

gdje\* označuje konjugirano kompleksnu vrijednost. Ako su signali  $x(t)$  i  $y(t)$  različiti, jednadžba (78) prikazuje križnu korelacijsku funkciju, a ako su jednaki, to je autokorelacijska funkcija. Vidi se da diskretna Fourierova transformacija može poslužiti i za brzo računanje korelacijskih funkcija pomoću spektralnog prikaza u kojemu treba svim imaginarnim komponentama spektra jednog od signala samo promijeniti predznak (dobivaju se konjugirano kompleksne vrijednosti).

## RASPROSTIRANJE ELEKTROMAGNETSKOG VALA I OSNOVE PLANIRANJA RADIOKANALA

Radiokomunikacijski sustavi mogu se, s obzirom na usmjeravanje elektromagnetske energije cijelim prostorom, razvrstati u sustave s usmjerenim i sustave s radijalnim zračenjem. Usmjerenost se zračenje upotrebljava u radiorelejnima sustavima kad se povezuju samo dva prostorno udaljena mjesta. Radijalno zračenje s velikim horizontalnim kutom zračenja (vrlo često  $360^\circ$ ) upotrebljava se u radiodifuziji i za pokretne radioveze. Utvrđivanje vrijednosti električnog polja ili gušenja signala donekle ovisi o navedenim oblicima zračenja. Prva procjena o vrijednosti električnog polja na mjestu primanja temelji se u oba slučaja na rasprostiranju elektromagnetskog vala u prostoru bez zapreka.

Prijenos energije elektromagnetskim zračenjem opisuje veličina koja se naziva Poyntingovim vektorom (v. *Elektrotehnika*, TE 5, str. 159):

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (79)$$

gdje su  $E$  i  $H$  jakosti električnog, odnosno magnetskog polja. Njihov omjer ima dimenziju otpora pa se naziva valnim otporom  $Z_v = E/H$ . Razradom te jednadžbe dobiva se da je za neko sredstvo magnetske permeabilnosti  $\mu$  i dielektričnosti  $\epsilon$  valni otpor  $Z_v = \sqrt{\mu/\epsilon}$ . Uvrštavanjem vrijednosti za vakuum ( $\mu_0, \epsilon_0$ ) slijedi da je valni otpor vakuuma (a približno i zraka)  $Z_{v0} \approx 377 \Omega$ .

Poyntingov vektor ima dimenziju površinske gustoće snage. Iz točkastog izotropnog zračenja energija se raspoređuje ravnomjerno u prostoru, pa je površinska gustoća snage na udaljenosti  $d$  jednaka

$$S = \frac{P}{4\pi d^2}, \quad (80)$$

gdje je  $P$  izračena snaga, a  $d$  polumjer kugle sa zračilom u središtu.

Iz jednadžbe (79), koja se za dovoljno velike udaljenosti može uzeti u skalarnom obliku, te iz jednadžbe (80) slijedi da je jakost električnog polja na udaljenosti  $d$  od točkastog izotropnog zračenja u prostoru bez prepreka

$$E = \frac{\sqrt{kP}}{d}, \quad (81a)$$

gdje je  $k = 377\Omega/(4\pi) = 30\Omega$ .

Za usmjereno zračilo, kakva je većina antena, mora se uzeti u obzir dobitak antene  $g$  (v. *Elektrotehnika, uređaji. Antene*, TE 4, str. 605), pa je jakost polja u smjeru maksimalnog zračenja

$$E = \frac{\sqrt{kP_0g_0}}{d}, \quad (81b)$$

gdje je  $P_0$  snaga privedena odašiljačkoj anteni,  $d$  udaljenost promatrane točke od odašiljača, a  $g_0$  dobitak antene kad se točka nalazi u smjeru maksimalnog zračenja. Pri radijalnom zračenju nije zanimljivo samo električno polje u smjeru maksimuma, nego i za sve kutove po azimutu. Tada se umnožak  $P_0g_0$  nadomješta ekvivalentnom izotropno zračenom snagom  $P_i$  koja se dobiva množenjem umnoška  $P_0g_0$  i podatka iz horizontalnog dijagrama zračenja odašiljačke antene.

Vrlo se često u proračunima uzima u obzir gušenje u slobodnom prostoru. Ono se definira kao omjer snage privedene odašiljačkoj anteni i raspoložive snage na stezalj-

kama prijamne antene, uz pretpostavku da su obje antene izotropni radijatori.

Snaga je na prijamnoj anteni umnožak površinske gustoće snage  $S$  i efektivne ploštine antene (v. *Elektrotehnika, uređaji. Antene*, TE 4, str. 605), a za izotropni radijator iznosi

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} = \frac{c^2}{4\pi f^2}, \quad (82)$$

gdje je  $\lambda$  valna duljina,  $f$  frekvencija, a  $c = f\lambda$  brzina rasprostiranja elektromagnetskog vala. Slijedi da je snaga na prijamnoj anteni

$$P_p = SA_p, \quad (83)$$

gdje je  $A_p$  efektivna ploština prijamne antene.

Omjer je snage na prijamnoj i odašiljačkoj anteni

$$\frac{P_p}{P_o} = \left( \frac{c}{4\pi fd} \right)^2. \quad (84)$$

Taj se podatak obično izražava pozitivnom razinom, te se naziva *gušenjem snage* u slobodnom prostoru:

$$a = 10 \lg \frac{P_o}{P_p} \text{ dB}. \quad (85a)$$

Uvrštavanjem (84) u (85a) te prilagodavanjem za praktičnije jedinice gušenje iznosi

$$a = \left( 32,44 + 20 \lg \frac{f}{\text{MHz}} + 20 \lg \frac{d}{\text{km}} \right) \text{ dB}. \quad (85b)$$

Vidi se da se za svako udvostručenje frekvencije ili udaljenosti primljena snaga smanjuje za  $\sim 6$  dB.

**Elektromagnetsko polje kao statistička veličina.** Ako se pri rasprostiranju uzmu u obzir atmosfera i konfiguracija tla, prijamno će se polje kolebati. Statistička zakonitost tog kolebanja može se utvrditi samo na temelju velikog broja mjerenja i statističke obradbe tih podataka. Za vrijeme kolebanja polja nastaju i velika smanjenja jakosti polja nazvana *feedingom*. Prema trajanju razlikuju se kratkotrajni i dugotrajni feeding. Dubina i učestalost feedinga povećavaju se s frekvencijom, dok je trajanje dosta neovisno o frekvenciji, ali ipak raste pri vrlo visokim frekvencijama (iznad  $\sim 10$  GHz) zbog oborinske apsorpcije. Učestalost i dubina feedinga izravno utječu na kvalitetu prijensa u radiokomunikacijskom sustavu. S povećanjem dubine feedinga smanjuje se omjer signala i šuma, veza postaje sve lošija, a pri vrlo dubokom feedingu potpuno se prekida. Zbog toga, već prema vrsti radioveze, postotak ostvarenih kvalitetnih veza iznosi od 50% za pokretne sustave na granici dometa, do gotovo 100% za usmjerene radiorelejne sustave.

Mjerenja jakosti polja radi utvrđivanja statističkih zakonitosti i dobivanja krivulje razdiobe mogu trajati nekoliko dana, mjeseci, pa i godina. Dakako, duža mjerenja daju točnija predviđanja. Pri mjerenju izravno se registriraju ili jakosti polja ili učestalosti pojedinih jakosti polja. Iz tih se podataka određuju krivulje razdiobe trenutnih vrijednosti ili pak srednjih vrijednosti, odnosno medijana unutar određenog razdoblja (minuta, sat, dan, itd.). Redovito se upotrebljava funkcija vjerojatnosti prekoračenja jakosti električnog polja. Naime, uz konstantan šum iz nje se izravno dobiva podatak o postotku vremena za koje je omjer signal/šum jednak unaprijed utvrđenoj vrijednosti koja još omogućuje kvalitetan prijenos, ili je veći od te vrijednosti. Za radiorelejne sustave koji redovito rade uz optičku vidljivost između odašiljačke i prijamne antene upotrebljavaju se razdiobe koje su samo funkcije vremena. Naime, odašiljačke i prijamne antene tih sustava postavljene su čvrsto, pa im se lokacije za vrijeme rada ne mijenjaju. U radijalnim pak sustavima redovito su čvrsto postavljene samo antene centralnih odašiljača da bi pokrivala određeno područje dovoljnom jakošću polja. Antene su perifernih prijamnika smještene slučajno unutar toga geografskog područja, pa se u bilo kojoj njegovoj točki mora

osigurati kvalitetan prijam. Funkcija razdiobe jakosti polja tada ima dvije nezavisne varijable, vrijeme i lokaciju. Nasreću, između vremena i lokacije nema korelacije, pa su te varijable statistički neovisne, tako da se ovisnost o vremenu i lokaciji može odvojeno razmatrati.

Razdiobe pomoću kojih se određeni tipovi rasprostiranja mogu vrlo dobro aproksimirati jesu logaritamska normalna, Rayleighova i ekscentrična Rayleighova ili Riceova razdioba. U logaritamskoj normalnoj razdiobi varijabla nije jakost polja, nego njezin logaritam, tj. razina izražena u decibelima. Takva logaritamska normalna razdioba dobiva se mjerenjem jakosti polja unutar relativno kratkih vremenskih intervala (sat, dan), kad se, osim glavne zrake, prima još jedna ili više zraka sa slučajnom fazom, ali amplitude mnogo manje od one u glavne zrake. Ako se promatra skup jednosatnih srednjih vrijednosti ili dnevnih srednjih vrijednosti u toku dužeg vremena (mjesec, godina), onda i one podliježu logaritamskoj normalnoj razdiobi. Funkcija gustoće vjerojatnosti izražena pomoću razine polja  $p$  određena je izrazom

$$v(p) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(p-\bar{p})^2}{2\sigma^2}\right], \quad (86)$$

gdje je razina polja

$$p = 20 \lg \frac{E}{E_0} \text{ dB}. \quad (87)$$

$E_0$  je odabrana referentna jakost polja (vrlo često median). Da bi se pojednostavnilo računanje, redovito se upotrebljava normirana razdioba kojoj je median nula, a rasipanje jedan. Tada je normirana varijabla (razina)

$$u = \frac{p - \bar{p}}{\sigma}, \quad (88)$$

pa je gustoća vjerojatnosti

$$v(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad (89)$$

iz čega slijedi funkcija distribucije

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (90)$$

i vjerojatnost prekoračenja

$$v_p(u) = 1 - \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (91)$$

Vrijednosti integrala u izrazima (90) i (91) mogu se naći u matematičkim priručnicima, a mali se isječak vidi u tabl. 1. Za grafičko prikazivanje krivulja razina prijamnog polja primjenjuje se samo vjerojatnosni koordinatni sustav. Koordinatne su osi u tom sustavu vjerojatnost prekoračenja (ili funkcija distribucije) i normirana varijabla ili razina prijamnog polja. Mjerilo se na osima tako odabire da krivulja logaritamske normalne razdiobe bude prikazana pravcem (sl. 18). Upotrebom vjerojatnosnog koordinatnog sustava uklanjaju se teškoće koje bi nastale pri prikazivanju i određivanju vrijednosti polja za male i velike vjerojatnosti ako bi se upotrijebilo linearno mjerilo. Za vrlo male i vrlo velike vrijednosti funkcije distribucije, odnosno vjerojatnosti prekoračenja (manje od 1% i veće od 99%), vrijede ove aproksimacije za  $u \ll -1$ :

$$\Phi(u) = -\frac{1}{u\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right); \quad v_p(u) = 1 - \Phi(u), \quad (92)$$

a za  $u \gg 1$ :

$$v_p(u) = \frac{1}{u\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right); \quad \Phi(u) = 1 - v_p(u). \quad (93)$$

Uz vrlo nepovoljne uvjete rasprostiranja, kad na prijamnu antenu pristizhe više zraka približno jednake snage, dobiva se Rayleighova razdioba polja. Ta je razdioba nazvana po engleskom fizičaru lordu Rayleighu (1842–1919), koji ju je otkrio pri proučavanju širenja zvuka. Funkcija je gustoće vjerojatnosti za jakost polja prema toj razdiobi

$$v(E) = \frac{2E}{E_0^2} \exp\left(-\frac{E^2}{E_0^2}\right), \quad (94a)$$

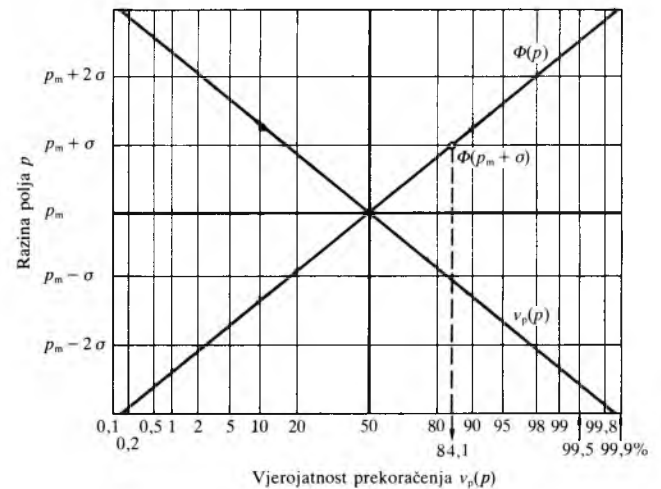
a vjerojatnost prekoračenja

$$v_p(E) = \exp\left(-\frac{E^2}{E_0^2}\right), \quad (94b)$$

gdje je  $E_0$  efektivna vrijednost, a dobiva se iz srednje vrijednosti kvadrata, pa je  $E_0^2 = \bar{E}^2$ . Često se umjesto efektivne vrijednosti upotrebljava median  $E_m$ , pa tada jednadžba (90) ima oblik

$$v_p(E) = \exp\left(-0,693 \frac{E^2}{E_m^2}\right). \quad (94c)$$

Kad je feding umjeren, razdioba polja slijedi ekscentričnu Rayleighovu ili Riceovu razdiobu. Tada se prijamno polje sastoji od zbroja polja jedne približno konstantne zrake i više zraka kojima je ukupna snaga gotovo konstantna, dok su im amplitude i faze slučajne veličine. Funkcija distribucije određuje se vrlo složenim integralom.



Sl. 18. Prikaz funkcije distribucije  $\Phi(p)$  i vjerojatnosti prekoračenja  $v_p(p)$  razine polja  $p$  logaritamski normalne razdiobe u vjerojatnosnom koordinatnom sustavu

### RADIOKOMUNIKACIJSKI SUSTAVI S USMJERENIM ZRAČENJEM

Radiosustavi s usmjerenim zračenjem i radiorelejni sustavi omogućavaju radiovezu između stalnih mjesta na Zemljinoj površini. Usmjerene se veze ostvaruju na vrlo visokim frekvencijama, pa sve do supervisokih, na kojima je pomoću usmjerenih antena moguće upraviti radiovalove u obliku vrlo uska snopa, gotovo bez divergencije. Ti se sustavi razvrstavaju na zemaljske i satelitske. Kvaliteta prijenosa zemaljskim radiorelejnima sustavima ovisi o širenju elektromagnetskog

Tablica 1  
NEKE VRIJEDNOSTI FUNKCIJE DISTRIBUCIJE  $\Phi(u)$  I  
VJEROJATNOSTI PREKORAČENJA  $v_p(u)$

$u$	0	0,253	0,524	0,842	1	1,282	1,645	1,960	2,326	2,567	2,878	3,090	3,291	3,719
$\Phi(u)/\%$	50	60	70	80	84,1	90	95	97,5	99	99,5	99,8	99,9	99,95	99,99
$v_p(u)/\%$	50	40	30	20	15,9	10	5	2,5	1	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01