnje i korisnog signala postoji velika korelacija, pa su i smetnje mnogo manje od smetnja između susjednih područja. Intermodulacija u prijammiku bazne stanice koja je dominantna može se smanjiti oštrim jednokanalnim filtrima i povećanom linearnošću ulaznih sklopova. Postoji i mogućnost smanjenja snage odašiljača pokretne stanice kad dođe u blizinu prijammika bazne stanice.

Za pokretne veze na željeznici (radiodispečerski sustav), uzduž autocesta ili vodenih putova potrebno je pokrivanje samo uzduž jedne linije, pa se moraju upotrijebiti usmjerene antene, a bazne se stanice smještaju uzduž prometnica. Redovito se radi na višim frekvencijama (iznad 500 MHz), jer

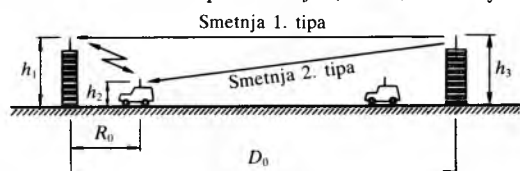
se tada lakše ostvaruju usmjerene antene, a na električnim željeznicama na tim su frekvencijama manje smetnje od iskrenja kontaktnog voda. U radiodispečerskom sustavu bazne su stanice povezane uzduž pruge kabelom koji prenosi poruke dispečerskog centra prema baznim stanicama i obratno. Bazne stanice imaju jednu prijamnu frekvenciju koja je istodobno odašiljačka za sve pokretne stanice u lokomotivama. Za odašiljače baznih stanica rezervirana su tri radiokanala tako da svaka bazna stanica ima samo jedan kanal. Međutim, u baznim stanicama uzduž pruge ti se kanali ciklički ponavljaju, dakle četvrta ima kanal prve, peta druge bazne stanice itd. Geografska je udaljenost između prve i četvrte stanice dovoljno velika pa su istokanalne smetnje potisnute. Prijamnik lokomotivske stanice koji se giba uzduž pruge automatski se prebacuje na kanal one bazne stanice u kojem se područje nalazi, tako da je dvosmjerna veza stalno osigurana. Kad je geografska konfiguracija izuzetna može se desiti da je razmak baznih stanica premalen da bi se potisnule istokanalne smetnje. Da bi se razmak povećao, kad prva i peta bazna stanica imaju isti kanal, upotrebljavaju se dvije istokanalne stanice, npr. druga i treća. Naime, dvije susjedne bazne stanice odašilju na istom kanalu u kvazisinkronom radu. Razlika frekvencija vala nosioca ne smije biti manja od nekoliko herca, a niti veća od nekoliko desetaka herca, kako nastali treptaj ne bi upao u govorni signal. U oba odašiljača modulacijski signali moraju biti istofazni i moraju proizvesti modulirane signale s jednakom devijacijom (odašiljači FM). Budući da se signal iz dispečerskog centra dovodi modulacijskim kabelom uzduž pruge (razmak baznih stanica 10...15 km), moraju se u baznoj stanici koja je bliže dispečerskom centru ugraditi elementi za izjednačivanje vremena kašnjenja odsječaka modulacijske linije do susjedne bazne stanice.

U funkcionalnim mrežama redovito se predviđa simpleksni ili semidupleksni (polidupleksni) rad koji korisniku pružaju jednake mogućnosti u komuniciranju. Tada korisnik može ili samo odašiljati ili samo primati, s time da je za simpleksni rad potreban samo jedan radiokanal, a za semidupleksni rad dva, poseban za odašiljanje i poseban za primanje. Za semidupleksni su rad za jednu vezu potrebna dva radiokanala, pa je spektralni koeficijent djelotvornosti upola manji, što upućuje na zaključak da će i ukupni koeficijent djelotvornosti biti upola manji. To ne stoji, jer treba uzeti u obzir i prostorni koeficijent djelotvornosti. Da bi se moglo uspoređivati, pretpostavit će se čelijska struktura mreže, jednaki uvjeti rasprostiranja u svim smjerovima, kružni dijagrami zračenja svih antena, te jednake ekvivalentne visine antena svih baznih i svih pokretnih stanica. Da bi se u svim područjima istodobno omogućila jedna veza, ukupni brojevi kanala za simpleksni rad  $N_1$  i za semidupleksni rad  $N_2$  iznose

$$N_1 = \frac{1}{3} \left( \frac{D_{01}}{R_0} \right)^2, \quad (141a)$$

$$N_2 = \frac{2}{3} \left( \frac{D_{02}}{R_0} \right)^2, \quad (141b)$$

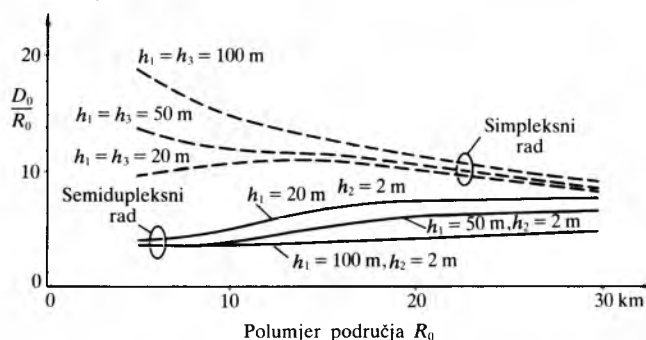
gdje je  $R_0$  polumjer svih područja, dok su  $D_{01}$  i  $D_{02}$  potrebni razmaci istokanalnih baznih stanica za simpleksni i semidupleksni rad. Da bi se odredili  $D_{01}$  i  $D_{02}$  (prostorni su koeficijenti djelotvornosti to veći što su  $D_{01}$  i  $D_{02}$  manji), moraju se analizirati smetnje između dvaju istokanalnih područja. Dominantne smetnje između istokanalnih područja mogu se svesti na dva tipa smetnja (sl. 51): odašiljač bazne



Sl. 51. Prikaz dominantnih smetnji između dvaju istokanalnih područja za simpleksni (smetnja 1. tipa) i semidupleksni (smetnja 2. tipa) rad

stanice iz jednog područja ometa u drugom, istokanalnom području prijamnik bazne stanice ili prijamnik pokretne stanice.

U prvom su slučaju ekvivalentne visine antena odašiljača i prijavnika jednake ( $h_3 = h_1$ ), dok je u drugom slučaju antena pokretne stanice smještena mnogo niže ( $h_3 \gg h_2$ ). Ako cijela mreža radi simpleksno, razmak je istokanalnih područja ( $D_{01}$ ) određen smetnjama prvog tipa. Ako radi semidupleksno, nastaju samo smetnje drugog tipa, jer se prijamna frekvencija bazne stanice razlikuje od odašiljačke. Očito je da su smetnje prvog tipa mnogo neugodnije, jer su antene smetajućeg odašiljača i smetanog prijavnika smještene relativno visoko (barem nekoliko desetaka metara iznad tla). To znači da  $D_{01}$  mora biti mnogo veći od  $D_{02}$  ako se želi na granici područja za jednak dio vremena i jednak dio lokacija postići isti omjer korisnog i istokanalnog smetajućeg signala. Na temelju krivulja rasprostiranja moguće je za isti  $R_0$  odrediti  $D_0$  ( $D_{01}$  i  $D_{02}$ ) za simpleksni i semidupleksni rad. Na sl. 52 prikazan je jedan od dijagrama ovisnosti omjera  $D_0/R_0$  o  $R_0$  za različite ekvivalentne visine antena. Kako o omjeru  $D_0/R_0$  ovisi broj potrebnih radiokanala, prema jednadžbama (141a) i (141b), može se zaključiti da je za manje polumjere područja (granica je 20...40 km) potrebno manje radiokanala za semidupleksni nego za simpleksni rad. Za veće polumjere područja, što je danas rijetko, bio bi djelotvorniji simpleksni rad.



Sl. 52. Ovisnost omjera  $D_0/R_0$  o polumjeru područja  $R_0$  za simpleksni i semidupleksni rad

**Selektivni poziv.** U jednostavnim mrežama svi su prijamnici pokretnih stanica unutar područja uključeni i istodobno primaju poruke iz bazne stanice (otvoreni poziv). Odgovara ona pokretna stanica na koju se poziv odnosi. Takav primitivan rad danas je vrlo rijedak, osim u posebnim uvjetima. Danas se redovito primjenjuje selektivni poziv, tj. određenom se kombinacijom tonskih signala poziva ona pokretna stanica s kojom se želi komunicirati. Osim toga, kad pokretna stanica poziva baznu, automatski se odašilje određeni kôd za identifikaciju, tako da bazna stanica odmah zna koja pokretna stanica zove, što veoma olakšava rad i povećava disciplinu. U radiotelefskim mrežama najčešće se jedan od kanala u području upotrebljava za pozivne signale i izmjenu drugih poruka između bazne i pokretne stanice. Same se veze održavaju na drugim kanalima unutar područja. Prednosti su selektivnog poziva što je nepotrebno trajno slušanje, nemoguće je prećuti poziv jer se na prijamniku uključuje svjetlosni ili zvučni znak ili oba, znatno je smanjeno zauzeće kanala pozivom zbog kratkog trajanja (~ 1 s) selektivnog poziva, svi su ostali prijamnici za to vrijeme blokirani i ne mogu slušati razgovor, postoji automatski odgovor, dakle identifikacija pozvanoga i mogućnost prijenosa određenih dodatnih kodiranih poruka. Jasno da zbog fedinga i smetnji nastaju pogreške, ali se one mogu smanjiti pogodnim postupcima tako da se praktički mogu zanemariti.

Selektivni poziv i identifikacija mogu se prenositi različitim signalima. Postoje sustavi s frekvencijski, odnosno impulsno kodiranim signalima. Kad su signali frekvencijski kodirani, za prijenos se kôda upotrebljava frekvencija tonskog signala. Elementi kôda mogu se prenositi simultano, sekvencijski ili kombinirano. Pri simultanom prijenosu od ukupno raspoloživa broja tonskih frekvencija prenosi se istodobno samo

nekoliko njih. Kapacitet kôda, tj. maksimalan broj ostvarivih kombinacija (sudionika u mreži), iznosi

$$C = \binom{N}{n}^k, \quad (142)$$

gdje je  $N$  broj raspoloživih frekvencija,  $n$  broj istodobno odašanih tonskih frekvencija, a  $k$  broj elemenata koji se odašilju jedan iza drugoga. Najčešće je  $N = 10$  i  $n = 1$  ili  $N = 5$  i  $n = 2$ , jer se u oba slučaja dobiva 10 kombinacija. Elementi kôda mogu se prenositi jedan iza drugoga bez stanke. To povećava vjerojatnost pogreške. Ako su, naime, dva susjedna elementa jednaka, dekoder ih može dekodirati kao samo jedan element. U nekim sustavima to se sprečava odašiljanjem frekvencije ponavljanja, što znači da je taj element u kôdu jednak prethodnome. U drugim se sustavima elementi kôda odašilju sa stankom ili se ta stanka popuni odašiljanjem rastavne frekvencije. Oba ta posljednja slučaja praktički udvostručuju trajanje kôda. Kad su signali impulsno kodirani, prenose se logičke jedinice i nule. Kako govorni kanal redovito ne može prenositi istosmjernu komponentu, iskorišćuje se dvotonski prijenos pa se kao digitalni signali upotrebljavaju dvije tonske frekvencije, vrlo često 600 i 1500 Hz. U najjednostavnijim sustavima broj impulsa u seriji predstavlja dekadnu znamenku. U složenijim sustavima broj je impulsa u seriji konstantan, pa je i broj mjesta koji se popunjava logičkom jedinicom konstantan. Tako se može detektirati pogreška, jer sve serije moraju imati jednak broj jedinica. Vrlo je česta kombinacija od 5 impulsa, uz uvjet da su dva od njih logičke jedinice. Kapacitet kôda određen je opet jednakzbroj (142) gdje je  $N$  broj impulsa u seriji,  $n$  broj logičkih jedinica, a  $k$  broj impulsnih serija.

Poziv se ispravno dekodira ako se svi elementi kôda ispravno prenesu i pravilno vrednuju u dekoderu. Vjerojatnost ispravnog prijenosa pojedinog elementa mora biti što veća, a broj elemenata što manji. Vjerojatnost ispravnog prijenosa ovisi o broju frekvencija i trajanju jednog elementa. Više frekvencija smanjuje omjer signala i šuma za svaki tonski signal, a time i vjerojatnost ispravnog prijenosa. Duže vrijeme odašiljanja povećava vjerojatnost ispravnog dekodiranja, ali je mnogo djelotvornije, npr. umjesto udvostručavanja duljine elementa, cijeli kôd još jednom nakon određenog vremena ponoviti (vremenski diverzitski prijam). Sklopovi za vrednovanje tonskih signala u dekoderu moraju biti što selektivniji, a frekvencije treba odabrati tako da se zbog nelinearnosti u prijenosu ne pojave nove frekvencije koje su jednake nekoj od postojećih frekvencija kôda. Poželjno je da su sve frekvencije kôda unutar jedne oktave.

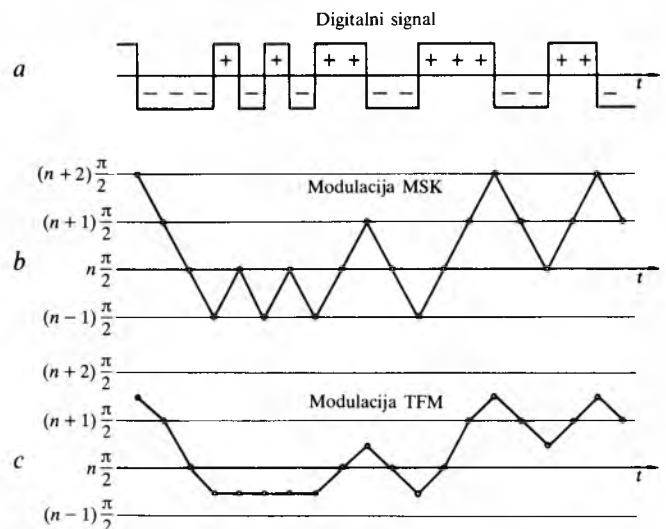
### Modulacijski postupci

Za prijenos govora i analognih signala danas se na frekvencijama višim od 50 MHz upotrebljava gotovo samo frekvencijska modulacija (FM). Kvaliteta prijenosa izražava se vrijednošću SINAD (engl. Signal to Noise and Distortion, signal prema šumu i izobličenjima) audio-frekvencijskog signala na izlazu prijamnika. Vrijednost SINAD jest omjer zbroja snaga signala, šuma i izobličenja, i zbroja snaga šuma i izobličenja. Kao normirana vrijednost osjetljivosti prijamnika uzima se ona vrijednost ulaznog signala koja na izlazu daje vrijednost SINAD od 12 dB. Postoje pokušaji da se i u to frekvencijsko područje uvede jednobočna amplitudna modulacija (SSB) za koju je dovoljan uži radiokanal, što znači mnogo veći spektralni koeficijent djelotvornosti. Međutim, zbog veće osjetljivosti na smetnje razmak bi istokanalnih područja morao biti veći, pa bi prostorni koeficijent djelotvornosti ostao praktički jednak. Zbog veće osjetljivosti na smetnje mora odašiljač SSB za isti polumjer područja imati mnogo veću snagu od odašiljača FM. To povećanje snage svih odašiljača povećava i smetnje od produkta intermodulacije trećeg reda. Očito je da za jednak domet sustavi FM imaju prednost pred sustavima SSB.

Za prijenos digitalnih signala postoje dvije mogućnosti. Prva je da se govornim kanalom sustava FM prenose podaci

pomoću modema. *Modemi* su uređaji koji unutar govornog spektra prenose nosioce modulirane digitalnim signalima. Tako se postojeći pokretni radiokomunikacijski sustavi mogu upotrijebiti za prijenos digitalnih signala. Druga je mogućnost da se u novim sustavima izravno digitalno modulira radiofrekvencijski nosilac, za što je potrebna potpuno nova koncepcija uređaja. Danas se razmatra mogućnost jedinstvenoga europskog digitalnog radiokomunikacijskog sustava, u kojemu bi se i govor prenosio u digitaliziranu obliku. Ako je govornim kanalom pomoću modema prijenos digitalan, optimalna je modulacija FFSK (engl. Fast Frequency Shift Keying, brzi pomak frekvencije pri prebacivanju). Za izravnu modulaciju radiofrekvencijskog nosioca dolaze u obzir modulacije GMSK (engl. Gaussian Minimum Shift Keying, gausovski najmanji pomak pri prebacivanju) i TFM (engl. Tamed Frequency Modulation, obuzdana frekvencijska modulacija). Modulacija FFSK zapravo je frekvencijska modulacija s indeksom modulacije 0,5, uz uvjet da je frekvencija moduliranog signala čvrsto vezana na repeticijsku frekvenciju digitalnog modulacijskog signala. Tada se skokovit prijelaz s jedne na drugu frekvenciju za frekvencijsku modulaciju digitalnim signalom događa u trenutku kad sinusoida moduliranog signala prolazi kroz nulu. Budući da nema oštih prijelaza, spektar je relativno uzak, pa je za prijenos dovoljna širina pojasa koja je 1,5 puta veća od repeticijske frekvencije digitalnog signala. Modulacija MSK (engl. Minimum Shift Keying), identična je modulaciji FFSK, ali promatrana kao promjena faze nosioca. Faza se unutar jednog bita mijenja linearno ako je promjena faze između početka i kraja svakog bita  $\pm 90^\circ$ . Modulacija GMSK ima još samo Gaussov filter, da bi se oštri bridovi na prijelazima pojedinih bitova modulacijskih signala zaoblili. U digitalnim se sustavima pojedini bitovi ili znakovi prenose u točno određenim i vremenski ograničenim intervalima. Kad se iz bilo kojeg razloga jedan bit ili znak vremenski produži i zadre u susjedne intervale, nastaje smetnja koja se naziva *međuznakovnom interferencijom*. U sustavu TFM namjerno se na kontrolirani, točno određeni način uvodi međuznakovna interferencija, pa se tako postiže sužavanje frekvencijskog pojasa potrebnog za prijenos. To je zapravo modulacija MSK u kojoj je trenutna faza određena s tri uzastopna bita. Od aktualnog bita uzima se 1/2, a od prethodnog i budućeg bita po 1/4. Tako se postiže između početka i kraja pojedinih bitova fazni pomak 0,  $\pm 45^\circ$  ili  $\pm 90^\circ$ . Vremenski dijagram promjene faze za modulacije TFM i MSK prikazan je na sl. 53. Iz valnog oblika signala TFM vidi se da će on zahtijevati za prijenos užu spektar, jer mu je oblik gladi.

Za prijenos digitalnog signala, bez obzira na sustav, karakteristično je da ispod određenog praga, tj. omjera



Sl. 53. Vremenska promjena faze nosioca pri prijenosu modulacijskoga bipolarnoga digitalnog signala (a), za MSK modulirani nosilac (b) i za TFM modulirani nosilac (c)

signala i šuma, naglo raste vjerojatnost pogreške. To znači da će za vrijeme trajanja dubokog fedinga, kad je signal ispod praga, vjerojatnost pogreške biti praktički 50% (pogreške u snopovima), dok će u vremenu između fedinga (pojedinačne pogreške) vjerojatnost biti vrlo malena. Visoka vjerojatnost pogreške koncentrirana u kratkim vremenskim intervalima koji su međusobno razmaknuti mnogo duljim intervalima, kad gotovo nema pogrešaka, tipična je za pokretne radiokomunikacije. Svi postupci koji nastoje smanjiti pogrešku u prijenosu mogu se svrstati u dvije skupine. Prvim se nastoji smanjiti učestalost, trajanje i dubinu fedinga, o čemu je već bilo riječi (diverzitski prijam). Drugim se nastoji iskoristiti prikladne postupke kodiranja kako bi se pogreške smanjile detektiranjem, eventualno korigiranjem, odnosno približno jednolikim raspršivanjem po vremenu.

Ako se promotri kako brzina prijenosa podataka utječe na vjerojatnost pogreške, očito je da će ona biti malena sve dok je prosječno trajanje fedinga mnogo kraće od trajanja jednog bita. Dakle, za manje brzine prijenosa, do stotinjak bitova u sekundi, što ovisi o brzini vozila, frekvenciji vala nosioca i dubini fedinga, vjerojatnost je pogreške malena. Pri većim brzinama prijenosa vjerojatnost pogreške praktički ne ovisi o brzini prijenosa, jer je ukupno trajanje fedinga u nekom vremenskom rasponu stalno. Prema tome, brzina se prijenosa odabire ili vrlo malena, da se smanji vjerojatnost pogreške, ili najveća moguća koju uz odabrani postupak modulacije dopušta širina radiokanala (maksimalna djelotvornost), pa se tada prikladnim kodiranjem smanjuje vjerojatnost pogreške na zahtijevanu vrijednost. Podaci se prenose redovito u obliku kodiranih riječi koje sadrže više bitova nego što je potrebno za prepoznavanje poruke. Postupci za smanjivanje pogrešaka su sljedeći: detekcija pogreške i zahtjev za ponavljanjem (engl. Automatic Repeat on Request, ARQ), kontrola pogreške unaprijed (engl. Forward Error Control, FEC) i hibridni postupci. Svi ti postupci zahtijevaju dodavanje redundantnih bitova (bitova zalihe) koji ne predstavljaju poruku, ali služe u prijammiku za otkrivanje ili za korekciju pogreške ili za oboje. Sustav ARQ mora imati povratni kanal preko kojeg se šalje zahtjev za ponavljanje. Sustav FEC nema povratnog kanala ni ponavljanja poruke, prijenos je dakle kontinuiran, ali je potrebno više redundantnih bitova. U hibridnim sustavima redundantni bitovi služe za korekciju pogreške. Ako je broj pogrešaka u jednoj kodnoj riječi prevelik, zahtijeva se preko povratnog kanala ponavljanje. Za pogreške u snopovima potrebno je mnogo više redundantnih bitova nego kad su pogreške pojedinačne, a strategija je detekcije i korekcije pogrešaka složenija. Da bi se pogreške u snopovima raspršile na širi vremenski interval i dobile samo pojedinačne pogreške, upotrebljavaju se isprepletene kodne riječi. U takvu se sustavu iz grupe od  $M$  riječi šalju redom prvi bitovi svih riječi od prve do  $M$ -te, zatim svi drugi bitovi itd. Ako broj pogrešaka u snopu nije veći od  $M$ , one će se jednoliko rasporediti na svih  $M$  kodnih riječi, što je mnogo lakše detektirati ili korigirati.

### MIKROVALNI POLUVODIČI I SKLOPOVI

Za male i srednje snage mikrovalni su poluvodiči gotovo istisnuli elektroničke cijevi iz upotrebe (v. *Elektronika, sklopovi i sastavni dijelovi za mikrovalnu tehniku*, TE 4, str. 569). U mikrovalnim sklopovima danas se najčešće upotrebljavaju bipolarni i unipolarni tranzistori te različiti tipovi dioda (v. *Poluvodiči*, TE 10, str. 638). Upotrebljavaju se sljedeći mikrovalni poluvodički sklopovi: *a*) pojačalo s bipolarnim ili unipolarnim tranzistorom, lavinskom diodom, Esakijevom (tunelnom) diodom ili varaktorskom diodom, *b*) generator s bipolarnim ili unipolarnim tranzistorom, lavinskom diodom u IMPATT ili TRAPATT modu, te Gunnovom ili Esakijevom diodom, *c*) množilo frekvencije s varaktorskom diodom ili posebnim tipom kapacitivne diode (engl. step recovery diode), *d*) mješalo s točkastom ili Schottkyjevom diodom, bipolarnim ili unipolarnim tranzistorom ili Esakijevom diodom, *e*) detektor s točkastom, Schottkyjevom ili

protusmjernom diodom ili tranzistorom, *f*) upravljiva impedancija koja je najčešće strujno upravljani djelatni otpor s PIN-diodom ili naponski upravljani kapacitet s varaktorskom diodom. Takvi se sklopovi mogu upotrijebiti kao modulatori, sklopke, atenuatori i zakretni faze.

Lavinska dioda u IMPATT modu (engl. IMPact Avalanche and Transit Time diode, dioda s lavinskim djelovanjem i vremenom proleta) temelji se na lavinskom efektu koji se pojavljuje zbog sudara čestica ubrzanih jakim električnim poljem i na trajanju njihova proleta kroz poluvodič. Lavinska struja kasni u fazi  $90^\circ$  za naponom, a zbog trajanja proleta nastaje dodatni fazni pomak, tako da ukupni fazni pomak struje prema naponu iznosi gotovo  $180^\circ$ , što znači da se postiže negativna djelatna komponenta impedancije diode.

Lavinska dioda u TRAPATT modu (engl. TRAPed Plasma Avalanche Triggered Transit diode, dioda s uhvaćenom plazmom, okidana prolazom lavine) temelji se na stvaranju plazme koja se na početku svake periode izmjeničnog signala okida brzim proletom lavinskog procesa kroz diodu. U prvoj poluperiodi za vrijeme plazmenog stanja kroz diodu teče jaka struja, a napon je na diodi nizak. U drugoj je poluperiodi napon visok, a struja slaba, jer tada nema plazme zbog toga što je većina naboja djelovanjem električnog polja izvučena iz diode. Izmjenjuje se, dakle, stanje niskog napona i jake struje sa stanjem visokog napona i slabe struje, što znači da između izmjeničnih komponenata struje i napona postoji fazni pomak od  $180^\circ$ , odnosno da je djelatna komponenta impedancije diode negativna.

Zajednička su svojstva svih mikrovalnih poluvodičkih elemenata male dimenzije zbog rada na vrlo visokim frekvencijama (danas i do stotine gigaherca). Parazitarne reaktancije moraju biti ekstremno malene, što se posebno odnosi na kućište u koje je ugrađen čip (poluvodička struktura s različitim poluvodičkim slojevima). Posebna se pažnja posvećuje sastavljanju i spajanju čipa s kućištem kako bi parazitna induktivnost voda između čipa i kućišta bila što manja. Jedan kraj čipa izravno je vezan na kućište, a drugi je vrlo često spojen s metalnom pozlaćenom trakom koja uz malu induktivnost mora imati i dobru toplinsku vodljivost radi što bržeg odvođenja topline. Poluvodički materijal čipa na strani koja izravno naliježe na kućište mora imati također dobru toplinsku vodljivost, jer gustoća snage zbog disipacije u poluvodiču može biti i  $20000 \text{ W/cm}^2$ . Parazitni kapacitet između gornje i donje kontaktne površine kućišta mora biti što manji, jer je on paralelan s čipom i kvira njegovu karakteristiku. Danas se već velik dio poluvodičkih elemenata proizvodi bez kućišta, pa se čipovi izravno vežu na pasivne komponente u sklopovima.

**Prikaz sklopova raspršnim parametrima.** Pri analizi sklopova pretpostavlja se stacionarno stanje, tj. da su svi signali (struje i naponi) funkcije vremena i da imaju sinusni oblik. Zbog toga što u mikrovalnom području sklopovi nemaju dimenzije zanemarivo malene s obzirom na valnu duljinu elektromagnetskog vala koji se njima širi, konvencionalni se postupci analize sklopova moraju proširiti i prilagoditi toj činjenici.

Napon  $U$  i struja  $I$  na ulaznim stezaljkama nekog sklopa nadomještaju se upadnim  $U_U$  i reflektiranim valom napona  $U_R$  ili struja  $I_U$ , odnosno  $I_R$ , pa ukupni napon i struja iznose

$$U = U_U + U_R, \quad (143a)$$

$$I = I_U + I_R, \quad (143b)$$

uz uvjet da vrijedi

$$\frac{U_U}{I_U} = \frac{U_R}{I_R} = Z_0, \quad (144)$$

gdje je  $Z_0$  valni otpor linije na kraju koje se nalaze ulazne stezaljke sklopa. Uvode se, dalje, normalizirane veličine, koje će se radi jednostavnosti zvati upadnim  $a$  i reflektiranim  $b$  valom koji su povezani s naponima i strujama sljedećim jednadžbama: