## Interferencija simbola

Uvjete prijenosa u idealnom kanalu nije moguće u ostvarenim kanalima prijenosa u cijelosti ispuniti. Određene oblike funkcija prijenosa predajnog i prijemnog filtra nije moguće u cijelosti ostvariti. Frekvencijske karakteristike i karakteristike kašnjenja prijenosnih sustava nisu idealne. Ekvilizacija karakteristika se također može izvesti približno točno. Kolebanje faze takta sinkronizacije simbola u prijemniku doprinosi odstupanju od idealnih uvjeta prijenosa. Ova su odstupanja uzrokom da na izlazu sklopa za uzorkovanje (*Slika 6.6*) I Nyquistov kriterij nije ispunjen. Intenzitet interferencije simbola ovisi o mjeri odstupanja od uvjeta u idealnom kanalu prijenosa. Stoga su manji iznosi interferencije simbola neizbježan pratilac prijenosa podataka. Samostalno djelovanje interferencije simbola u pravilu ne uzrokuje pogreške u prijenosu. Međutim, u zajedničkom djelovanju sa smetnjama interferencija simbola pospješuje djelovanje smetnji. Slijed simbola na izlazu prijemnog filtra prikazati ćemo u obliku:

(6.45)



Nakon uzorkovanja slijed uzoraka u *t* = *kT*N je:

(6.46)



Promatramo uzorak u *t* = *kT*N = 0 i stoga ga izdvajamo iz sume:

 (6.47)

Prvi je član u ovom izrazu uzorak simbola kada interferencija ne djeluje. Drugi član opisuje djelovanje simbola koji nastupaju prije i poslije promatranog simbola na uzorak promatranog simbola. Suma može poprimiti pozitivne i negativne vrijednosti, pa promatrani uzorak *s*(0) može biti veći ili manji od *a*m*y*(0) kada nema interferencije simbola. Uvjet je da nema interferencije simbola:

 (6.48)

što znači da su uzorci simbola u *t* = *kT*N međusobno neovisni. Razmotrimo podrobnije značenje sume u izrazu (6.47). Jednostavnosti radi neka je prijenos binaran tako da *a*m slučajno poprima vrijednosti ±1. Na slici 6.12.a nacrtan je odziv simbola *y*(*t*) na izlazu prijemnog filtra.



*Slika 6.12 Prikaz interferencije simbola*

Uzorak interferencije u *t* = –*T*N jednak je uzorku pomaknutog odziva *y*(*t* – *T*N) u trenutku uzorkovanja promatranog simbola u *t* = 0. Uzorci interferencije u *t* = *T*N, 2*T*N i 3*T*N jednaki su uzorcima odziva *y*(*t* + *T*N), *y*(*t* + 2*T*N) i *y*(*t* + 3*T*N), koji prethode promatranom odzivu, u *t* = 0. Suma interferencije simbola može se odrediti iz uzoraka odziva *y*(*t*), što govori da nije potrebno crtati sve odzive koji uzrokuju interferenciju. Za *a*m = –1 odgovarajući uzorak mijenja predznak u odnosu na nacrtani. Sumu interferencije simbola pogodno je radi boljeg uvida u proces interferencije prikazati u obliku stabla (*Slika 6.12.b*). Nacrtana je samo polovina slike za *a*1 = 1. Za *a*2 = –1 treba prikazani dio zakrenuti oko vodoravne osi. U ostvarenim kanalima prijenosa odziv *y*(*t*) je konačnog trajanja. Stoga je broj uzoraka interferencije *K* također konačan jer potječe od *K* simbola. U matematičkom smislu interferencija simbola je slučajni proces s diskretnom slučajnom veličinom:

(6.49)



koju čine uzorci interferencije. Diskretna slučajna veličina *z*(*i*) je suma od *K* uzoraka interferencije za i-ti slijed od *K* simbola. U binarnom prijenosu *z*(*i*) poprima 2*K* različitih vrijednosti (realizacija). Ove vrijednosti ovise o koeficijentima *a*m u sljedovima duljine *K* bita. U slučajnom slijedu simbola svi su sljedovi duljine *K* bita jednako vjerojatni, pa *z*(*i*) poprima diskretne vrijednosti s vjerojatnostima *P*(*i*) = 2-*K*. Značajno je svojstvo slučajne veličine *z*(*i*) da je za pozitivne i negativne vrijednosti podjednako ograničena na najveću vrijednost:

(6.50)



koja je jednaka sumi apsolutnih vrijednosti *K* uzoraka interferencije. Osim promjena u veličini promatranog uzorka u *t* = 0, interferencija simbola uzrokuje kolebanje u vremenu prolaza odziva *y*(*t*) kroz prag odluke. Ovo kolebanje uzrokuje individualno izobličenje i kolebanje faze takta sinkronizacije u prijemniku. Mjera interferencije simbola u prijenosu određuje se iz dijagrama «oka». Značajke dijagrama oka određuje slijed odziva *y*(*t*) na izlazu prijemnog filtra. Promatramo li ovaj slijed na zaslonu osciloskopa tako da je frekvencija vremenske baze osciloskopa *f* = 1/*T*N, nastupiti će preklapanje odziva sljedova duljine *K* simbola. Rezultat je dijagram oka prikazan na slici (*Slika 6.13*) za prijenos binarnih simbola.



*Slika 6.13 Dijagram toka*

Mjera djelovanja interferencije simbola određuje se iz razmaka između praga odluke i najveće vrijednosti slučajne veličine *z*(*i*)m u najpogodnijem trenutku za uzorkovanje simbola. Ovaj razmak nazivamo otvorom oka *D*:

(6.51)



Najpogodnije mjesto na vremenskoj osi za uzorkovanje simbola je točka za koju je otvor oka najveći. Kolebanje faze takta sinkronizacije (područje b) uzrokuje da se uzorkovanje vrši i u točkama za koje je otvor oka umanjen. Otvor oka u točki uzorkovanja jednak je najvećoj vrijednosti napona šuma koja još ne uzrokuje pogrešku u prijemu simbola. U području (a) dijagrama oka nastupa kolebanje prolaza odziva kroz prag odluke.

Vjerojatnost pogreške simbola u kanalu prijenosa s interferencijom simbola određuje se na sličan način kao u idealnom kanalu. Vjerojatnost pogrešnog prijema *m-*tog simbola iz skupa od *M* simbola za *i-*ti slijed od *K* simbola je:

 (6.52)

Uvrštenjem pragova odluke i veličine simbola kao u idealnom kanalu slijedi:

(6.53)



U *M*-narnom prijenosu *z*(*i*) poprima *MK* diskretnih vrijednosti. Srednju vjerojatnost pogreške simbola određujemo kao srednju vrijednost *Pmi* uzimajući u obzir sve diskretne vrijednosti *z*(*i*):

(6.58)



(6.59)



Interferencija simbola uzrokuje za jednaki omjer *S*/*N* veću vjerojatnost pogreške od vjerojatnosti pogreške u idealnom kanalu prema izrazu (6.30).