

Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Zavod za elektroničke sustave i obradbu informacija

Seminar iz kolegija *Sustavi za praćenje i vođenje procesa*

ORTHOGONAL FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING  
(OFDM)

Student: Mladen Skelin  
Matični broj: 0036394936

Zagreb, 02. lipnja 2006.

## Sadržaj

1	Uvod	1
2	Modeli sustava	2
2.1	Kontinuirani model	3
2.2	Diskretni model	6
2.3	Nedostaci	6
3	Sustavi	7
3.1	Bežični sustavi	7
3.1.1	Downlink	7
3.1.2	Uplink	7
3.2	Ožičeni sustavi	8
3.2.1	Prijenosna funkcija pretplatničke linije	8
3.2.2	Šum i preslušavanje	8
4	Sinkronizacija	10
4.1	Sinkronizacija simbola	10
4.1.1	Timing errors	10
4.2	Sinkronizacija frekvencije otipkavanja	11
4.3	Sinkronizacija frekvencija valova nosilaca	11
4.3.1	Pogreške u frekvenciji	11
4.3.2	Estimatori frekvencije	12
5	Estimacija kanala	12
5.1	Pilot-informacija	12
5.2	Dizajn estimatora	13
6	Zaključak	13
7	Literatura	14

## Poglavlje 1

### Uvod

Pod terminom OFDM podrazumjevamo skup prijenosnih tehnika. Primjenjene u bežičnoj okolini obično se nazivaju OFDM. Međutim, govorimo li o primjeni u ožičenoj okolini poput pretplatničkih linija (ADSL), termin DMT (*discrete multitone*) je primjereniji.

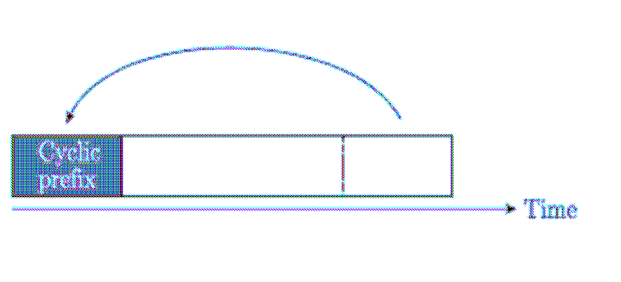
OFDM trenutno koristi europski DAB (*digital audio broadcasting*) standard.

Nekoliko DAB sustava u Sjevernoj Americi također su temeljeni na OFDM-u te se istražuju mogućnosti njegove primjene u emitiranju digitalnog TV signala.

## Poglavlje 2

### Modeli sustava

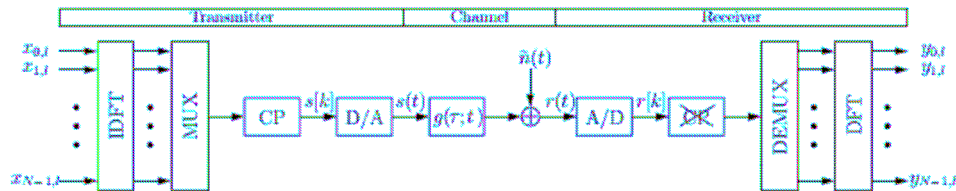
Osnovna ideja OFDM-a je podjela raspoloživog spektra u nekoliko uskopojasnih kanala. Da se ostvari visoka učinkovitost u smislu upotrebe spektra koji stoji na raspolaganju, frekvencijska područja kanala se preklapaju i ortogonalna su. Odatle i naziv OFDM. Ortogonalnost se može potpuno očuvati, iako signal prolazi kroz realan kanal uvođenjem cikličkog prefiksa (*cyclic prefix*). Ciklički prefiks je kopija zadnjeg dijela OFDM simbola koji je onda "nalijepljen" na početak istog (Slika 2.1.).



Slika 2.1.

Ovakav zahvat čini signal koji se prenosi periodičkim, što igra odlučujuću ulogu u izbjegavanju ISI (*intersymbol interference*) i ICI (*intercarrier interference*). Loše je što kvari SNR.

Shematski prikaz *baseband* OFDM sustava je dan na Slici 2.2..

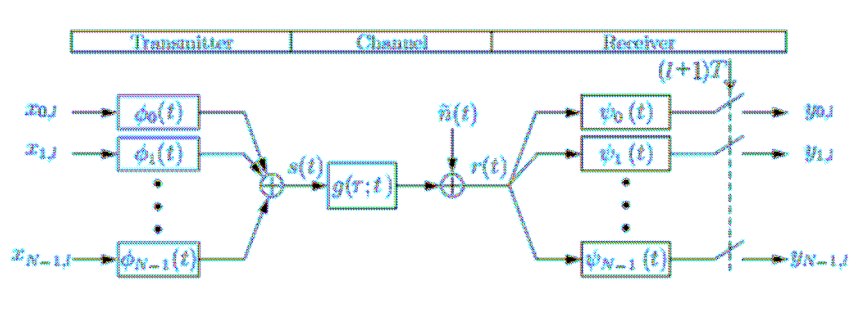


Slika 2.2. Digitalna implementacija *baseband* OFDM sustava.

Modele OFDM sustava svrstavamo u dvije različite klase: kontinuirane (*continuous-time*) i diskretne (*discrete-time*).

## 2.1 Kontinuirani model

Kontinuirani model predložen na Slici 2.3. možemo smatrati idealnim OFDM sustavom.



Slika 2.3. Baseband model OFDM sustava

### · Odašiljač

Uz pretpostavku OFDM sustava s  $N$  nosioca, širinom pojasa od  $W$  Hz i trajanjem simbola od  $T$  sekundi, gdje je  $T_{cp}$  trajanje cikličkog prefiksa, odašiljač koristi sljedeće valne oblike

$$\phi_k(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T-T_{cp}}} e^{j2\pi\frac{W}{N}k(t-T_{cp})} & \text{ako je } t \in [0, T], \\ 0 & \text{inače} \end{cases} \quad (2.1)$$

gdje je  $T = N/W + T_{cp}$ . S obzirom da je  $\phi_k(t)$  pravokutni puls moduliran frekvencijom nosioca  $kW/N$ , uobičajena interpretacija OFDM-a je kao postupka koji koristi  $N$  valova nosilaca kojima je pridjeljen niski *bit-rate*.  $\phi_k(t)$  se koriste u modulaciji i emitirani *base band* signal za simbol  $l$  je

$$s_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_{k,l} \phi_k(t-lT),$$

gdje su  $x_{0,l}, x_{1,l}, \dots, x_{N-1,l}$  kompleksni brojevi iz skupa točaka konstelacije. Kad se emitira beskonačan slijed simbola, izlaz iz odašiljača možemo opisati relacijom

$$s(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} s_l(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} x_{k,l} \phi_k(t-lT). \quad (2.2)$$

### · Kanal

Pretpostavljamo da je impulsni odziv  $g(\tau; t)$  ograničen na interval  $\tau \in [0, T_{cp}]$ , tj. na trajanje cikličkog prefiksa. Primljeni signal je kako slijedi

$$r(t) = (g * s)(t) = \int_0^{T_{cp}} g(\tau; t) s(t - \tau) d\tau + \tilde{n}(t), \quad (2.3)$$

gdje je  $\tilde{n}(t)$  aditivni bijeli kompleksni Gauss-ov šum.

### · Prijamnik

OFDM prijamnik sastoji se od banke prilagođenih filtara, tj.

$$\psi_k(t) = \begin{cases} \phi^*(T-t) & \text{ako je } t \in [t, T - T_{cp}] \\ 0 & \text{inače.} \end{cases}, \quad (2.4)$$

Ovo znači da je ciklički prefiks uklonjen u prijamniku. S obzirom da ciklički prefiks sadrži sav ISI od prethodnog simbola, otipkani izlaz prijamnika ne sadrži ISI. Dakle, možemo zanemariti vremenski indeks  $l$  kad računamo otipkani izlaz  $k$ -tog prilagođenog filtra. Kombiniranjem (2.2), (2.3) i (2.4) dobivamo

$$\begin{aligned} y_k &= (r * \psi_k)(t) \Big|_{t=T} = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) \psi_k(T-t) dt \\ &= \int_{T_{cp}}^T \left( \int_0^{T_{cp}} g(\tau; t) \left[ \sum_{k'=0}^{N-1} x_{k'} \phi_{k'}(t-\tau) \right] d\tau \right) \phi_k^*(t) dt + \int_{T_{cp}}^T \tilde{n}(T-t) \phi_k^*(t) dt. \end{aligned}$$

Konačno je

$$\begin{aligned} y_k &= \sum_{k'=0}^{N-1} x_{k'} \int_{T_{cp}}^T \frac{e^{j2\pi k'(t-T_{cp})W/N}}{\sqrt{T-T_{cp}}} h_{k'} \phi_{k'}^*(t) dt + \int_{T_{cp}}^T \tilde{n}(T-t) \phi_k^*(t) dt \\ &= \sum_{k'=0}^{N-1} x_{k'} h_{k'} \int_{T_{cp}}^T \phi_{k'}(t) \phi_k^*(t) dt + n_k, \end{aligned} \quad (2.5)$$

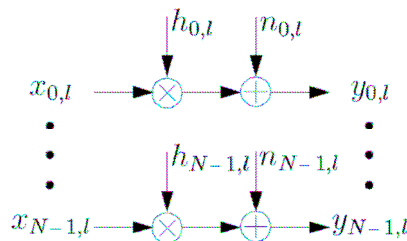
gdje je  $n_k = \int_{T_{cp}}^T \tilde{n}(T-t) \phi_k^*(t) dt$ . S obzirom na ortogonalnost je

$$\int_{T_{cp}}^T \phi_{k'}(t) \phi_k^*(t) dt = \int_{T_{cp}}^T \frac{e^{j2\pi k'(t-T_{cp})W/N}}{\sqrt{T-T_{cp}}} \frac{e^{-j2\pi k(t-T_{cp})W/N}}{\sqrt{T-T_{cp}}} dt = \delta[k-k'],$$

$$y_k = h_k x_k + n_k, \quad (2.6)$$

gdje je  $n_k$  aditivini bijeli Gauss-ov šum (AWGN).

Dobit od cikličkog prefiksa je dvostruka: izbjegava se ISI (prefiks služi kao zaštitni prostor u kontekstu vremena) i ICI (prefiksom se zadržava ortogonalnost nosioca). Ponovnim uvođenjem vremenskog indeksa  $l$  u priču, možemo OFDM sustav promatrati kao skup paralelnih Gauss-ovskih kanala kao na Slici 2.4..



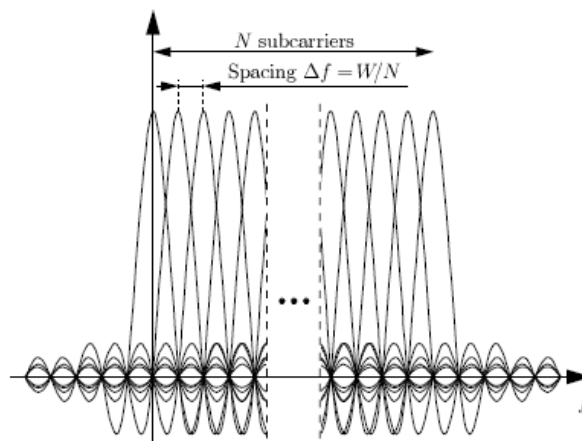
Slika 2.4.

Očigledno je da količina prenesene energije raste s dužinom cikličkog prefiksa, dok izraz za izlazni signal (2.6) ostaje isti. Prenesena energija po valu nosiocu je  $\int |\phi_k(t)|^2 dt = T/(T-T_{cp})$ , a gubitak na SNR-u, zbog odbačenog cikličkog prefiksa je

$$SNR_{loss} = -10 \log(1-\gamma),$$

gdje je  $\gamma = T_{cp}/T$ . Što je prefiks duljeg trajanja, to je veći gubitak SNR-a. Tipično je 1 dB za  $\gamma < 0.2$ .

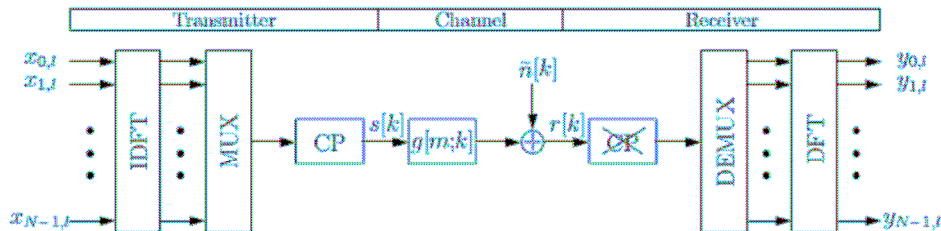
Slika 2.5. prikazuje frekvencijske karakteristike pojedinih kanala u OFDM simbolu.



Slika 2.5.

## 2.2 Diskretni model

Potpuno diskretni model prikazan je na Slici 2.6.. Usporedi li ga se s kontinuiranim, vidljivo je da je modulacija i demodulacija zamijenjena s IDFT-om i DFT-om. Ciklički prefiks radi na isti način, te je cjelokupni proračun identičan prošlom s tim da se integrali moraju zamijeniti sumama.



Slika 2.6.

Slijedi

$$\begin{aligned} y_l &= DFT(IDFT(x_l) \otimes g_l + \tilde{n}_l) \\ &= DFT(IDFT(x_l) \otimes g_l) + n_l, \end{aligned}$$

gdje  $y_l$  sadrži N primljenih podatkovnih točaka,  $x_l$  predstavlja točke konstelacije,  $g$  impulsni odziv kanala (nadopunjen s nulama do dužine N), a  $\tilde{n}_l$  je šum u kanalu.

## 2.3 Nedostaci

### ·Disperzija

I vremensko i frekvencijsko rasipanje u kanalu mogu narušiti ortogonalnost sustava, tj. uvesti ISI i ICI. Ako ovi efekti nisu u dovoljnoj mjeri potisnuti cikličkim prefiksom, treba ih uzeti u razmatranje pri proračunu.

### ·Nelinearnosti

OFDM sustavi postavljaju prilične zahtjeve na linearna pojačala. Nelinearnost pojačala može uzrokovati ISI i ICI u sustavu. Posebno, ako pojačala nemaju odgovarajući *output back-off (OBO)*, može doći do znatnih izobličenja usljed odsijecanja (*clipping*).

### ·Vanjske smetnje

U bežičnim sustavima smetnje obično dolaze od radio-odašiljača i drugih vrsta elektroničke opreme u blizini prijammnika. U ožičenim sustavima ograničavajući faktor je obično preslušavanje.

## Poglavlje 3

### Sustavi

Dvije glavne grupe komunikacijskih sustava su oni bežični i ožičeni. Na primjer, pri dizajnu bežičnog OFDM sustva glavni uzrok "pucanja veze" je velika prepreka, dok je kod ožičenih sustava kamen spoticanja preslušavanje i impulsni šum.

#### 3.1 Bežični sustavi

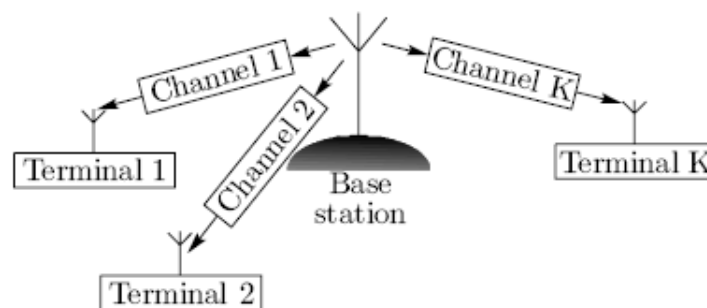
U bežičnim sustavima, promjene u fizičkom okolišu uzrokuju "pucanje veze". Pritom se misli na relativno pomicanje odašiljača i prijarnika, te pomicanje prepreka. Pri razvoju novih standarda za bežične sustave, modeli kanala se često klasificiraju prema okolišu u kojem radi prijarnik. Tako na primjer imamo okoliše opisane kao "Rural area", "Buisness indor"...

Razmatranju će se pristupiti iz dva kuta: prijenos od bazne stanice ka mobilnim terminalima (*downlink*), te prijenosu od mobilnih terminala ka baznoj stanici (*uplink*). Najčešće razmatrani bežični OFDM sustavi su oni za *broadcasting*, tj. oni koji nemaju povratni kanal. Sustavi za mobilne telefone (*cellular systems*) s druge strane, imaju i *uplink* i *downlink*.

##### 3.1.1 Downlink

Shematski prikaz takvog sustava dan je na Slici 3.1.. U ovom slučaju mobilni terminal n prima signal  $s(t)$  bazne stanice kroz vlastiti kanal  $g_n(t)$  i primljeni signal je

$$r_n(t) = (s * g_n)(t).$$



Slika 3.1.

Okoliš uvjetuje da se svaki prijarnik (terminal) mora sinkronizirati s baznom stanicom i da, s njegova stajališta, drugi terminali ne postoje. Ovo čini sinkronizaciju razmjerno laganom.

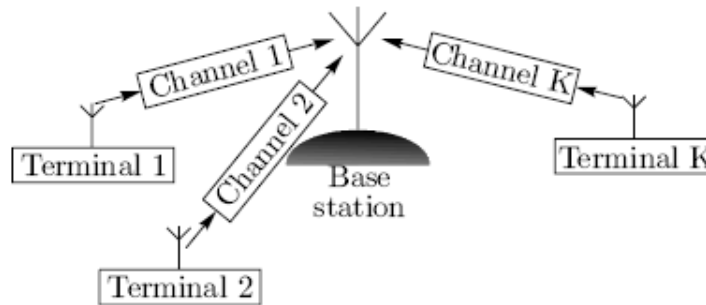
##### 3.1.2 Uplink



Shematski prikaz sustava dan je na Slici 3.2.. U ovom slučaju bazna stanica prima odaslani signal s mobilnog terminala n kroz kanal  $g_n(t)$ , a primljeni signal je

$$r_n(t) = \sum_{n=1}^K (s * g_n)(t),$$

suma signala sa svim mobilnih terminala.



Slika 3.2

Glavni problem ovdje je superpozicija svih signala koji stižu kroz različite kanale. Da bi bazna stanica mogla razlikovati signale s pojedinih mobilnih terminala, mora biti ostvarena dovoljna ortogonalnost među signalima koje prima. Primjenjuje se nekoliko metoda koje uključuju kombinaciju OFDM-a, CMDA-a, TDMA-a i FDMA-a. Bez obzira koja se metoda odabere za izdvajanje signala, glavni problem je sinkronizacija. Da se izbjegne interferencija svi mobilni terminali moraju biti zajednički sinkronizirani s baznom stanicom.

### 3.2 Ožičeni sustavi

Bakrena parica zanemarivo mijenja fizička i električka svojstva tijekom vremena i stoga se razmatra kao stacionaran kanal. To čini mogućim upotrebu *bit loading* tehnike koja dobro iskorištava spektralno ograničen kanal. Kad se *bit loading* koristi u ožičenim OFDM sustavima, kombinaciju oslovljavamo kao DMT.

S obzirom da OFDM u kombinaciji s *bit loading*-om dobro iskorištava raspoloživi frekvencijski pojas, idealan je kandidat za DSL sustave.

#### 3.2.1 Prijenosna funkcija pretplatničke linije

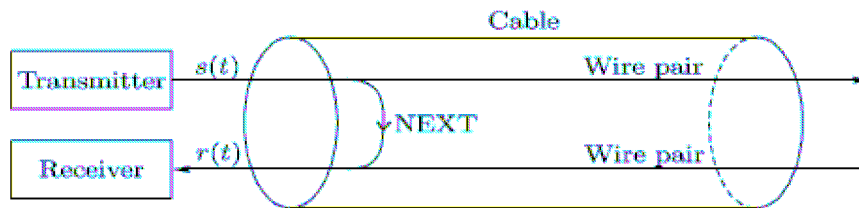
Za DSL-ove koji koriste široko frekvencijsko područje, nekoliko MHz ili više, prijenosna funkcija "s kraja na kraj" (*attenuation function*) je oblika

$$|H(f, d)|^2 = e^{-dk\sqrt{f}},$$

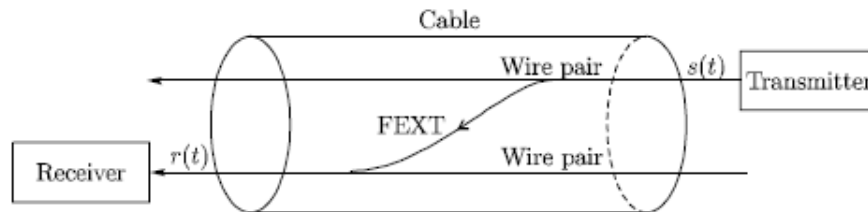
gdje je  $d$  duljina kabela i  $k$  konstanta kabela.

#### 3.2.2 Šum i preslušavanje

Najvažniji izvori šuma kod pretplatničkih linija su preslušavanje s drugim paricama u istom kabelu, RF šum iz obližnjih radio-odašiljača i impulsni šumovi koji potječu od releja, preklopki, električnih strojeva,... AWGN općenito nije ograničavajući faktor za kraće pretplatničke linije, ali postaje primjetan s povećanjem duljine kabela. Tipično ga se u modelu kanala zadaje s spektralnom gustoćom od  $1.7 \mu V / \sqrt{Hz}$ . Impulsne šumove je teško opisati matematički; doskače im se posebnim kodovima. Problem RF šuma kod DSL sustava može se ublažiti pak s OFDM-om i *bit loading*-om. Načelno su dvije vrste preslušavanja: preslušavanje na bližem (NEXT) i preslušavanje na daljem kraju (FEXT). Vidi Sliku 3.3. i 3.4..



Slika 3.4.



Slika 3.5.

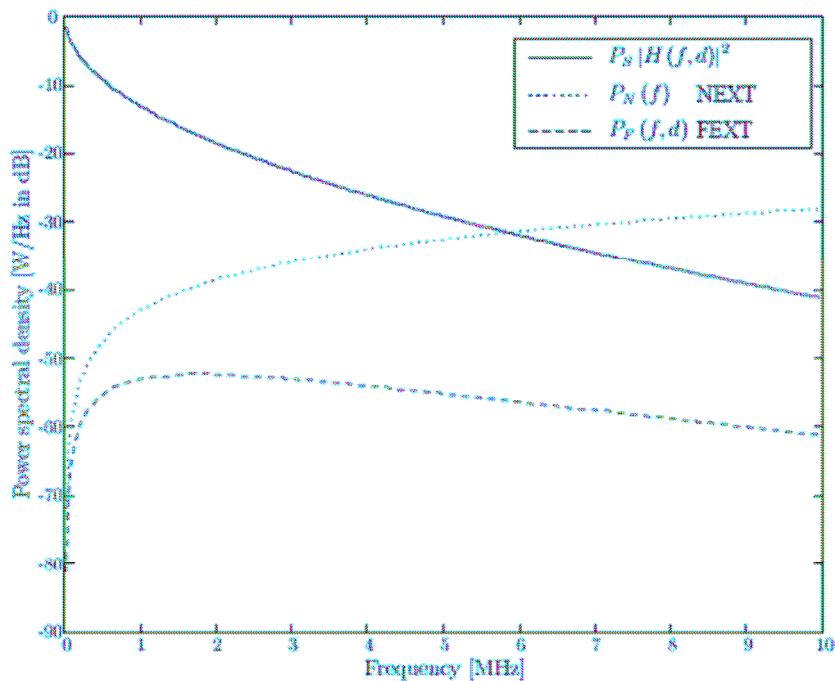
Spektralna gustoća NEXT-a se modelira kako slijedi

$$P_N(f) = P_s(f)k_N f^{3/2},$$

a spektralna gustoća FEXT-a kao

$$P_F(f, d) = P_s(f)k_F f^2 |H(f, d)|^2 d = P_s(f)k_F f^2 e^{-dk\sqrt{f}} d,$$

gdje je  $P_s(f)$  spktralna gustoća emitiranih signala,  $k_N$  i  $k_F$  su konstante ovisne o tipu kabela, koliko su dobro kabeli balansirani i broju bakrenih parica. Primjer za navedene veličine dan je na Slici 3.5..



Slika 3.5.

## Poglavlje 4

### Sinkronizacija

OFDM je jako osjetljiv na pogreške sinkronizacije. Ovdje je dan prikaz tri problema sinkronizacije: sinkronizacija simbola, frekvencija nosilaca te frekvencija otipkavanja.

#### 4.1 Sinkronizacija simbola

##### 4.1.1 *Timing errors*

Sušтина problema je u utvrđivanju trenutka u vremenu kad simbol počinje. Upotrebom cikličkog prefiksa su donekle pak smanjeni zahtjevi na sinkronizaciju. Vremenski pomak uzrokuje pomak u fazi nosioca koji je najveći na rubovima frekventijskog pojasa. Ako je vremenska pogreška dovoljno mala da zadrži impulsni odziv kanala unutar granica cikličkog prefiksa, ortogonalnost je zadržana. U protivnom se dešava ISI.

Dvije su glavne metode za sinkronizaciju simbola: jedna temeljena na pilotima, a druga na cikličkom prefiksu.

Prva metoda sastoji se od tri faze: detekcije snage, grube i fine sinkronizacije. U prvoj fazi se detektira OFDM signal mjerenjem primljene snage koja se uspoređuje s pragom. Druga faza (gruba sinkronizacija) se koristi za ostvarivanje sinkronizacijskog poravnanja od  $\pm 0.5$  uzoraka. To se radi koreliranjem primljenog signala s kopijom

emitiranog sinkronizacijskog signala. U zadnjoj fazi (fina sinkronizacija) kanali s pilotima se uspoređuju s estimiranim kanalima dobivenim pomoću pilota. Kod druge metode (ciklički prefiks) se formira razlika uzoraka razmaka  $N$ ,  $r(k) - r(k + N)$ . Kad jedan od uzoraka pripada cikličkom prefiksu a drugi OFDM simbolu, razlika bi trebala biti mala. Ograničavanjem ove razlike pravokutnim vremenskim otvorom trajanja jednakog trajanju cikličkog prefiksa, izlazni signal ima minimum kad počinje OFDM simbol. Sinkronizacija kod *uplink*-a je teža nego kod *downlink*-a zbog činjenice da postoji drugačiji vremenski pomak kod svakog korisnika.

## 4.2 Sinkronizacija frekvencije otipkavanja

Primljeni kontinuirani signal se otipkava u trenucima koje zadaje *clock* prijamnika. I ovdje su dvije grupe metoda za obračun s pogreškama. Kod prve metode *timing* algoritam kontrolira VCO (*voltage-controlled oscillator*) s ciljem da izjednači *clock* prijamnika i odašiljača. Druga metoda koristi fiksni period otipkavanja koji pak zahtijeva dodatnu obradu u digitalnoj domeni.

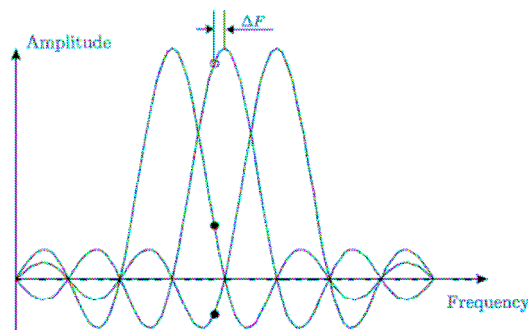
## 4.3 Sinkronizacija frekvencija valova nosilaca

### 4.3.1 Pogreške u frekvenciji

Pomaci u frekvenciji nastaju zbog nejednakih oscilatora u odašiljaču i prijamniku, Dopplerovim pomacima ili šumu faze zbog nelinearnosti kanala. To uzrokuje dvije stvari: smanjivanje amplitude signala (sinc funkcije su pomaknute i ne otipkavaju se kad prolaze kroz maksimum) te ICI. Degradaciju  $D$  možemo aproksimirati slijedećim izrazom

$$D(\text{dB}) \approx \frac{10}{3 \ln 10} (\pi \Delta f)^2 \frac{E_s}{N_0} = \frac{10}{3 \ln 10} \left( \pi \frac{N \cdot \Delta F}{W} \right)^2 \frac{E_s}{N_0},$$

gdje je  $\Delta f = \frac{\Delta F}{W/N}$ , gdje je  $\Delta F$  pomak u frekvenciji, a  $N$  broj nosioca.



Slika 4.1. Efekti pomaka  $\Delta F$ : smanjivanje amplitude (°) i ICI (·).

### 4.3.2 Estimatori frekvencije

Nekoliko je razrađenih metoda koje se mogu svrstati u dvije skupine: one temeljne na pilotima i one temeljene na cikličkom prefiksu.

Pilot-algoritmi koriste neke kanale za emitiranje pilota. Koristeći te poznate simbole, pomak u fazi uzrokovan pomakom u frekvenciji se može estimirati. Pod pretpostavkom da je pomak u frekvenciji manji od polovine pojasa kanala, postoji jedan na jedan preslikavanje između pomaka u fazi i pomaka u frekvenciji. Tehnika koja koristi ciklički prefiks temelji se na redudanciji istog koja se može iskoristiti na više načina. Jedan od njih je maksimiziranje estimacije sličnosti (*likelihood estimation*).

## Poglavlje 5

### Estimacija kanala

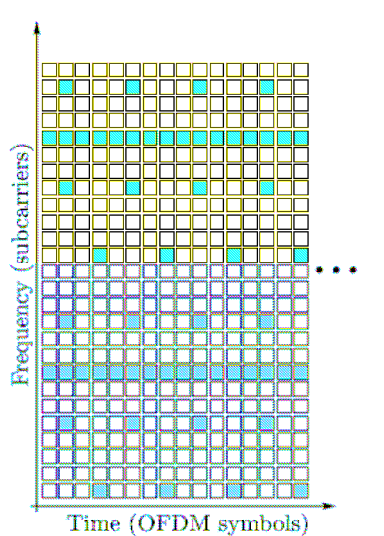
Modulacije možemo podijeliti u koherentne i nekoherentne. Kad se koristi diferencijalna modulacija, nema potrebe za estimacijom kanala s obzirom na to da je informacija enkodirana u razlici dva uzastopna simbola. Ovo je uobičajena tehnika u bežičnim sustavima koja, budući da estimator kanala nije potreban, reducira složenost prijarnika. Međutim, u bežičnim sustavima kad su posrijedi velike brzine koherentna modulacija postaje interesantan izbor.

U ožičenim sustavima estimacija kanala je jasna i neće se dalje razmatrati već će sva pažnja biti usmjerena bežičnim sustavima.

Dva su glavna problema u konstrukciji estimatora kanala za bežične OFDM sustave. Prvi je kako pilot treba biti emitiran jer se pilot-informacija koristi kao referenca u estimaciji kanala. Drugi problem je dizajn estimatora prihvatljive složenosti i dobre sposobnosti praćenja kanala.

### 5.1 Pilot-informacija

Estimatori kanala obično trebaju neku vrstu pilot-informacije kao referencu. Kanal koji se gubi zahtijeva stalan nadzor, pa se pilot mora manje-više stalno emitirati. Učinkovit način praćenja stanja kanala je da se emitiraju simboli pilot signala umjesto podataka na određenim lokacijama vremensko-frekvencijske mreže. Vidi Sliku 5.1..



Slika 5.1.

Općenito, kanal se može promatrati kao 2-D signal (vrijeme i frekvencija) koji je otipkan na pozicijama pilota.

## 5.2. Dizajn estimatora

Uz pretpostavku da je uzorak pilota odabran, optimalni linearni estimator kanala u kontekstu srednje kvadratne pogreške je 2-D Wiener-ov filtar. Ako poznajemo statistička svojstva kanala, taj je estimator lako dizajnirati. Visoke brzine prijenosa uz mali BER zahtijevaju estimator koji će biti male složenosti i jako točan. Wienerov filtar ne ide uz zahtjev na malu kompleksnost, a jednostavnije rješenje neće zadovoljiti po pogledu točnosti.

S tim u vezi koriste se dva odvojena filtra umjesto jednog 2-D FIR filtra. Estimacija se sastoji od dva koraka. U prvom se radi filtracija 1-D FIR filtrom u frekvenciji, a u drugom isto to drugim FIR-om, ali u vremenu.

## Poglavlje 6

### Zaključak

Jedna od glavnih prednosti OFDM-a je njegova robusnost u smislu višestaznog širenja. Dakle, njegova primjena je tipično u radio-komunikacijama. Jako je pogodan za *broadcasting* aplikacije poput DAB-a i DVB-a. Upotreba OFDM se povećava u višekorisničkim sustavima. *Downlink* u takvim sustavima je sličan *broadcastingu*, dok *uplink* postavlja velike zahtjeve na sinkronizaciju. Budućnost OFDM kao prijenosne tehnike za višekorisničke sustave ovisiti će o tome kako dobro problemi sinkronizacije mogu biti riješeni.

U ožičenim sustavima struktura OFDM-a omogućava učinkoviti *bit loading*. Pridjeljivanjem različitog broja bitova različitim kanalima ovisno o njihovu SNR-u, može se ostvariti učinkovita komunikacija. OFDM je dominantna tehnika u digitalnim preplatničkim linijama.

Dva glavna problema OFDM sustava su visok omjer vršne i prosječne snage i sinkronizacija. Prvi problem postavlja jake zahtjeve na linearna pojačala, a pogreške u sinkronizaciji će narušiti ortogonalnost i prouzročiti interferenciju. Upotrebom cikličkog prefiksa ti su problemi znatno smanjeni, ali ostaju i dalje prisutni.

U bilo kojem digitalnom komunikacijskom sustavu dvije su moguće modulacije: koherentna ili diferencijalna. Europski DAB sustav koristi diferencijalni QPSK koji je pogodan za male brzine prijenosa te se da implementirati s jednostavnim i jeftinim prijamnicima. Međutim, kod DVB-a su brzine osjetno veće i mali BER postaje teško ostvariti s PSK-om. Kao izbor se nameću pristupi koji koriste više amplituda za prikaz simbola. Zahvaljujući strukturi OFDM-a, lako je realizirati učinkovite estimatore kanala.

## Literatura

- [1] Ove Edfors, Magnus Sandell, Jaan Jaap van de Beek, Daniel Landström, Frank Sjöberg. An introduction to frequency-division multiplexing. Research report TULEA 1996.