



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών

Τεχνική OFDM-OFDMA

Δημοσθένης Βουγιούκας (dnougiou@aegean.gr)

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Περιεχόμενα

- ◆ OFDM
 - Εισαγωγή – Βασικές Αρχές
 - Υλοποίηση
 - Παράμετροι συστήματος
- ◆ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
 - Δίκτυα Broadcasting (DAB, DVB)
 - Τοπικά Ασύρματα Δίκτυα (WLAN, WPAN)
 - ADSL
 - Powerline Communications
- ◆ Πολλαπλή Πρόσβαση (OFDMA)

Απαιτήσεις σύγχρονων συστημάτων επικοινωνιών

- ◆ Ευελιξία : Μεταβαλλόμενος ρυθμός μετάδοσης, Λειτουργία σε κάθε τύπο περιβάλλοντος, Επεκτασιμότητα, Συμβατότητα με υφιστάμενες δομές
- ◆ Ολοκληρωμένα, προγραμματιζόμενα στοιχεία (τεχνολογία Software Radio)
- ◆ Αυξημένη χωρητικότητα
- ◆ Μεταβαλλόμενη ποιότητα υπηρεσίας
- ◆ Ελάχιστη ισχύς εκπομπής
- ◆ Ελάχιστες απαιτήσεις εναρμόνισης

Ασύρματες Υπηρεσίες Ευρείας Ζώνης

- ◆ Ζητούμενο:
 - Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, ακόμα και σε μη ευνοϊκό περιβάλλον διάδοσης
- ◆ Πρόβλημα:
 - Διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference - ISI)
- ◆ Αντιμετώπιση:
 - Ισοστάθμιση (πρόβλημα απο-συνέλιξης)
- ◆ Ένα κανάλι ευρείας ζώνης υποφέρει από διαλείψεις επιλεκτικές ως προς την συχνότητα
- ◆ Αντιμετώπιση:
 - Δημιουργία πολλαπλών καναλιών
 - Στενής ζώνης → Επίπεδες Διαλείψεις
 - Υποπολλαπλασίου Ρυθμού Μετάδοσης → Εξάλειψη ISI
 - Ορθογώνιων → Υψηλή Φασματική Απόδοση

Πολυδιαδρομική Διάδοση

- ◆ Σύμβολο: πλήθος από bits που ομαδοποιούνται για την μετάδοσή τους
- ◆ Υψηλός ρυθμός μετάδοσης \rightarrow μικρό μέγεθος συμβόλου T
- ◆ Είδη του συμβόλου που καταφτάνουν αργοπορημένα στο δέκτη λόγω ανάκλασης ή περίθλασης συμπίπτουν με εικόνες επόμενου συμβόλου
- ◆ Καθυστέρηση άφιξης (delay spread) τ καθορίζεται από το είδος του καναλιού
- ◆ Αν $\tau > T$, τότε έχουμε Διασυμβολική Παρεμβολή

Πολυδιαδρομική Διάδοση

- ◆ Αντιμετώπιση με ισοσταθμιστές
 - Αναμένουν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα
 - Απορρίπτουν αργοπορημένα είδωλα ενός συμβόλου
- ◆ Πολύ ακριβοί λόγω
 - Υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων
 - Διαρκώς μεταβαλλόμενου διαύλου
- ◆ Άρα, επιδιώκουμε να κρατήσουμε μεγάλη την περίοδο του συμβόλου T

Πολυδιαδρομική Διάδοση

- ◆ Περίοδος Συμβόλου $T = \frac{1}{B}$, όπου B το εύρος ζώνης σήματος

- ◆ Εύρος συνοχής καναλιού: εύρος συχνοτήτων εντός του οποίου δύο συχνότητες υφίστανται παρόμοια εξασθένιση

$$B_C \approx \frac{1}{\tau}$$

- ◆ Για μεγάλη περίοδο T \rightarrow μικρό εύρος B_C
- ◆ Για να μην εμφανίζονται διαλείψεις επιλεκτικές ως προς την συχνότητα $\rightarrow B \ll B_C$
- ◆ Άρα, πρέπει $\tau \ll T$

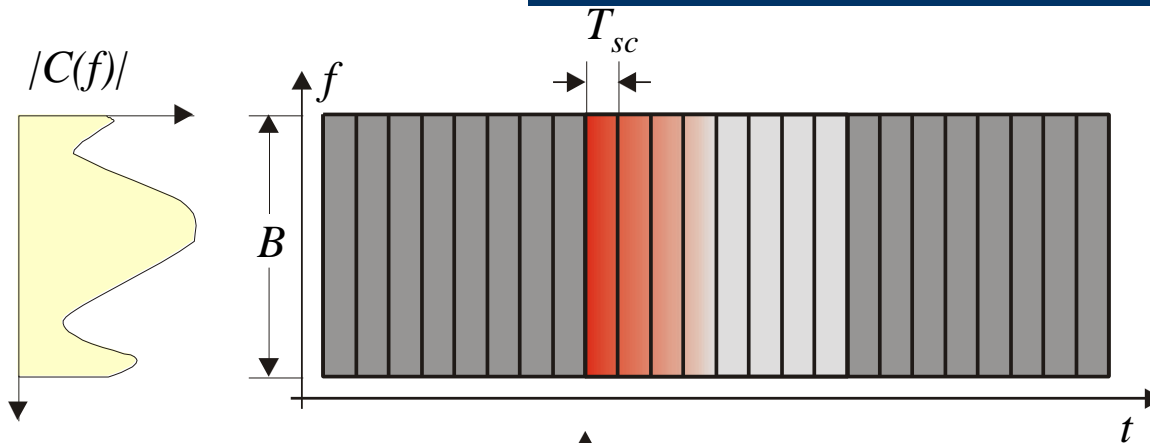
Αντιμετώπιση ISI

1. Ισοστάθμιση (Equalization)
2. Συστήματα πολλαπλών φερόντων (Multicarrier)

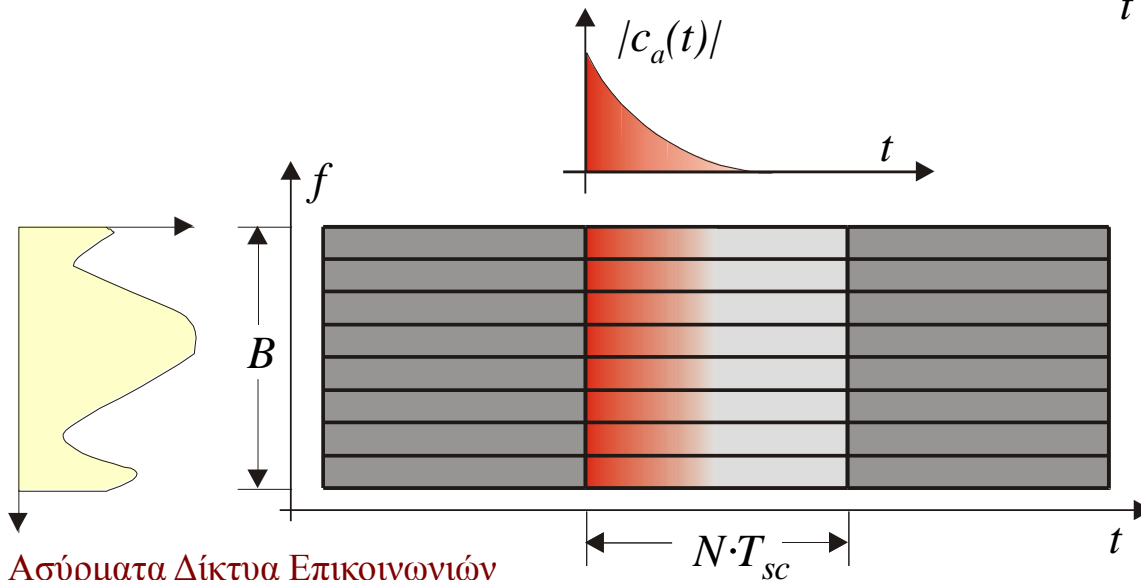
Κριτήριο Επιλογής = **ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ**

- ◆ OFDM : 64FFT (IEEE 802.11) => $96 \cdot 10^6$ πολλαπλασιασμοί/sec
- ◆ Single Carrier : OQPSK ή GMSK, 16-tap equalizer (για ίδια απόδοση ως προς data rate, delay spread robustness) => $768 \cdot 10^6$ πολλαπλασιασμοί/sec

The Multi Carrier Philosophy

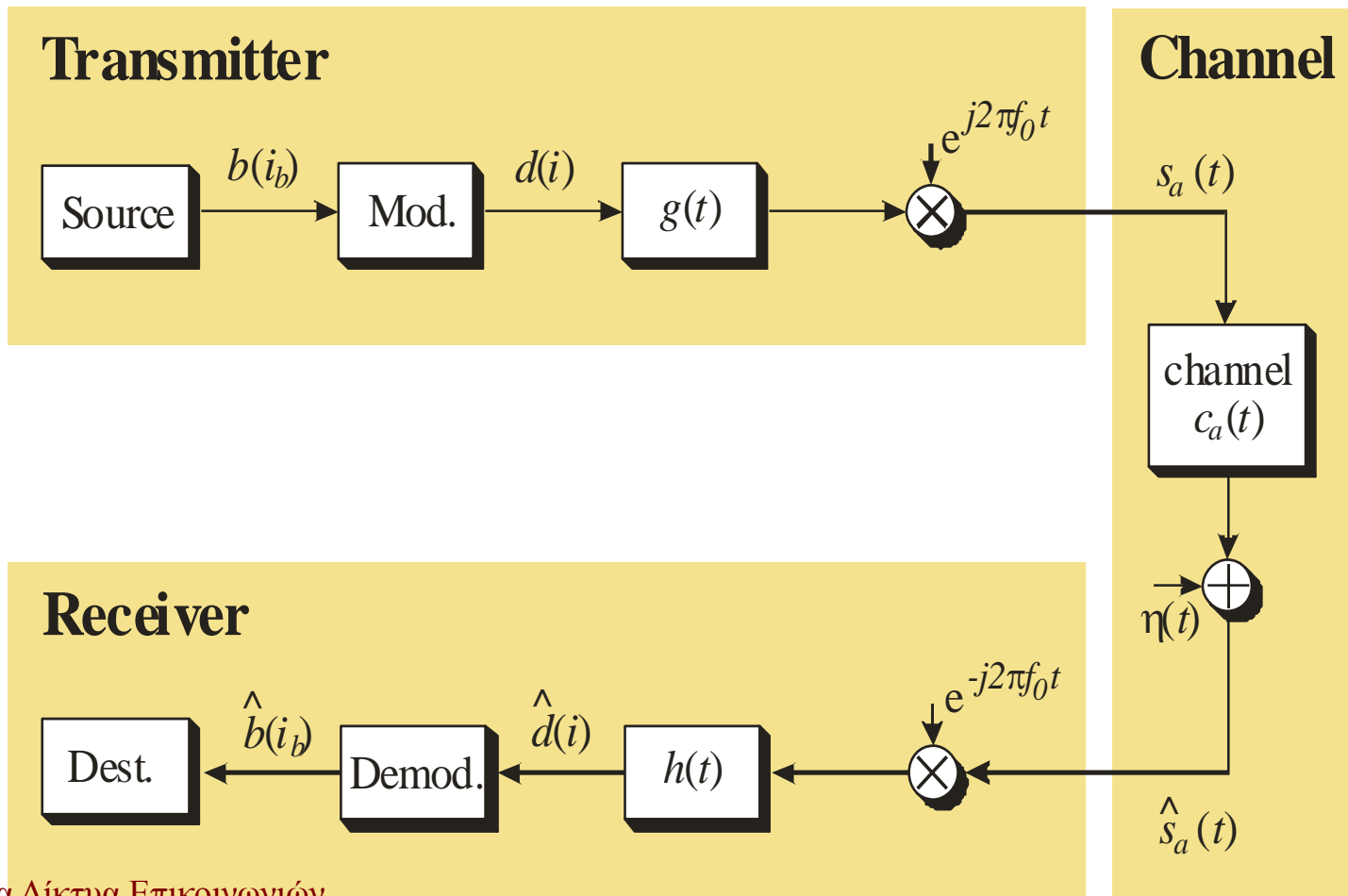


single carrier (SC)
➤ equalization problems

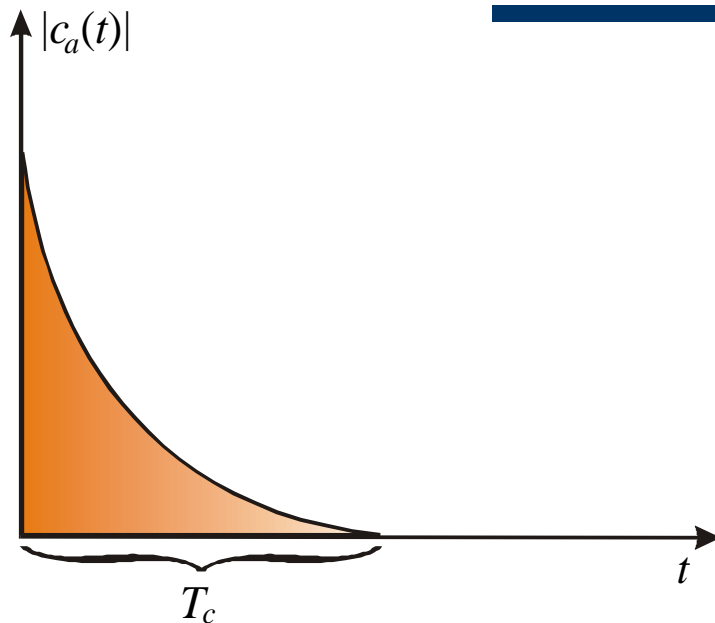


multi carrier (MC)
➤ non-selective
subchannels

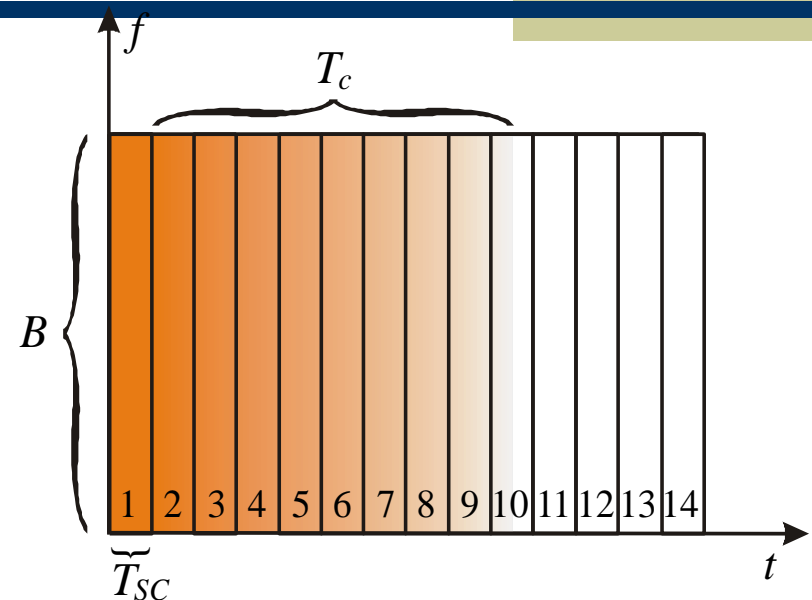
Single Carrier Transmission System (SC)



Influence of Multipath Propagation on SC Transmission



a) Channel impulse response



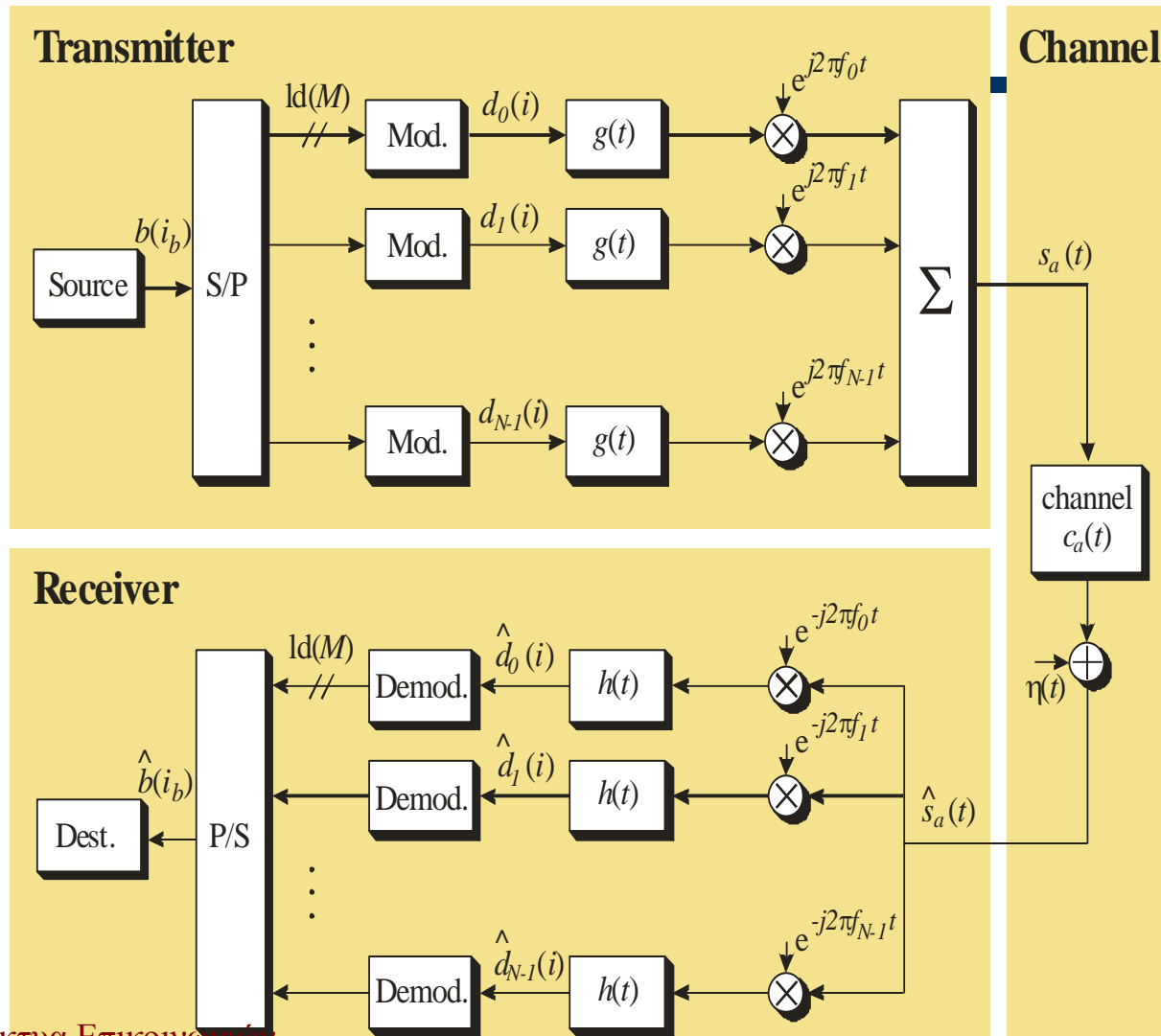
b) ISI at SC transmission

Limits for the raise of transmission rate:

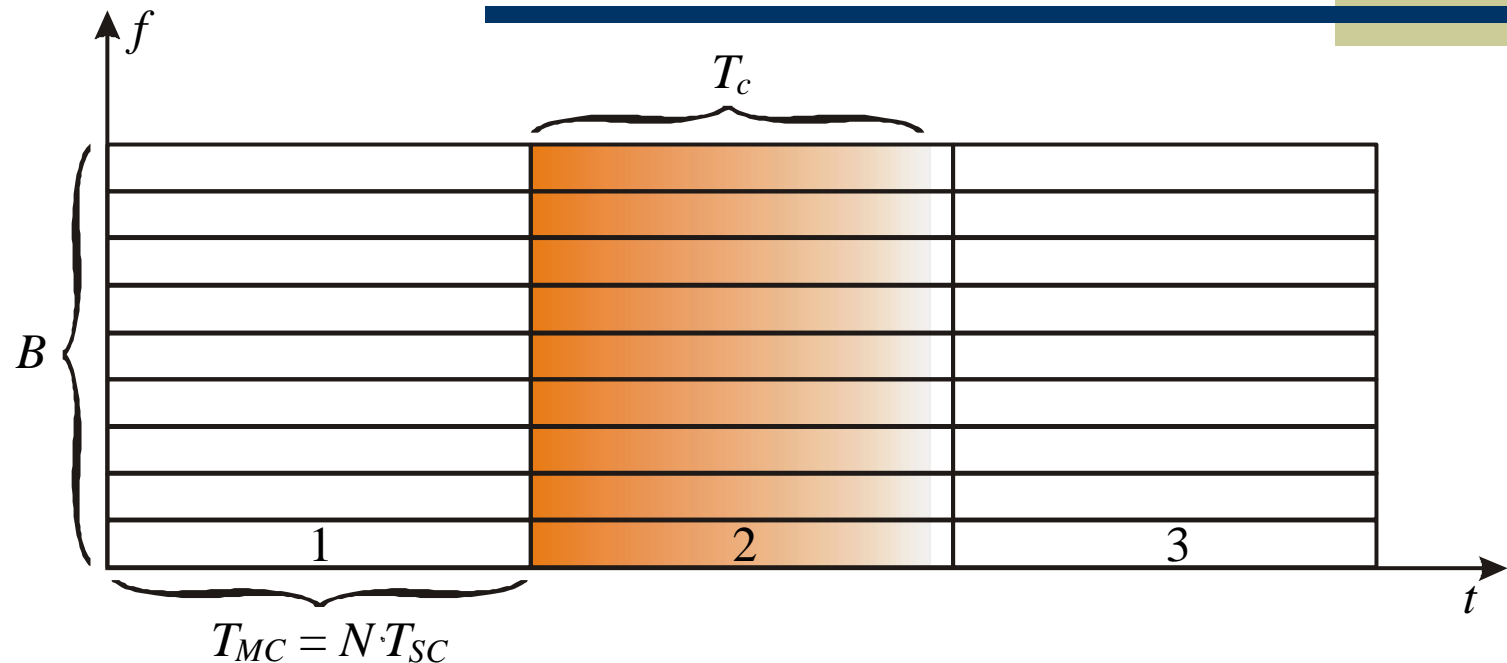
Increasing the bandwidth leads to a reduced symbol duration. In case of multipath channels the influence of Inter Symbol Interference (ISI) is amplified.

→ **The equalization effort increases dramatically!**

Multi Carrier Transmission (MC)



Channel influence on MC transmission



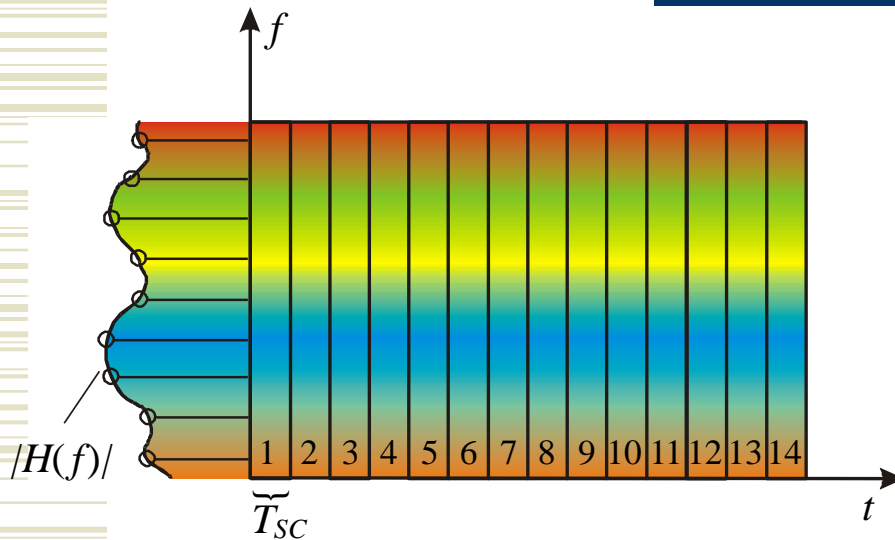
Advantages of MC over SC:

Spreading of data over multiple subcarriers reduces the data rate on each sub channel.

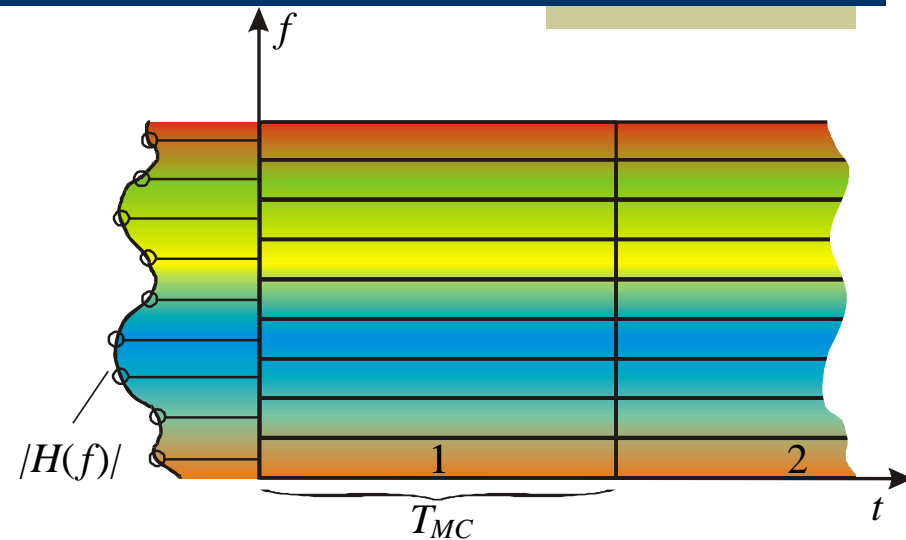
This leads to an increased symbol duration which reduces the influence of ISI.

➔ **The necessary equalization effort can be reduced dramatically!**

Influence of the Channel in Frequency Domain



a) Single carrier transmission



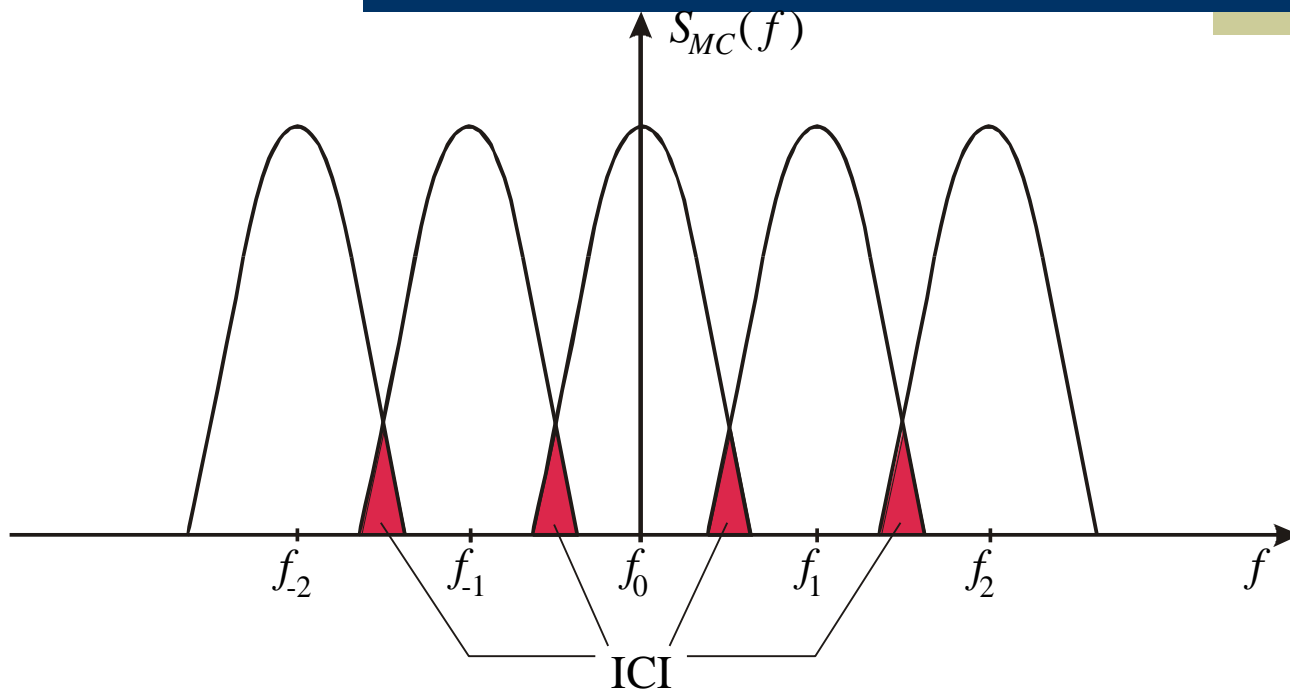
b) Multi carrier transmission

Advantage of multi carrier over single carrier transmission:

Increasing the number of subcarriers by reducing the frequency spacing leads to a lower bandwidth of the corresponding subchannels. With a sufficient number of sub-carriers each subchannel can be considered as non frequency selective. In this case the equalization only consists of a multiplicative correction on each subcarrier.

➔ **The equalization effort can be reduced dramatically!**

Inter Carrier Interference (ICI)



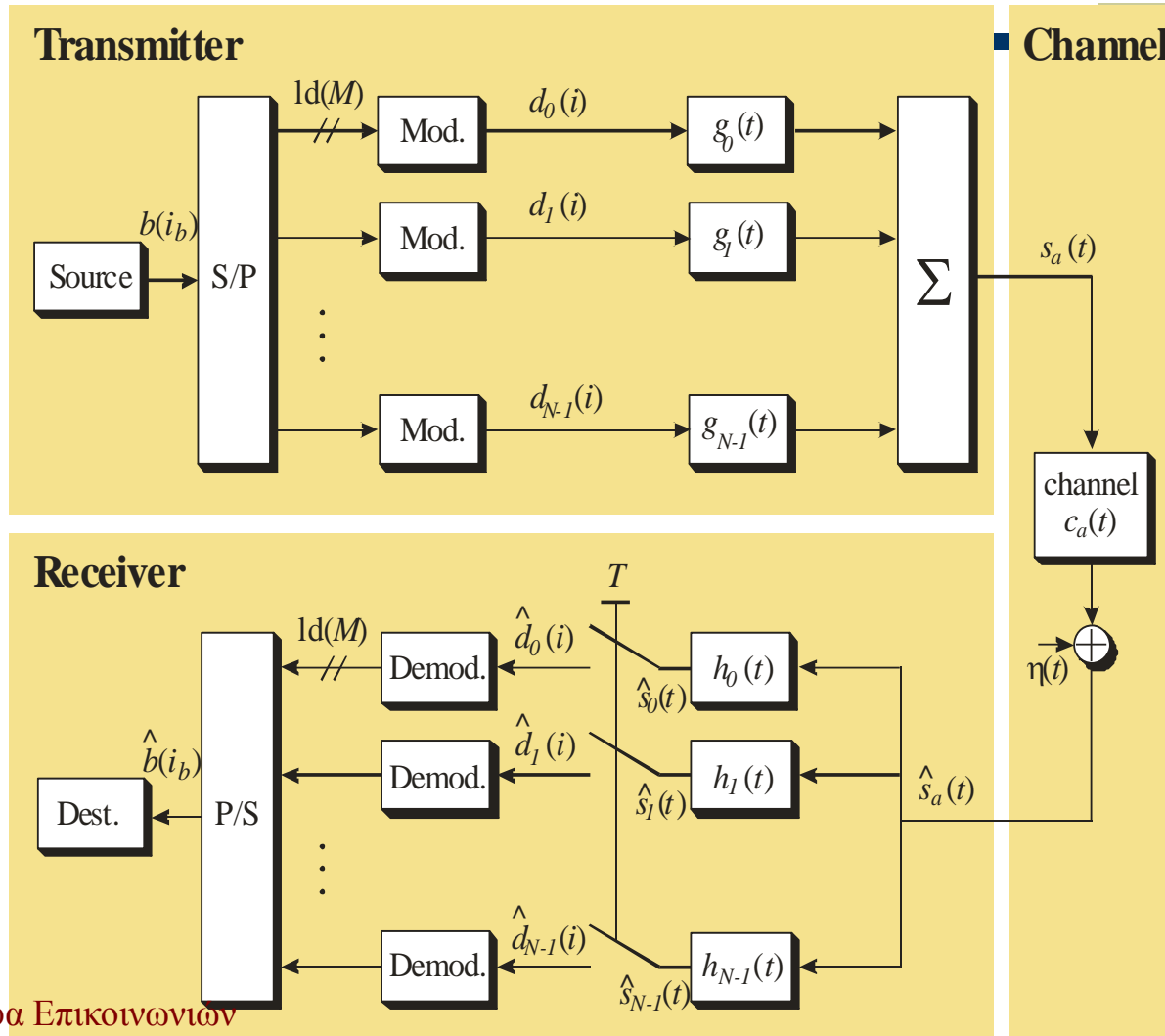
Problem of MC:

If the frequency bands of different subcarriers overlap, Inter Carrier Interference (ICI) appears.

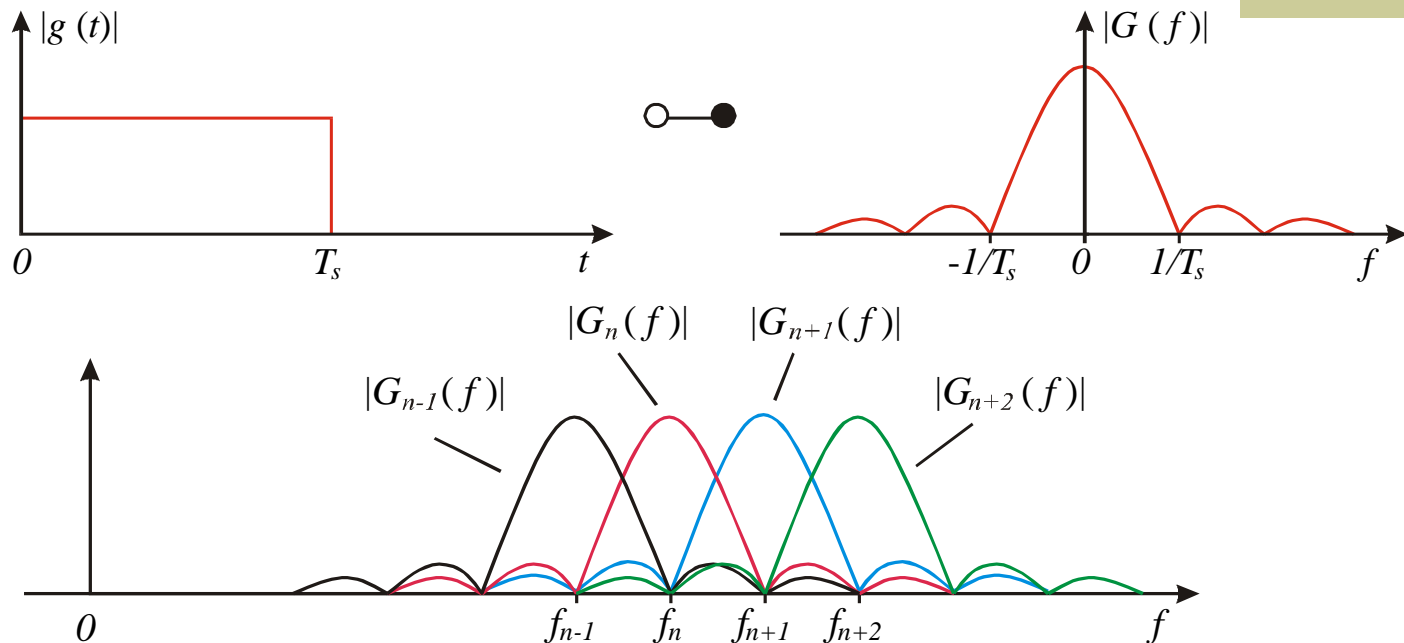
Solution:

A special design of transmit and receive filter leads to orthogonality of the subcarriers.

OFDM transmission system (time continuous)



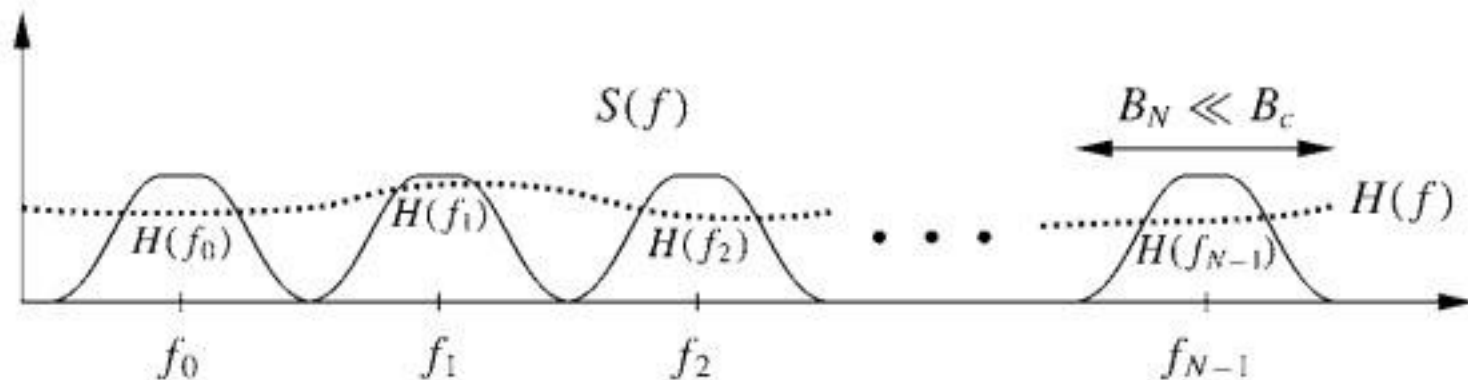
Orthogonal Subcarriers



- Ορθογώνια Σήματα: Ολοκλήρωμα γινομένου τους στην διάρκεια ενός συμβόλου είναι μηδέν
- Όπου το φάσμα ενός φέροντος παρουσιάζει κορυφή, τα γειτονικά φέροντα παρουσιάζουν μηδενισμό
- Πρέπει 2 σήματα να έχουν συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας βασικής συχνότητας

Orthogonal Subcarriers

- ◆ Διασπάμε το κανάλι σε N υποκανάλια
- ◆ Συχνότητες Λειτουργίας: $f_0, f_1, f_2, \dots, f_{N-1}$
- ◆ Εύρος ζώνης φέροντος B_N : $B_N \ll B_C$

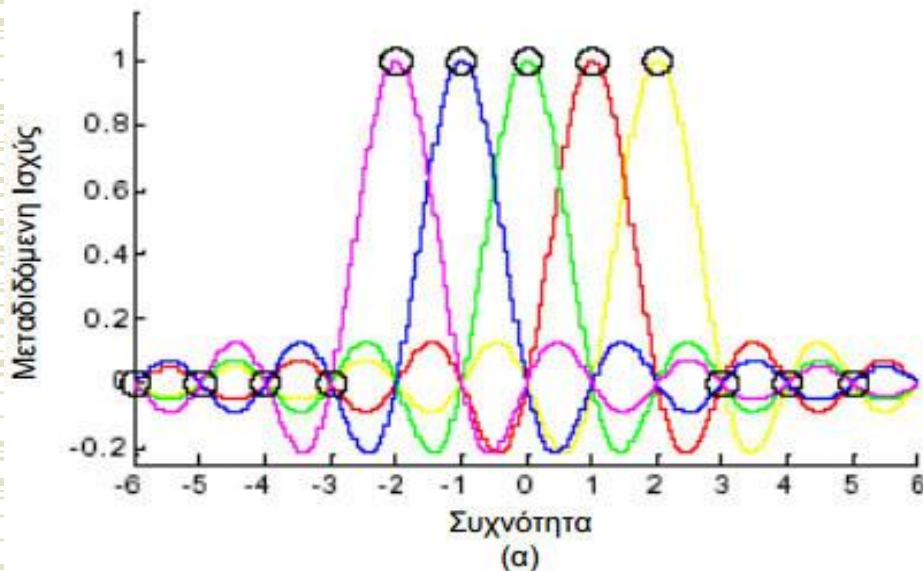


Μειονέκτημα: απαιτείται διάστημα φύλαξης μεταξύ φερόντων
Φασματικά μη αποδοτική μέθοδος

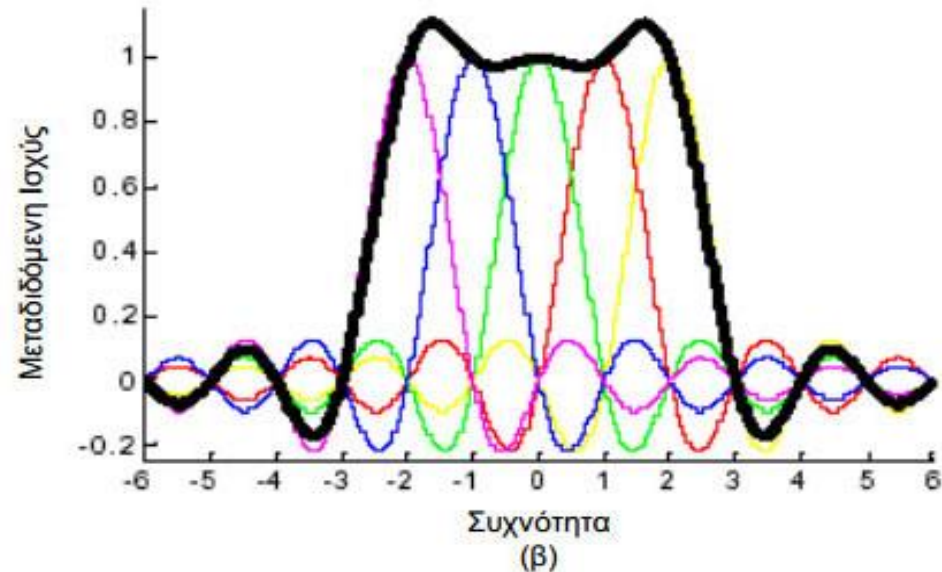
Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)

- ◆ Ένα περιοδικό σήμα μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα άπειρων ημιτονοειδών σημάτων
- ◆ Τα ημιτονοειδή σήματα έχουν συχνότητες f_0, f_1, f_2, \dots που είναι ακέραια πολλαπλάσια της αρχικής
- ◆ Επομένως τα ημιτονοειδή είναι ορθογώνια μεταξύ τους
- ◆ Ο DFT δέχεται ένα διακριτό σήμα και παράγει μία ακολουθία από συντελεστές, που δείχνει αν και πόσο συμμετέχει κάθε ημιτονοειδές στο σύνθεση του αρχικού σήματος
- ◆ Ο IDFT εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία

Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)

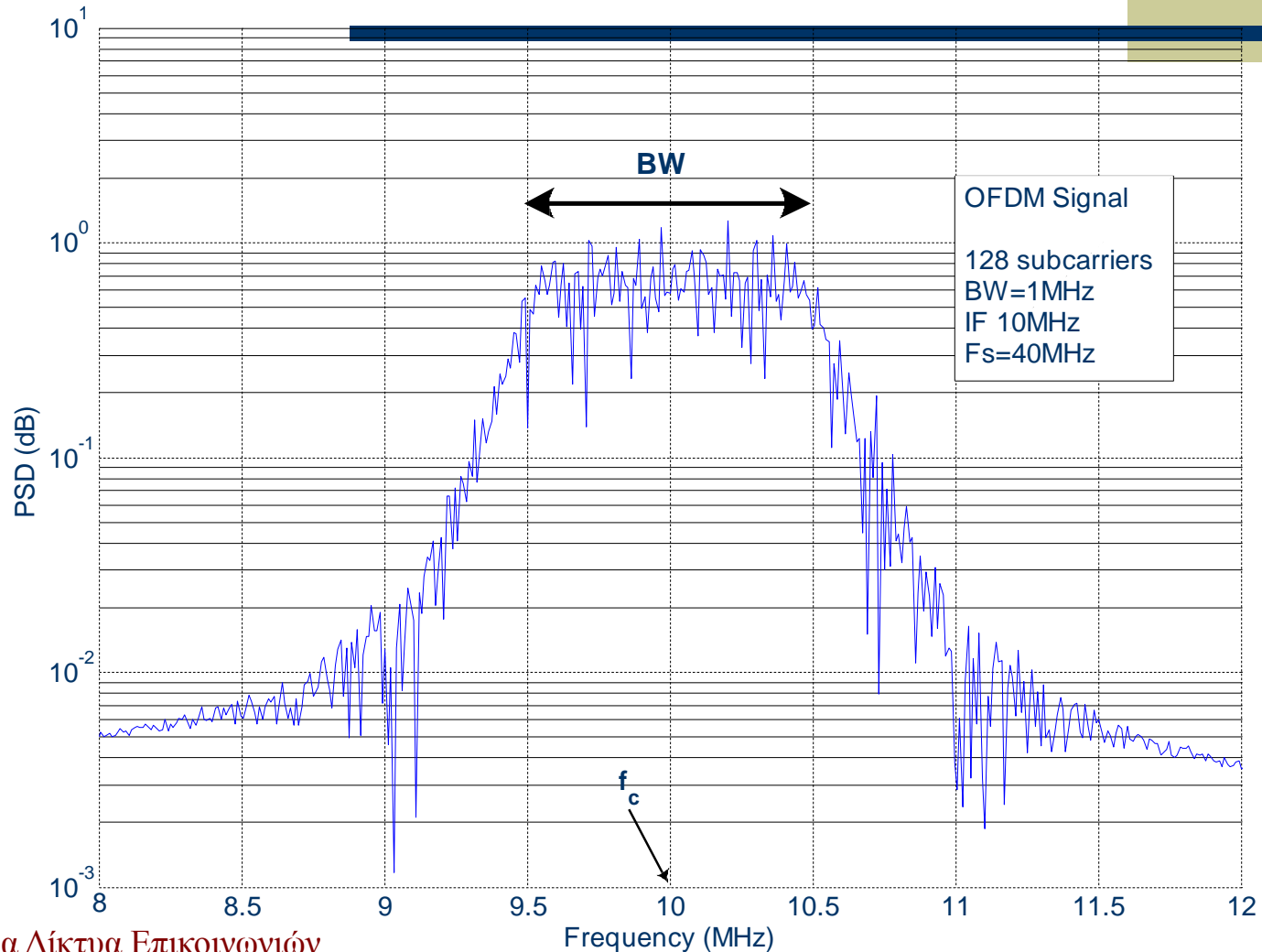


Φάσμα 5 ορθογώνιων φερόντων



Ένα OFDM σύμβολο αποτελούμενο από 5 σύμβολα

Φάσμα εκπεμπόμενου OFDM σήματος



Mathematical Description of an OFDM System

- ◆ time continuous representation of an OFDM transmitter:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} d_n(i) g(t - iT_S) e^{j2\pi f_n t}$$
$$\downarrow g(t) = \text{rect}(t/T_S), \quad f_n = n \cdot \Delta f = n/T_S$$
$$= \sum_{n=0}^{N-1} d_n(i) e^{j2\pi n t / T_S}, \quad iT_S \leq t \leq (i+1)T_S$$

- ◆ time discrete representation of an OFDM transmitter:

$$s_k(i) = s(t) \Big|_{t=iT_S+kT_A} = \sum_{n=0}^{N-1} d_n(i) e^{j2\pi n k T_A / T_S}, \quad k \in [0, 1, 2, \dots, N-1]$$

$$\downarrow N = T_S / T_A$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} d_n(i) e^{j2\pi n k / N} = \text{IDFT} \left\{ d_0(i), d_1(i), \dots, d_{N-1}(i) \right\}$$

Mathematical Description of an OFDM System

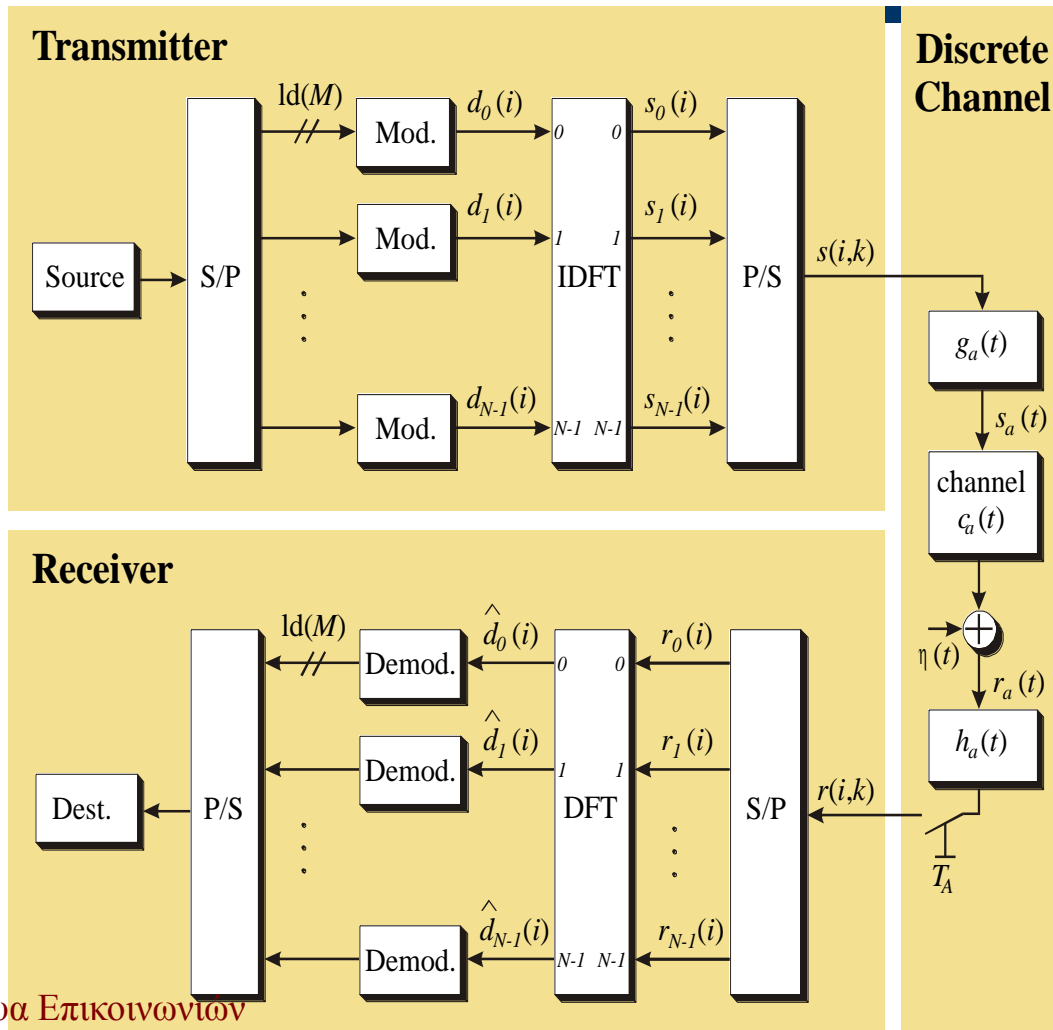
- ◆ time discrete representation of an OFDM receiver:

$$\begin{aligned}\hat{d}_n(i) &= \sum_{k=0}^{N-1} r_k(i) e^{-j2\pi kn/N} \\ &= \text{DFT} \left\{ r_0(i), r_1(i), \dots, r_{N-1}(i) \right\}\end{aligned}$$

- ◆ Complete System:

$$\hat{\mathbf{d}} = \text{DFT}_N \left\{ \text{IDFT}_N(\mathbf{r}) * \tilde{\mathbf{c}} + \tilde{\boldsymbol{\eta}} \right\}$$

Symbol Rate Model of an OFDM System



Επίδραση Ασύρματου Διαύλου

Μικρό Δf \leftrightarrow Μεγάλο T_s \rightarrow

Ευπάθεια σε χρονικές μεταβολές του διαύλου.

Πρέπει $\Delta f \gg f_{D,max}$ \leftrightarrow $T_s \ll T_{coh}$

Μεγάλο Δf \leftrightarrow Μικρό T_s \rightarrow

Ευπάθεια σε συχνοεπιλεκτική συμπεριφορά του διαύλου.

Πρέπει $\Delta f \ll BW_{coh}$ \leftrightarrow $T_s \gg \tau_{max}$

Δf : Εύρος υπο-καναλιού

T_s : Διάρκεια OFDM συμβόλου

$f_{D,max}$: Μέγιστη ολίσθηση συχνότητας (Doppler)

BW_{coh} : Coherence Bandwidth του διαύλου

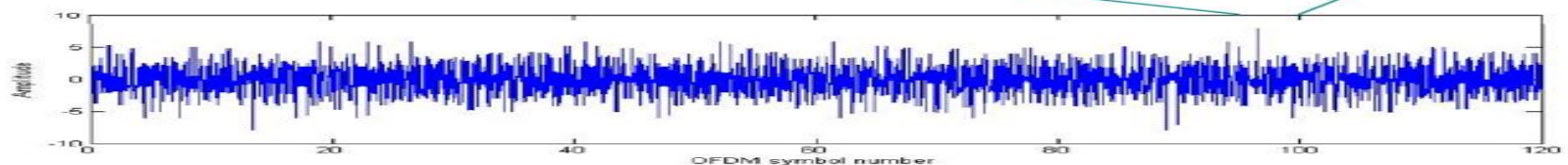
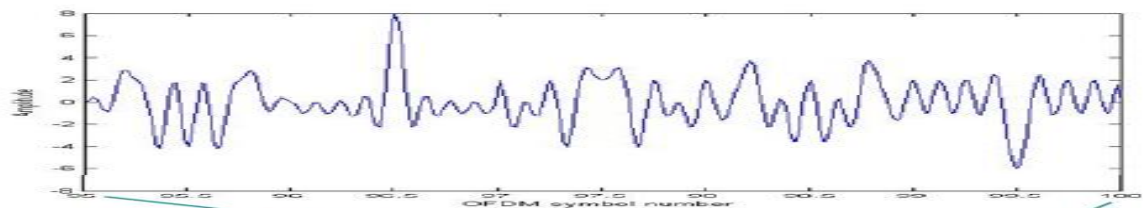
T_{coh} : Coherence Time του διαύλου

Διακυμάνσεις της στιγμιαίας ισχύος

- ◆ Ένα σήμα OFDM αποτελείται από ένα σύνολο ανεξάρτητα διαμορφωμένων συμβόλων

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k \cdot e^{(j2\pi k\Delta f t)}$$

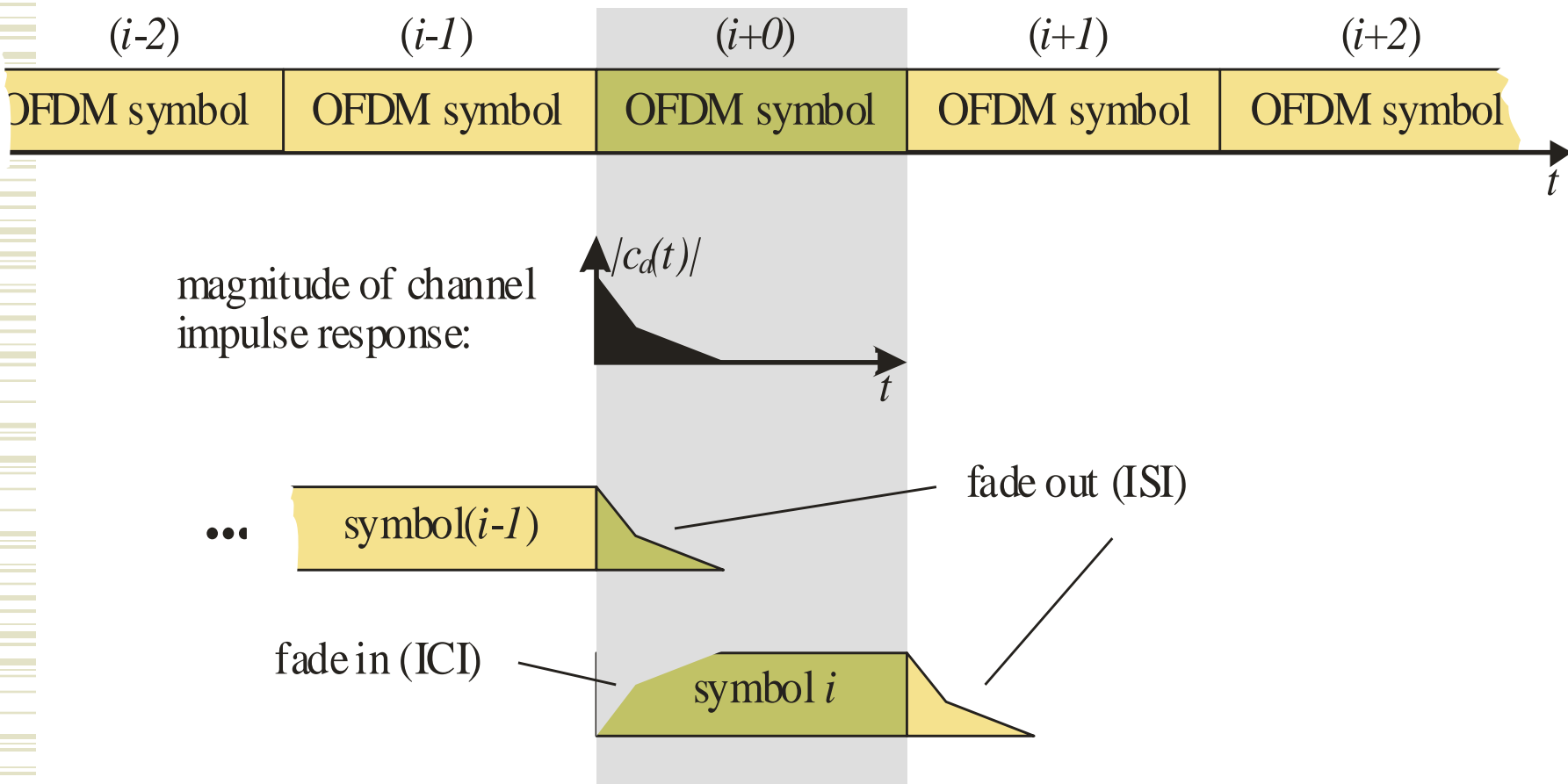
- ◆ Η προσθήκη υπο-καναλιών με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες δημιουργεί το πρόβλημα της μέγιστης προς τη μέση ισχύ της OFDM (Peak-to-average-power ratio, PAPR)



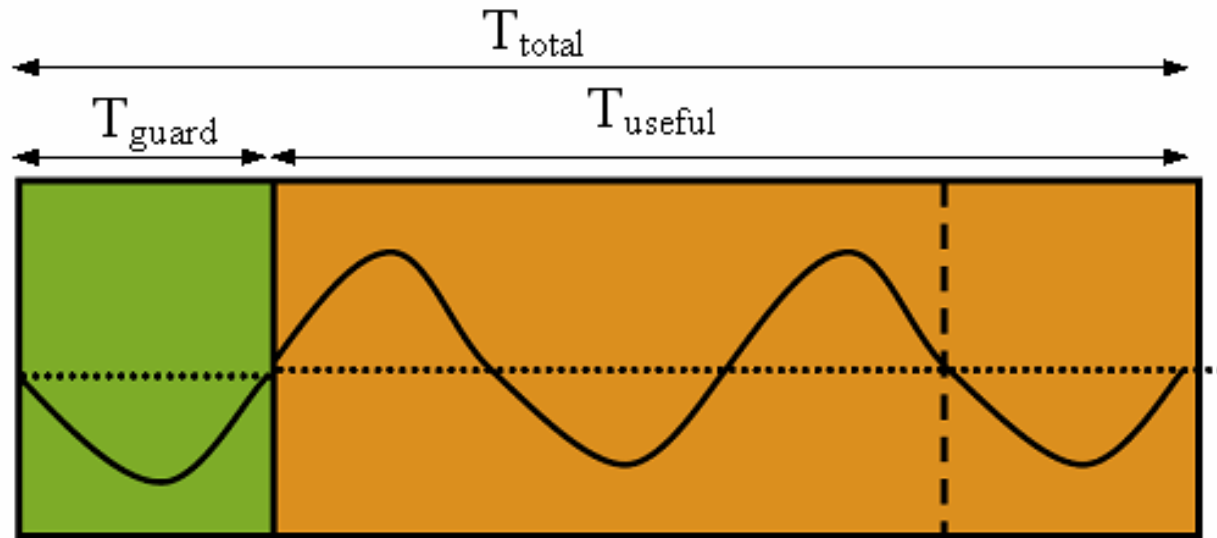
Διακυμάνσεις της στιγμιαίας ισχύος

- ◆ Η OFDM παρουσιάζει υψηλό λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ (Peak-to-Average Power Ratio)
 - Για το μεγαλύτερο ποσοστό χρόνου η ισχύς του OFDM σήματος δεν αποκλίνει από την μέση τιμή
 - Στιγμιαία όμως προκύπτουν υψηλές τιμές ισχύος που οδηγούν τους ενισχυτές στη μη-γραμμική περιοχή
 - Αλλοίωση του σήματος
 - Η PAPR αυξάνεται όσο αυξάνεται το πλήθος φερόντων

Inter-Symbol (ISI) and Inter-Carrier-Interference (ICI)



Κυκλικό Πρόθεμα (Cyclic Prefix)



- Καλύπτει το διάστημα φύλαξης
- Διατήρηση ορθογωνιότητας
- Προστασία από ISI

$$SNR_{\text{loss}} = 10 \log\left(1 - \frac{T_{\text{guard}}}{T_{\text{total}}}\right)$$

$$SNR_{\text{loss}} \approx \frac{1}{4} \frac{T_{\text{guard}}}{T_{\text{useful}}} \quad \text{[dB]}$$

Κυκλικό Πρόθεμα (Cyclic Prefix)

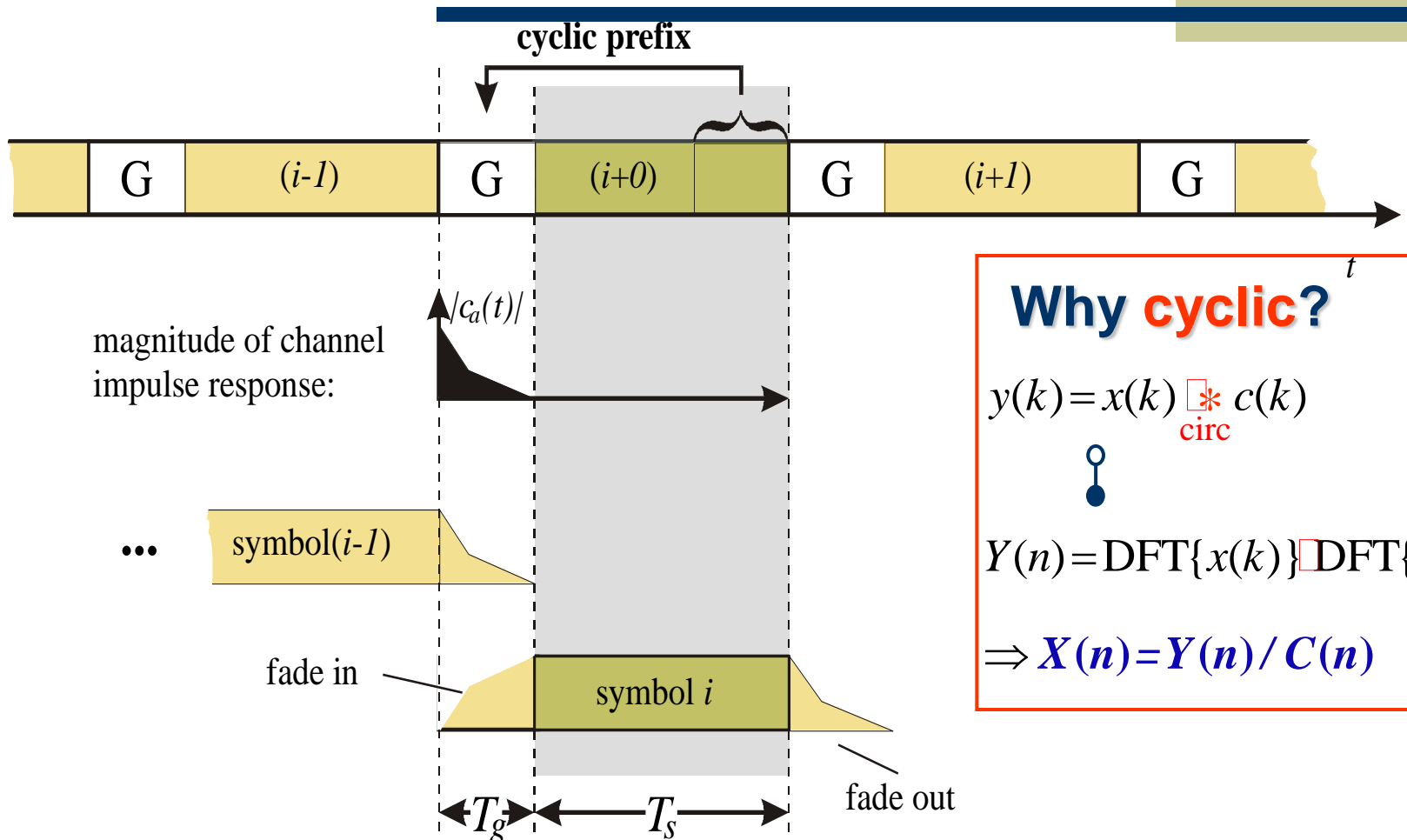
- ◆ Transmission in frequency domain (FFT)
- ◆ DFT properties

$$FT\{d_n \square h_n\} = FT\{d_n\} \oplus FT\{h_n\}$$

$$DFT\{d_n \square h_n\} = DFT\{d_n\} \oplus DFT\{h_n\}$$

- Συνέλιξη
- Κυκλική Συνέλιξη
- ◆ Signal and channel linearly convolved

The OFDM Cyclic Prefix / Guard Interval



Why cyclic?

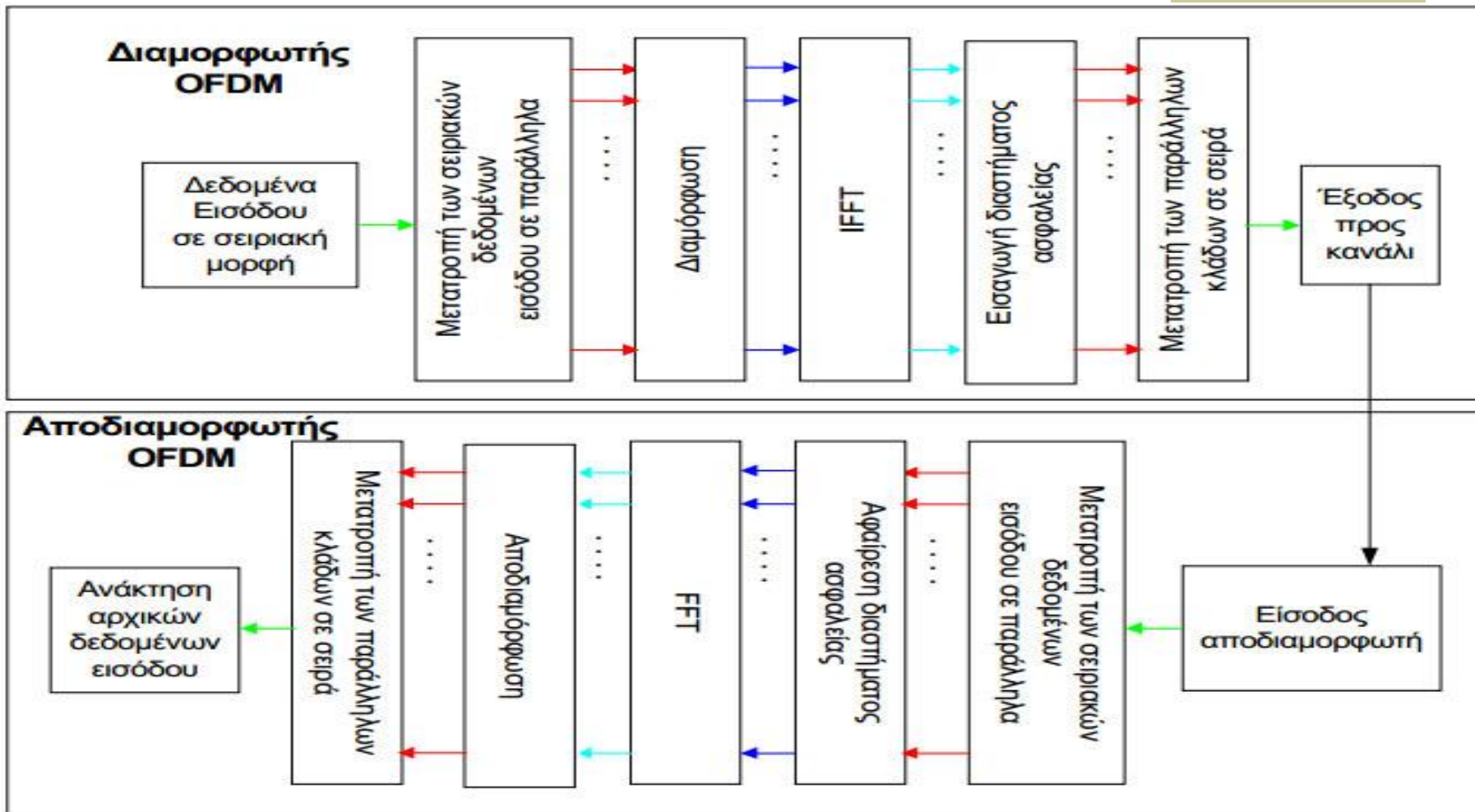
$$y(k) = x(k) \underset{\text{circ}}{*} c(k)$$



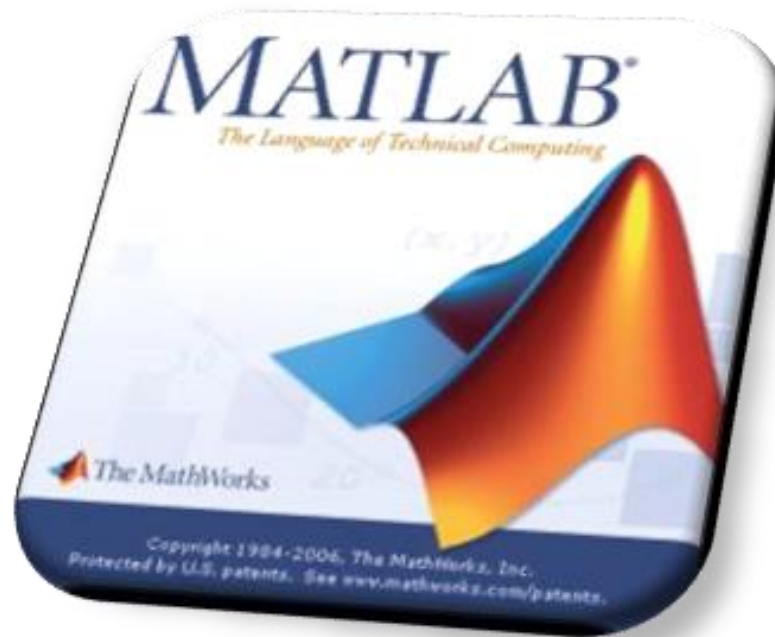
$$Y(n) = \text{DFT}\{x(k)\} \square \text{DFT}\{c(k)\}$$

$$\Rightarrow X(n) = Y(n) / C(n)$$

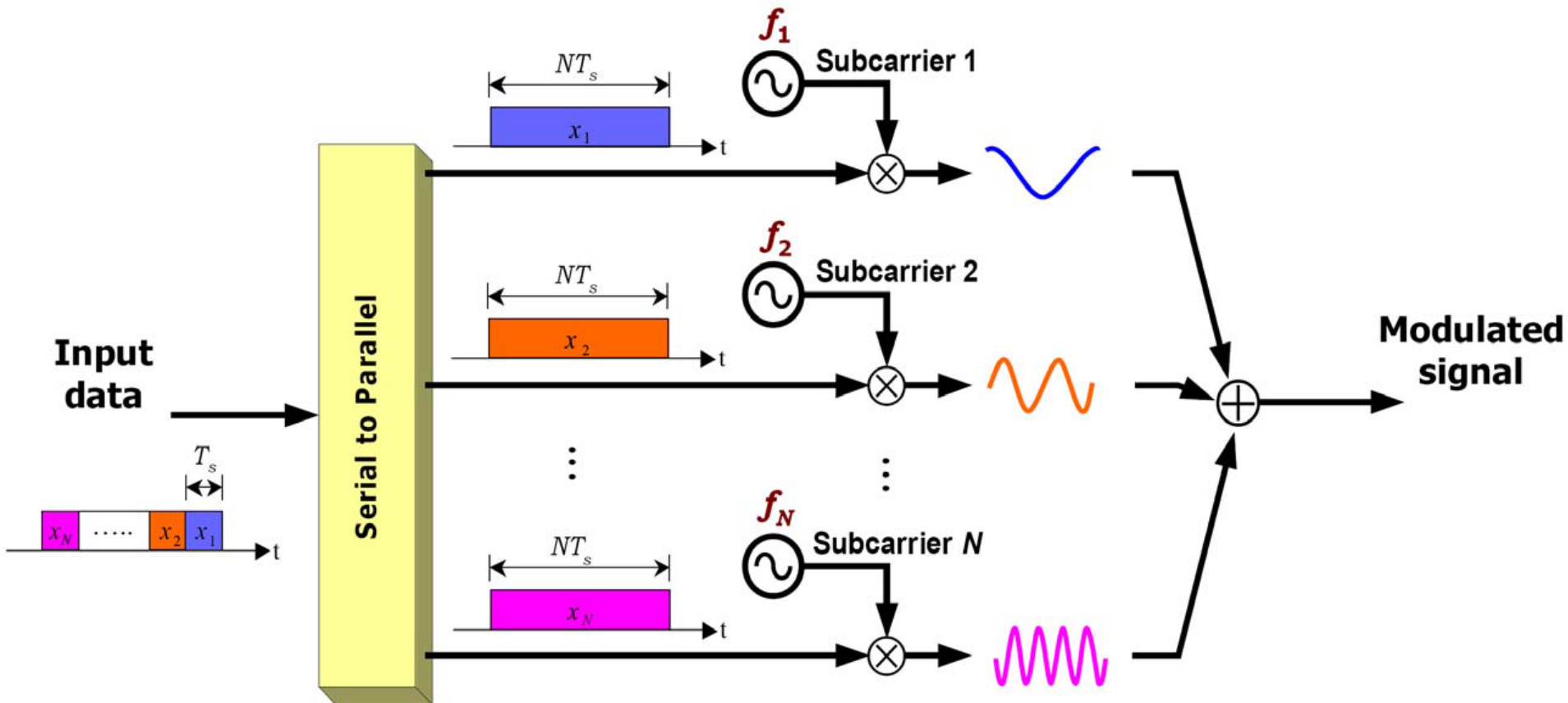
Διαμορφωτής – Αποδιαμορφωτής OFDM + Διάστημα Φύλαξης



Υλοποίηση στο Matlab

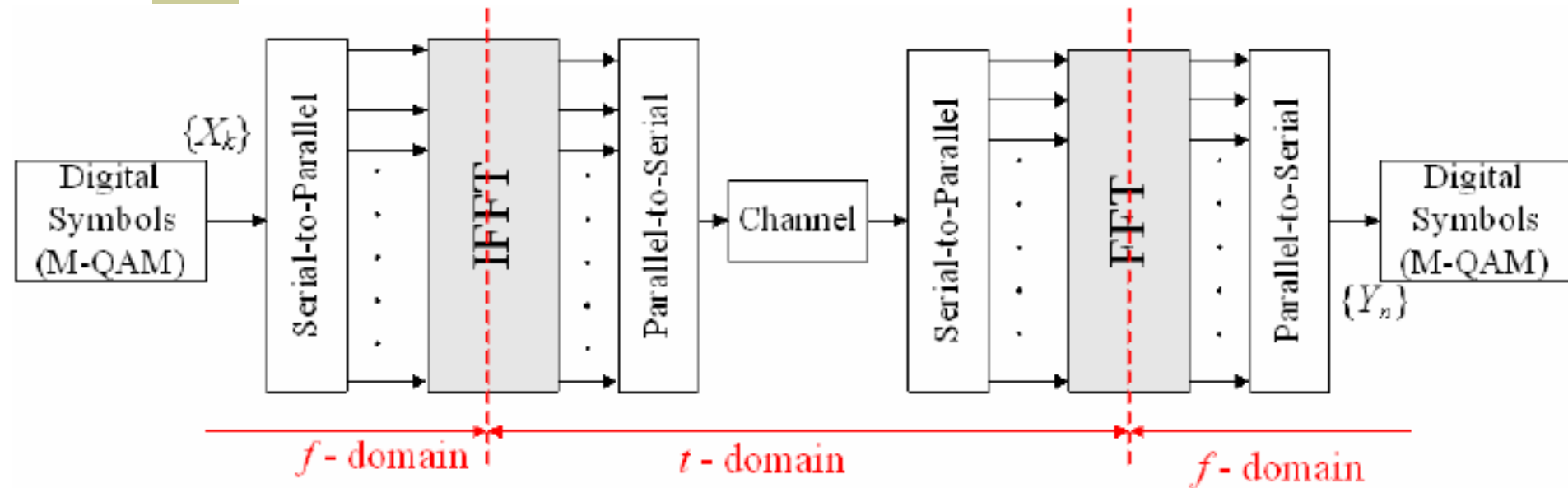


OFDM Πομπός



- ◆ Διαμόρφωση (OFDM): Όλοι οι “υπο-δίαυλοι”, ταυτόχρονα, χρησιμοποιούνται από τον ίδιο χρήστη.

Υλοποίηση OFDM με IFFT / FFT



$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j2\pi f_k t}, \quad f_k = \frac{k}{T_s} = \frac{k}{N \cdot T}$$

Δειγματοληψια με $t = n \cdot T$, $n = 0, 1, \dots, N-1$

$$x(n \cdot T) \triangleq x_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j2\pi \frac{k}{N \cdot T} n \cdot T} = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j2\pi \frac{k}{N} n} = IDFT \{X_0, X_1, \dots, X_{N-1}\}(n)$$

Υλοποίηση πομπού OFDM

```
fc = 10e6;      % Carrier frequency of I/Q modulator (IF)
N = 128;       % Size of IFFT
BW = 1e6;      % Bandwidth
Fs = 40e6;     % Sampling frequency
fo = 6;        % Order of LP reconstruction filter

% A. Generate N random QPSK symbols
% B. Feed QPSK symbols to N-IFFT
% C. Separate I & Q channel (real and imaginary part of the
%     IFFT's output)
% D. Convert the digital I & Q signals to "pseudo-analog" by
%     zero-interpolating them (interpolation factor=m) and
%     passing through a Butterworth filter.
% E. Perform I/Q modulation (multiply I & Q pseudo-analog
%     signals with samples of a sinus and a cosinus, then add
%     the results).
% F. Plot the spectrum of the resulting, analog, OFDM signal
```

Υλοποίηση πομπού OFDM

```
% Generate N random QPSK symbols
z = 2*randint(N,2)-1;
c = z(:,1) + i*z(:,2);      % N symbols
% Perform N-IFFT and separate I/Q
a = real(iffft(c,N)); % I-channel
b = imag(iffft(c,N)); % Q-channel

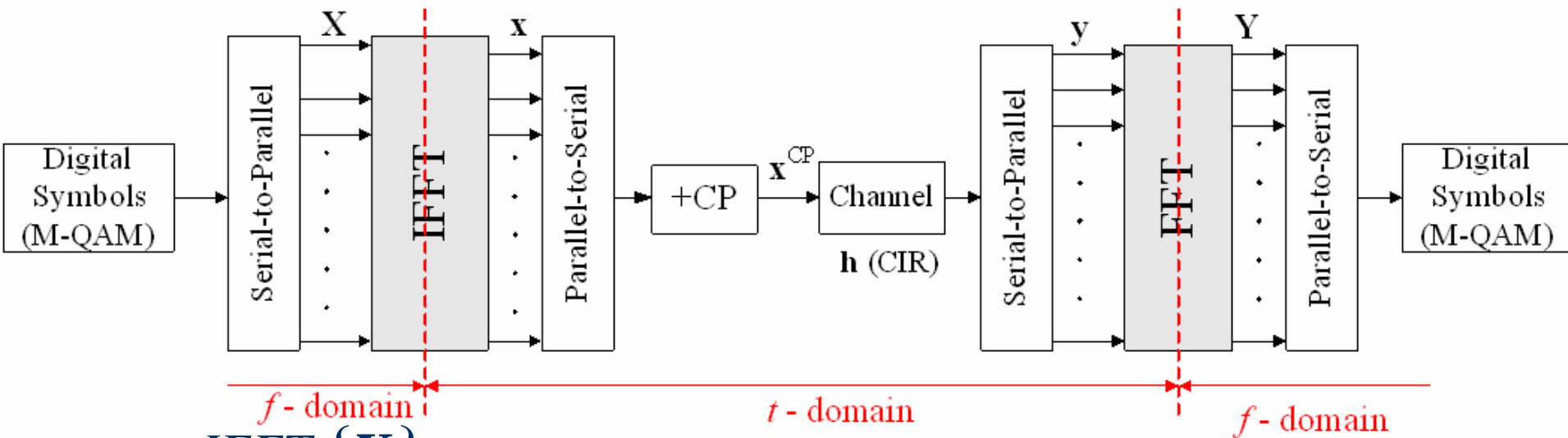
% Zero-interpolation
m = (Fs/2)/BW;      % Interpolation factor
aa = zerointerp(a,m); bb = zerointerp(b,m);

function y=zerointerp(a,b);
% Interpolate b zeros between each value of vector a
m=length(a); n=m*b; g=zeros(n,1);
for k=1:m,      g((k-1)*b+1)=a(k); end; y=g';
```


Υλοποίηση πομπού OFDM

```
[b,a] = butter(fo, (BW/2) / (Fs/2));  
% Use a fo-th order Butterworth LPF with cutoff  
% frequency=fmax/(Fs/2) to reconstruct the original signal  
  
I_ch = filter(b,a,aa); Q_ch = filter(b,a,bb);  
  
q = length(I_ch); t = (1:q)/Fs;  
sinus = sin(2*pi*fc*t); cosinus = cos(2*pi*fc*t);  
s = I_ch.*sinus + Q_ch.*cosinus;  
  
Nfft=4096; k=1:Nfft/2; sp=fft(s,Nfft);  
semilogy((k*Fs/Nfft)/BW,abs(sp(1:Nfft/2)));
```

Κυκλικό Πρόθεμα (Cyclic Prefix)



$$\mathbf{x} = \text{IFFT} \{ \mathbf{X} \}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}^{CP} \square \mathbf{h} = \mathbf{x} \square \mathbf{h}$$

$$\mathbf{Y} = \text{FFT} \{ \mathbf{y} \} = \text{FFT} \{ \mathbf{x} \square \mathbf{h} \} = \text{FFT} \{ \mathbf{x} \} \odot \text{FFT} \{ \mathbf{h} \} = \mathbf{X} \odot \mathbf{H}$$

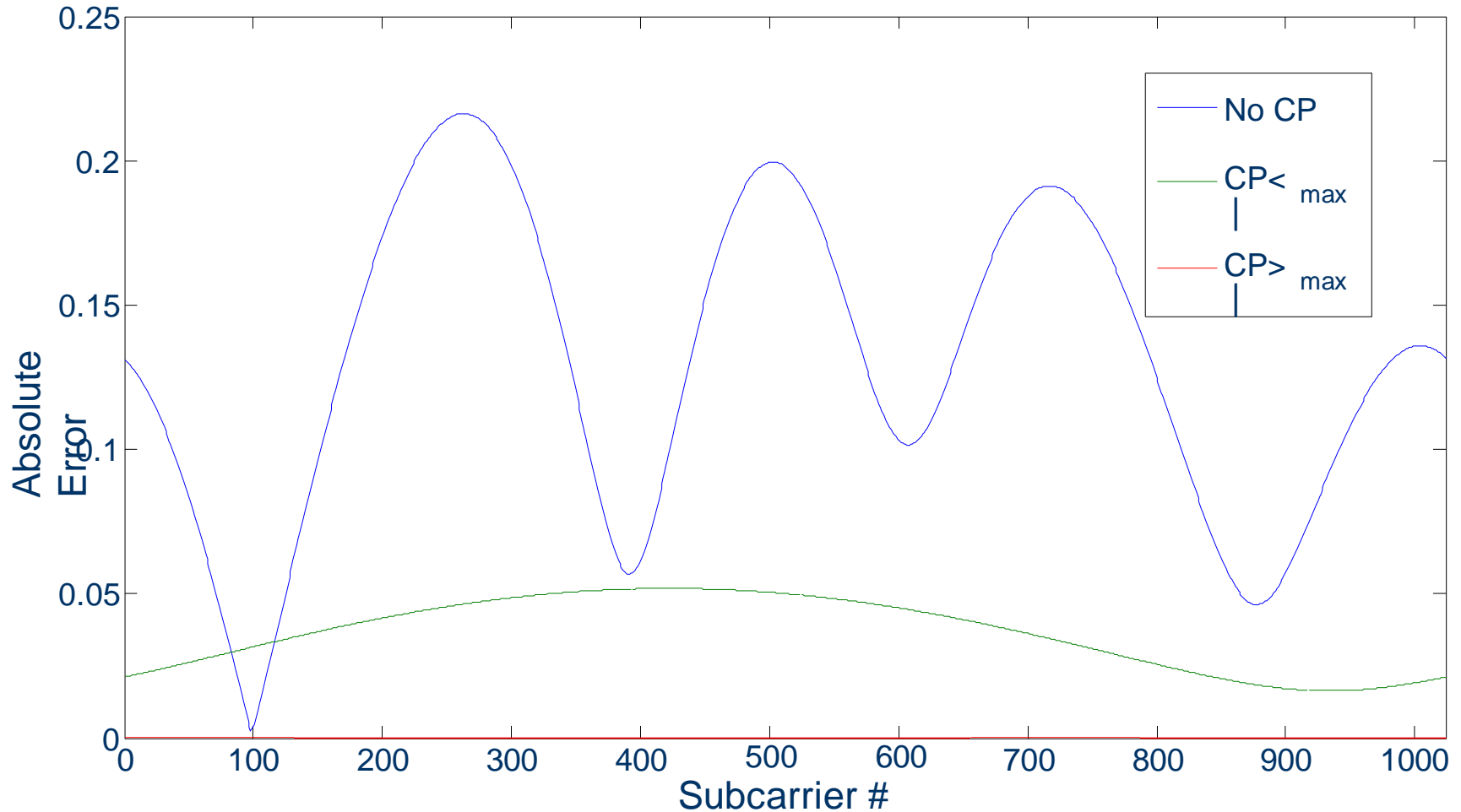
\square : Convolution, \square : Circular Convolution \odot : Dot

Άρα, γνωρίζοντας τα \mathbf{Y}, \mathbf{H} , το \mathbf{X} βρίσκεται με απλή διαίρεση (1-tap equalizer)

Υλοποίηση OFDM με Guard Interval

```
N = 8;
h = [1 0 0.2 0 0 0 0 0]; % CIR
Tcp=3; % CP length
X=[-3+j 1+3j -1-j 1+3j -3-3j 3-3j 3+j -1+3j]; % OFDM symbol
x=ifft(X); % OFDM signal (time samples)
xzp = [zeros(1,Tcp) x]; % Add zero prefix (ZP) of length Tcp
xcp = [x(N-Tcp+1:N) x]; % Add cyclic prefix (CP) of length Tcp
H=fft(h,N); % FFT of CIR
yzp = conv(h,xzp); % RX signal using zero prefix
ycp = conv(h,xcp); % RX signal using cyclic prefix
Yzp=fft(yzp(Tcp+1:N+Tcp),N); % Drop ZP and perform FFT
Ycp=fft(ycp(Tcp+1:N+Tcp),N); % Drop CP and perform FFT
Xzp_est=Yzp./H; % Estimated symbols using ZP
    -2.6961 + 0.8699i    1.1532 + 2.9539i    -0.9451 - 0.8308i
    1.1870 + 3.3187i    -2.7205 - 2.6199i    3.4622 - 2.5308i
    3.8201 + 1.2058i    -0.4562 + 2.8352i
Xcp_est=Ycp./H; % Estimated symbols using CP
    -3+j 1+3j -1-j 1+3j -3-3j 3-3j 3+j -1+3j
```

OFDM System with 1-tap Equalizer



Παραμετροποίηση OFDM

- ◆ Bit Rate, Bandwidth, Max. Delay Spread
- ◆ Αριθμός υπο-καναλιών (N_c) και η τοποθέτησή τους (Δf)
- ◆ Περίοδος συμβόλου (T_u) και σχήμα του παλμού
- ◆ Μέγεθος Guard Interval (T_{cp})
- ◆ Μέθοδος Mapping (PSK, QAM)
- ◆ Ομώδυνη / Διαφορική Ανίχνευση

Design Trade-Offs

- ◆ Number of subcarriers:
 - ISI Robustness vs. Sensitivity to frequency offset
- ◆ Length of guard interval:
 - ISI Robustness vs. Overhead
- ◆ Coding Scheme:
 - Robustness vs. Overhead & Latency

Multicarrier Systems



- ✓ Ανθεκτικότητα σε πολυδιαδρομικό περιβάλλον διάδοσης
- ✓ Εύκολη ισοστάθμιση
- ✓ Ευκολία υλοποίησης σε Software Radio
- ✓ Ανθεκτικότητα σε κρουστικό θόρυβο (γενικά σε παρεμβολές στενής ζώνης)
- ✓ Αποδοτικότητα Φάσματος (Spectral Efficiency)
- ✓ Δυναμικά μεταβαλλόμενος ρυθμός μετάδοσης



- ❑ Ευπάθεια σε προβλήματα συγχρονισμού λόγω
 - ❑ Φαινομένου Doppler
 - ❑ Απόκλισης συχνότητας ταλαντωτών → απώλεια ορθογωνιότητας και ICI
- ❑ Υψηλή τιμή λόγου Μέγιστη-προς-Μέση Ισχύ (PAPR)

Εφαρμογές OFDM

- ◆ Single Frequency Networks - Broadcasting
- ◆ Wireless LANs - WPANs
- ◆ ADSL
- ◆ WiMAX
- ◆ LTE
- ◆ WRAN
- ◆ OFDMA
- ◆ ...

Εφαρμογές OFDM

- ◆ Digital Audio Broadcasting (DAB)

	Mode I	Mode II	Mode III	Mode IV
Number of Subcarriers	1536	384	192	768
Subcarrier Spacing	1 kHz	4 kHz	8 kHz	2 kHz
Total symbol duration	1246 μ s	311,5 μ s	155,8 μ s	623 μ s
Guard Interval duration	246 μ s	61,5 μ s	30,8 μ s	123 μ s
Carrier frequency	<375MHz	< 1.5GHz	< 3GHz	< 1.5GHz
TX separation	< 96 km	< 24 km	< 12 km	< 48 km
Total data rate	2.432Mbps	2.432Mbps	2.448Mbps	2.432Mbps

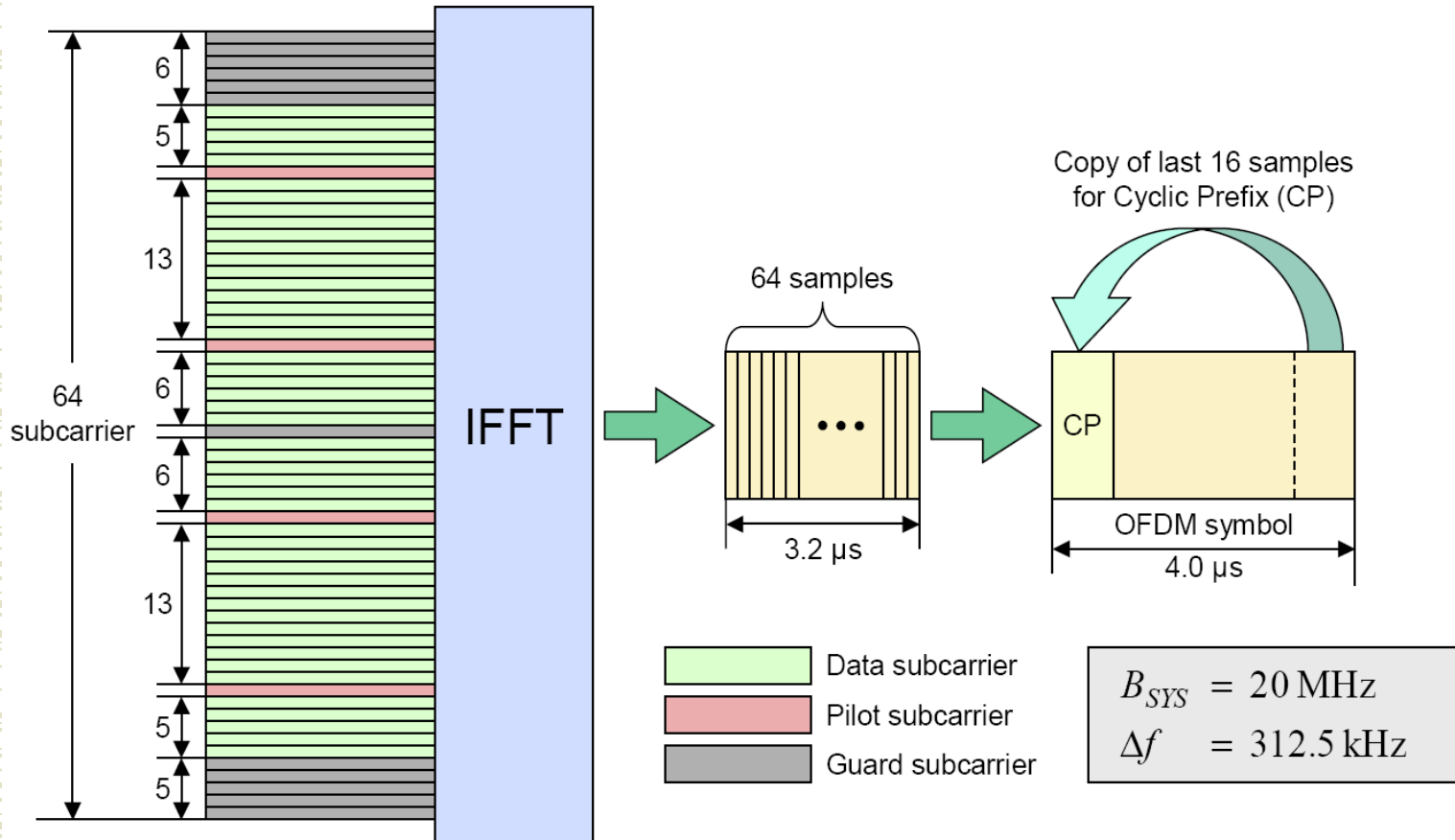
Εφαρμογές OFDM

◆ Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB)-T

Εύρος σήματος :	7.61MHz	
Μέγεθος FFT :	8K	ή 2K
Πλήθος υποκαναλιών :	6817	ή 1705
Εύρος υποκαναλιών :	1116Hz	ή 4464Hz
Χρήσιμη Διάρκεια συμβόλου :	896μs	ή 224μs
Guard Interval	$1/4, 1/8, 1/16$ ή $1/32$ του T_u	
Ρυθμός Κωδικοποίησης	$1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$	
Μέθοδοι Διαμόρφωσης	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	
Μέγιστη Ταχύτητα Μετάδοσης	DVB-T: ~ 32Mbps DVB-T2: ~ 50Mbps	

Εφαρμογές OFDM

◆ WLAN



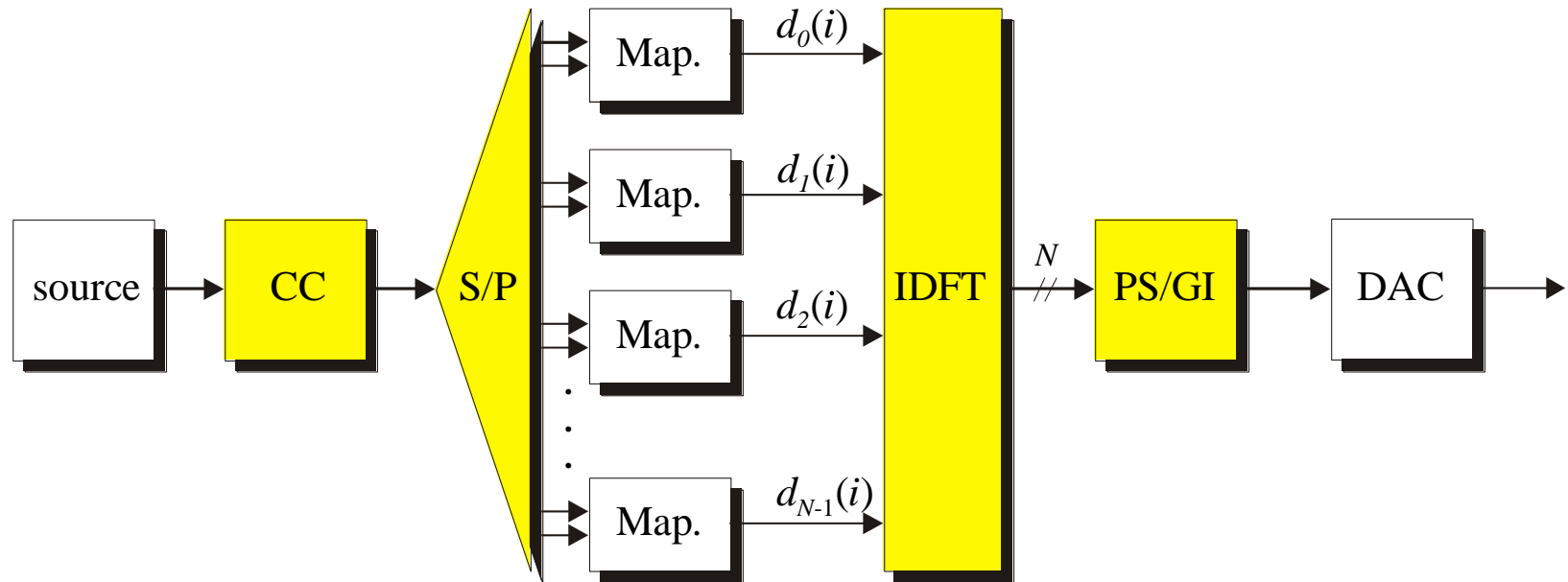
Εφαρμογές OFDM

- ◆ 802.11a

Number of Subcarriers	52
Symbol duration	4 μ sec
Guard Interval's Duration	800 nsec
Mapping	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Coding rate	$\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$
Bit rate	6, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps
Bandwidth	20 MHz
Tolerable delay spread (24Mbps)	H 250 nsec

Εφαρμογές OFDM

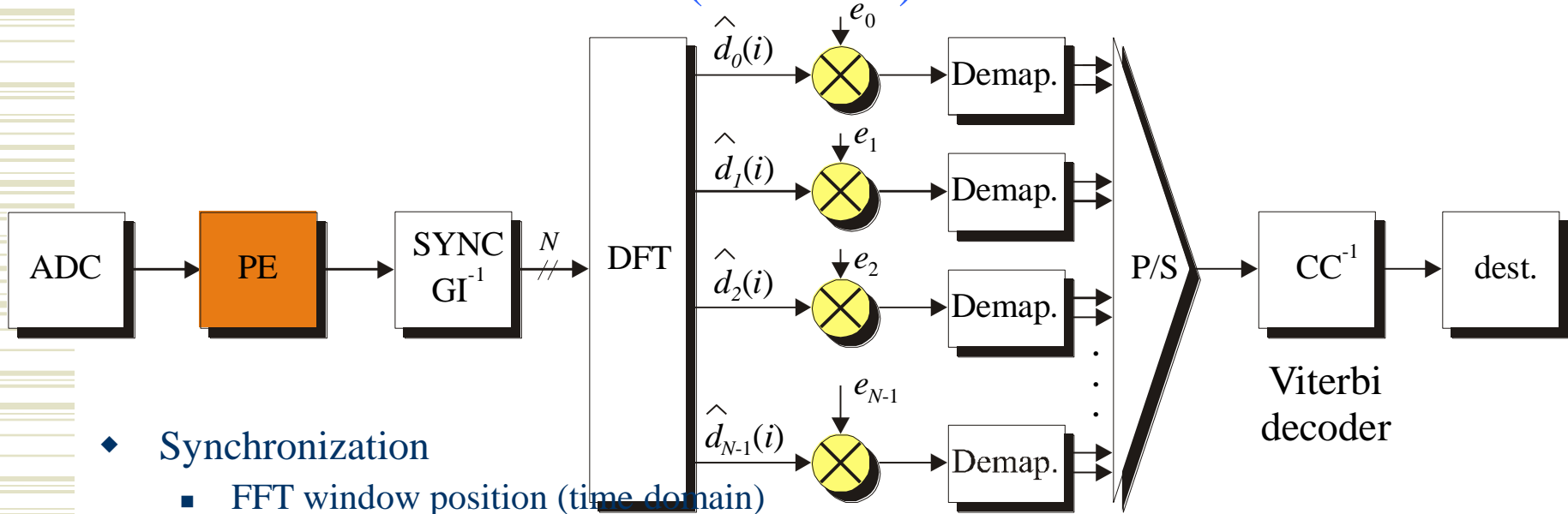
- ◆ 802.11a / HIPERLAN (Transmitter)



- ◆ channel coding (convolutional codes with Viterbi decoding)
- ◆ IDFT: discrete realized filter bank (very efficient FFT)
- ◆ cyclic prefix / guard interval (GI) prevents intersymbol interference (ISI)

Εφαρμογές OFDM

♦ 802.11a / HIPERLAN (Receiver)



♦ Synchronization

- FFT window position (time domain)
- sample and modulation frequency correction

♦ Pre equalizer (PE) for impulse compression

♦ OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

- separate multiplicative channel correction on each subcarrier
- **equalizer coefficient design: $e_n = 1 / C_n$ \Leftrightarrow circular convolution**

Εφαρμογές OFDM

- ◆ 802.11g

Modulation Type	Coding Rate	Coded Bits per subcarrier	Coded Bits per OFDM symbol	Data Bits per OFDM Symbol	Data Rate (Mbps)
BPSK	1/2	1	48	24	6
BPSK	3/4	1	48	36	9
QPSK	1/2	2	96	48	12
QPSK	3/4	2	96	72	18
16-QAM	1/2	4	192	96	24
16-QAM	3/4	4	192	144	36
64-QAM	2/3	6	288	192	48
64-QAM	3/4	6	288	216	54

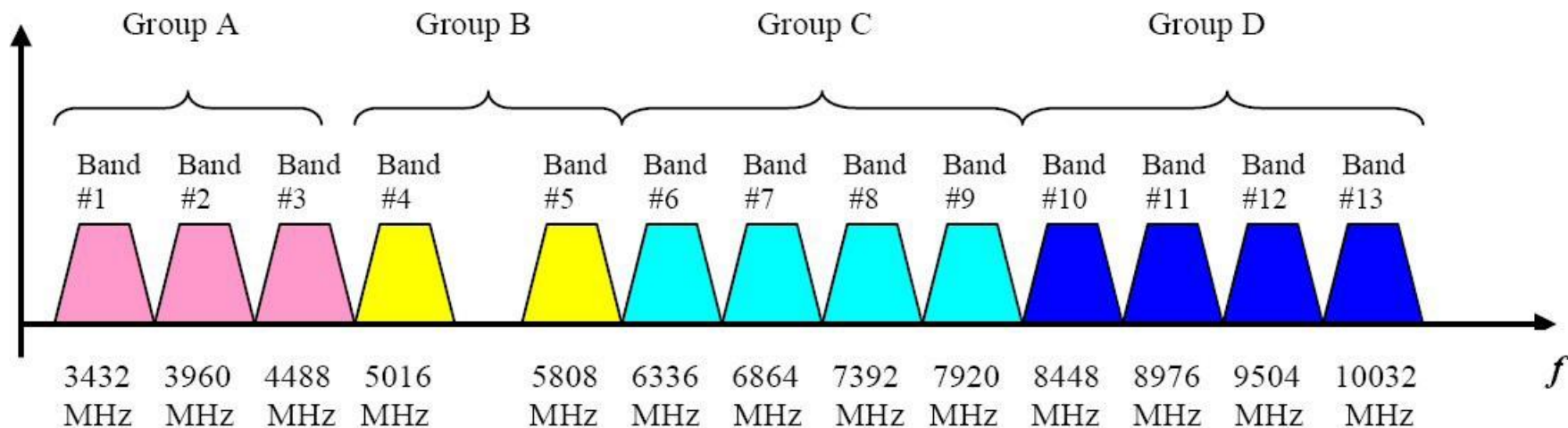
Εφαρμογές OFDM

- ◆ 802.11g
- ◆ Χρησιμοποιείται κανάλι εύρους 20MHz
- ◆ Άρα, για 64 bins του FFT, έχουμε 312,5KHz εύρος για κάθε φέρον

Parameter	Value
Number of data subcarriers	48
Number of pilot subcarriers	4
Subcarrier spacing	0.3125MHz
IFFT/FFT period	3.2μs
Guard interval	0.8μs
OFDM symbol duration	4.0μs

Εφαρμογές OFDM

◆ Multiband OFDM (IEEE 802.15.3a)



Ζώνη A προορίζεται για χρήση από την 1^η γενιά συσκευών UWB, η ζώνη C προορίζεται για συσκευές με αυξημένες δυνατότητες λειτουργίας σε κυψελλωτές δομές (Simultaneously Operating Piconets – SOP) και τέλος οι ζώνες B, D προορίζονται για μελλοντική χρήση.

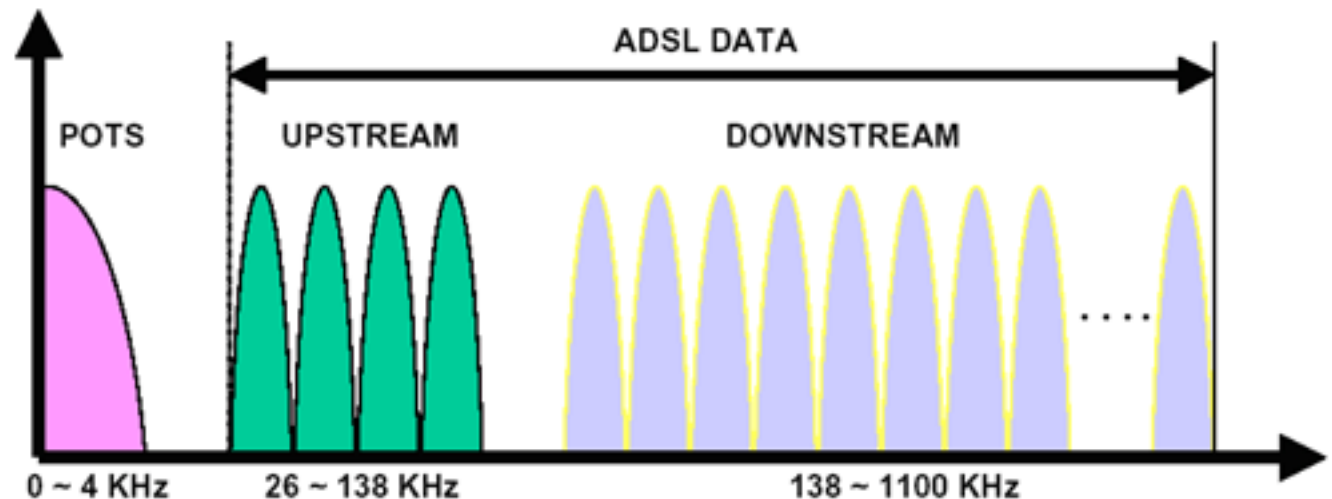
Εφαρμογές OFDM

◆ Multiband OFDM (IEEE 802.15.3a) – Group A

Παράμετρος	Τιμή		
Συνολικό εύρος ζώνης	3168-4752MHz		
Αριθμός Υποκαναλιών (N_{FET})	128		
Υποκανάλια που μεταφέρουν δεδομένα (N_D)	100		
Υποκανάλια πιλότοι (pilots)	12		
Ελεύθερα υποκανάλια	10		
Κενά υποκανάλια	6		
Διάρκεια διαστήματος φύλαξης (CP)	60.6ns		
Διάρκεια OFDM συμβόλου	242.4ns		
Διάρκεια διαστήματος φύλαξης μεταξύ διαδοχικών συμβόλων	9.5ns		
Συνολική διάρκεια OFDM συμβόλου	312.5ns		
Εύρος ζώνης υποκαναλιού	4.125MHz		
Μέθοδος ψηφιακής διαμόρφωσης	QPSK		
Ρυθμός Κωδικοποίησης (R)	11/3 2	5/8	3/4
Τρόπος υλοποίησης	Real	Real	I/Q
Ταχύτητα μετάδοσης πληροφορίας (Mbps)	110	200	480

Εφαρμογές OFDM

- ◆ ADSL



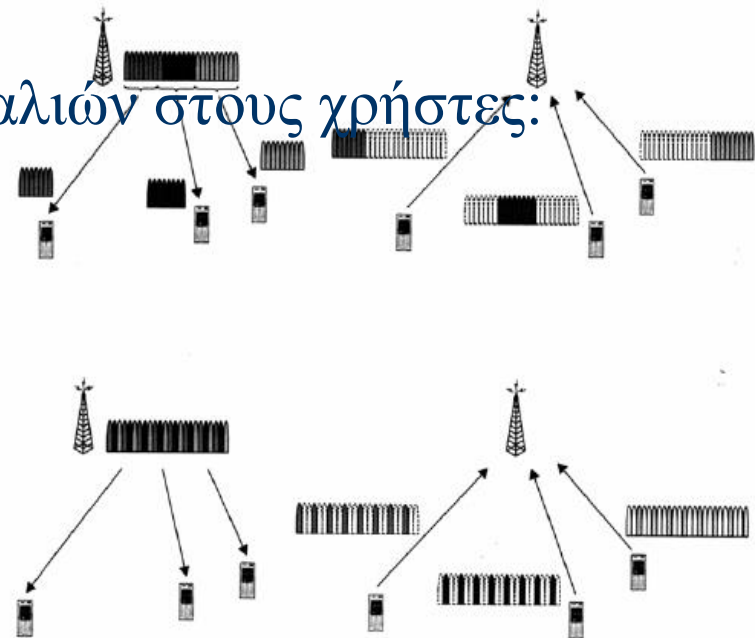
- ◆ Η υπηρεσία φτάνει σε μικρή απόσταση από το τηλεφωνικό κέντρο (last mile)
- ◆ Καταλαμβάνει ένα κανάλι από 25.875kHz μέχρι 1104kHz
- ◆ Test signals transmitted
 - received signal and noise level of each tone measured

Εφαρμογές OFDM

- ◆ ADSL
- ◆ Χρησιμοποιεί Διακριτή Πολυτονική Διαμόρφωση (Discrete MultiTone Modulation – DMT)
- ◆ Ισοδύναμη με την OFDM
- ◆ Χωρίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε 256 υπο-κανάλια (bins) εύρους 4.3125KHz το καθένα
 - 224 downstream
 - 31 upstream
- ◆ Χρησιμοποιούνται QAM και PSK μέθοδοι διαμόρφωσης
- ◆ Παρακολουθεί δυναμικά το SNR των bins και τα διαμορφώνει ανάλογα ή δεν στέλνει καθόλου δεδομένα

OFDMA

- ◆ Οι επικοινωνίες πολλών χρηστών απαιτούν τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης
- ◆ Οι ιδιότητες της OFDM μπορούν να αξιοποιηθούν και σε αυτό το κομμάτι του συστήματος
- ◆ Δύο τεχνικές κατανομής υπο-καναλιών στους χρήστες:
 - Συνεχόμενη (continuous)
 - Κατανεμημένη (distributed)



OFDMA

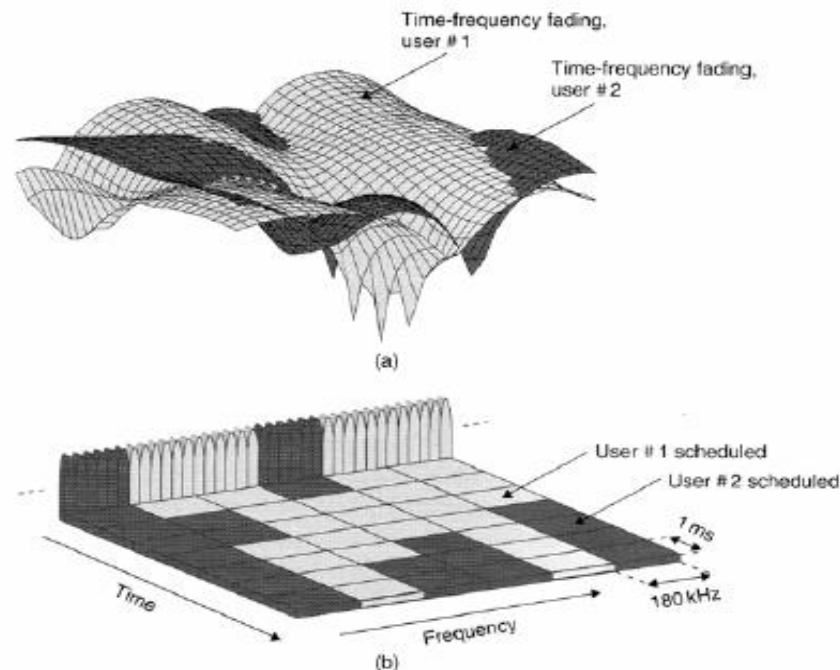
- ◆ Σε κάθε χρήστη αφιερώνονται 1 ή περισσότερα subcarriers ενός OFDM συμβόλου



- ◆ Subcarriers που υφίστανται ισχυρές παρεμβολές ή εξασθένιση δεν χρησιμοποιούνται

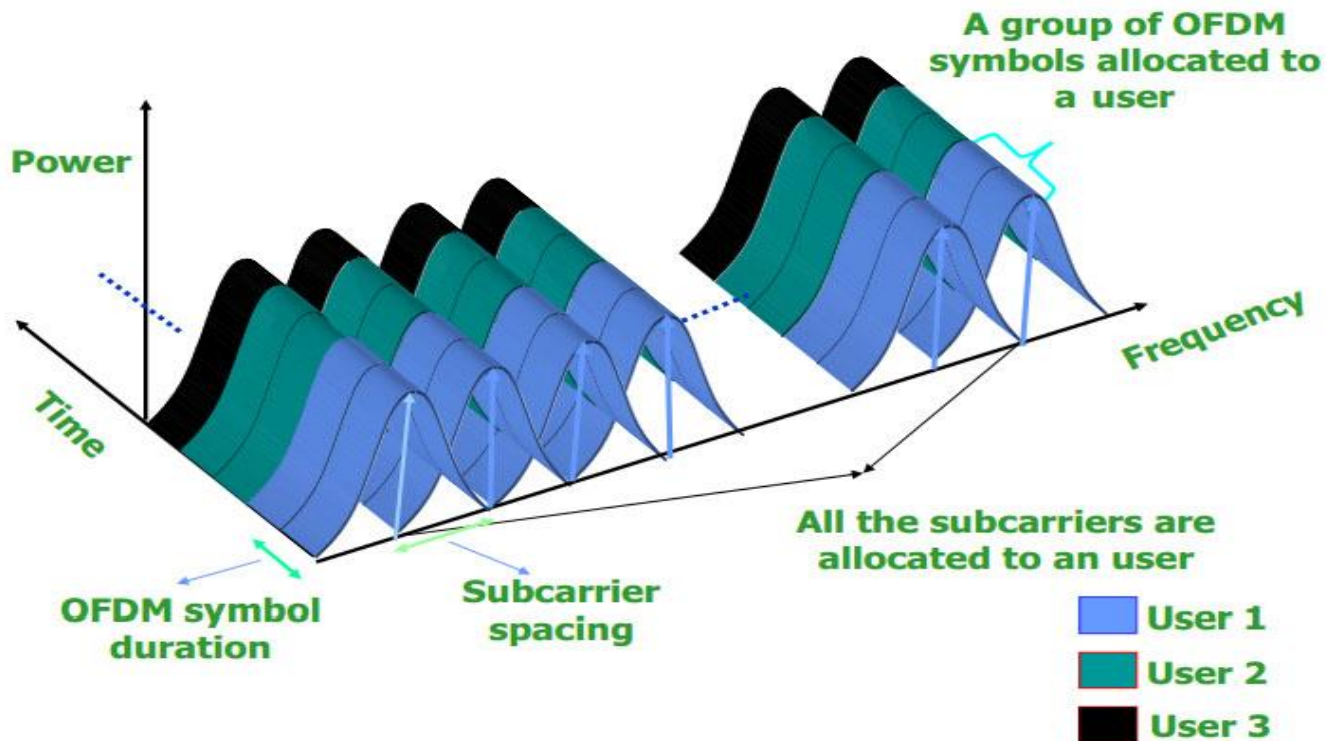
OFDMA

- ◆ Ο έλεγχος της συχνοεπιλεκτικής εξασθένησης είναι σημαντικός στα συστήματα OFDM
- ◆ Υπάρχει η δυνατότητα να γίνονται εκτιμήσεις στο κανάλι και έπειτα να κατανέμονται κατάλληλα τα υπο-κανάλια



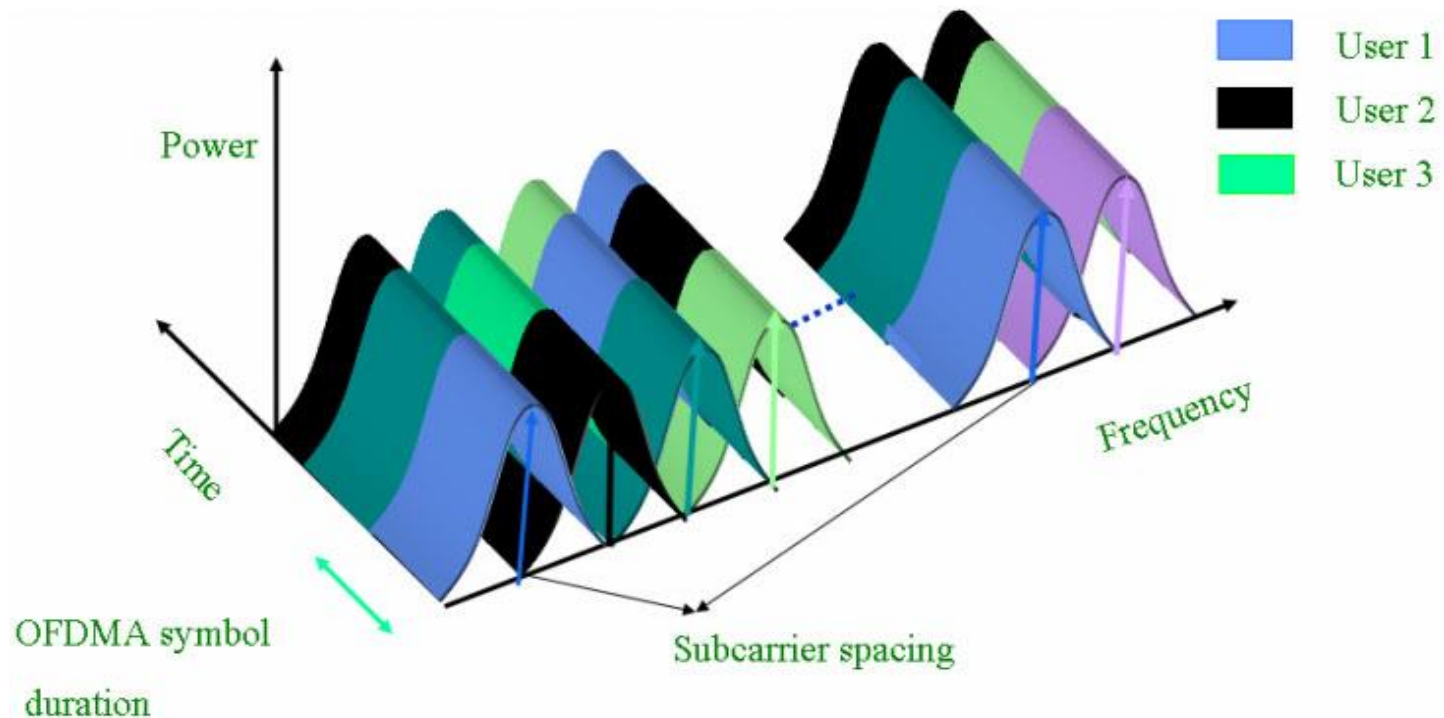
OFDM - TDMA

- ◆ Στο OFDM το σύνολο των φερόντων αποδίδονται σε έναν χρήστη για χρονική διάρκεια ακέραιων OFDM συμβόλων



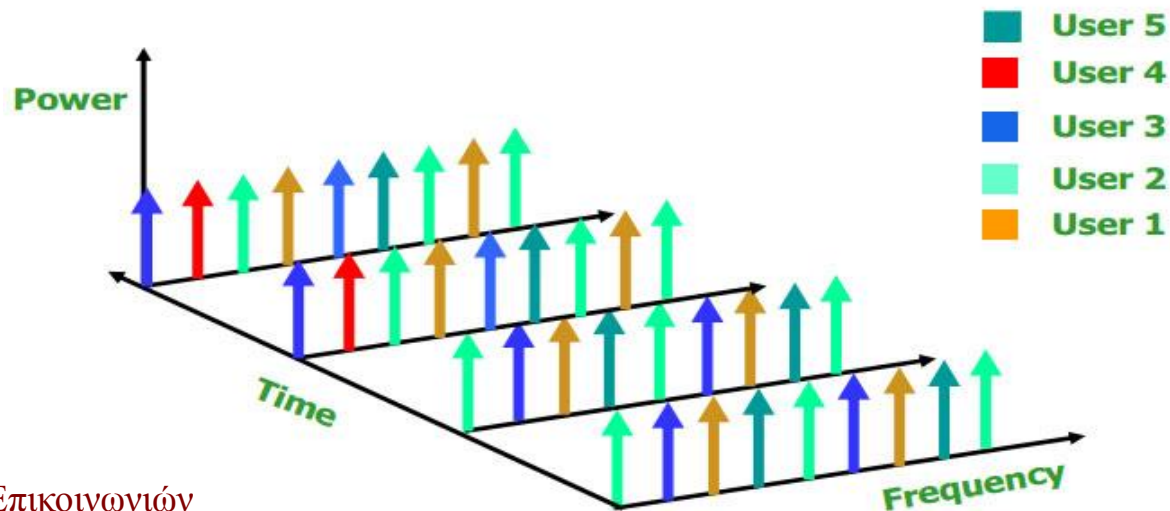
OFDMA

- ◆ Στο OFDMA μπορούν πολλαπλοί χρήστες να μοιραστούν στα φέροντα στη διάρκεια ενός OFDM συμβόλου



OFDMA

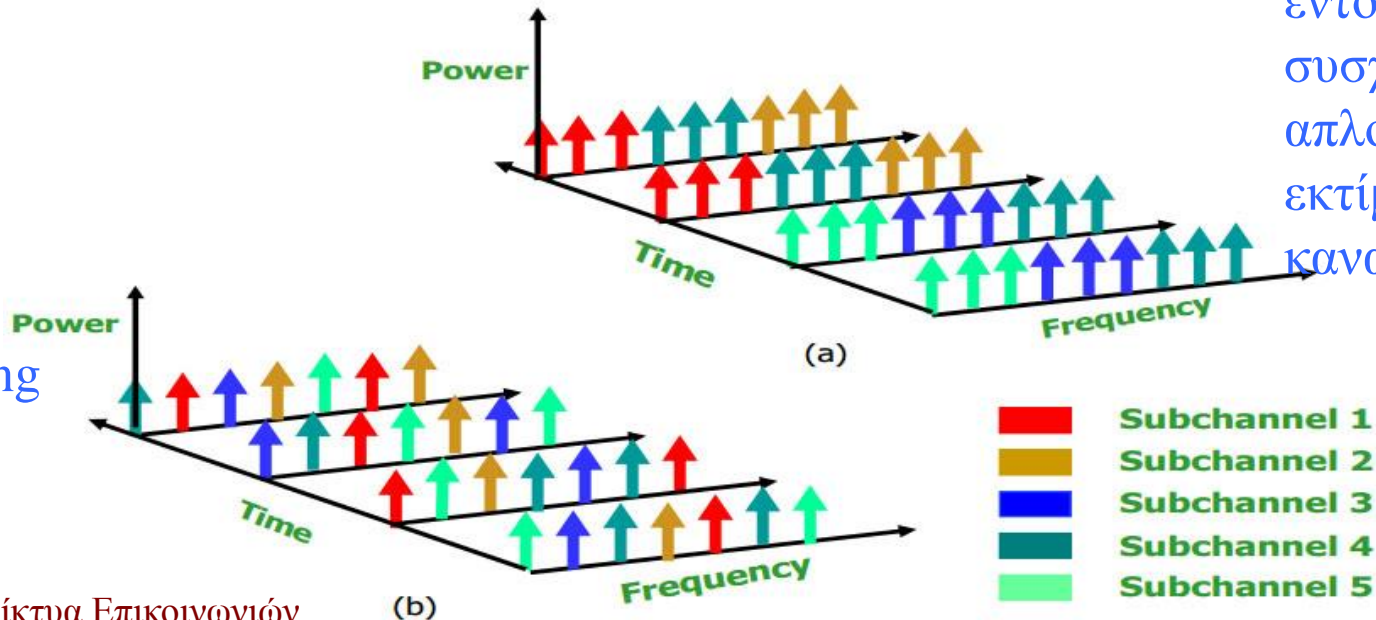
- ◆ Στους χρήστες ανατίθενται πολλαπλές θυρίδες (slots) και όχι μεμονωμένες,
- ◆ Διάφορες ομάδες υπο-καναλιών και OFDM συμβόλων ομαδοποιούνται για να χρησιμοποιηθούν για την μετάδοση των δεδομένων



OFDMA

- ◆ Ένα σύνολο φερόντων ομαδοποιούνται για να αποδοθούν ως κανάλι σε κάποιο χρήστη
 - Συνεχόμενα φέροντα → Adjacent Subcarrier Allocation
 - Ψευδοτυχαία επιλεγμένα φέροντα → Diversity Subcarrier Allocation

διαφορισμός
συχνότητας
→ frequency
selective fading



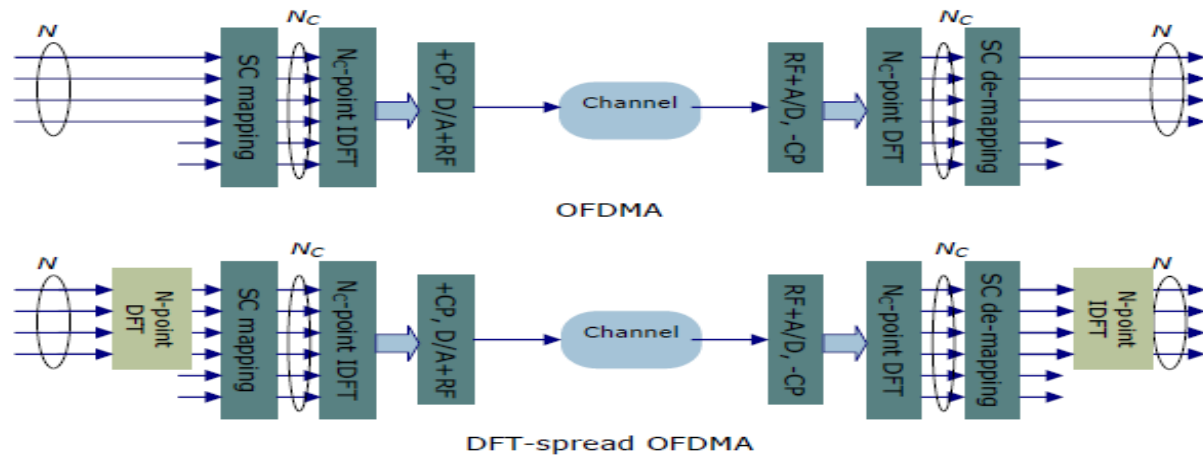
έντονη
συσχέτιση →
απλοποίηση
εκτίμησης
καναλιού

OFDMA

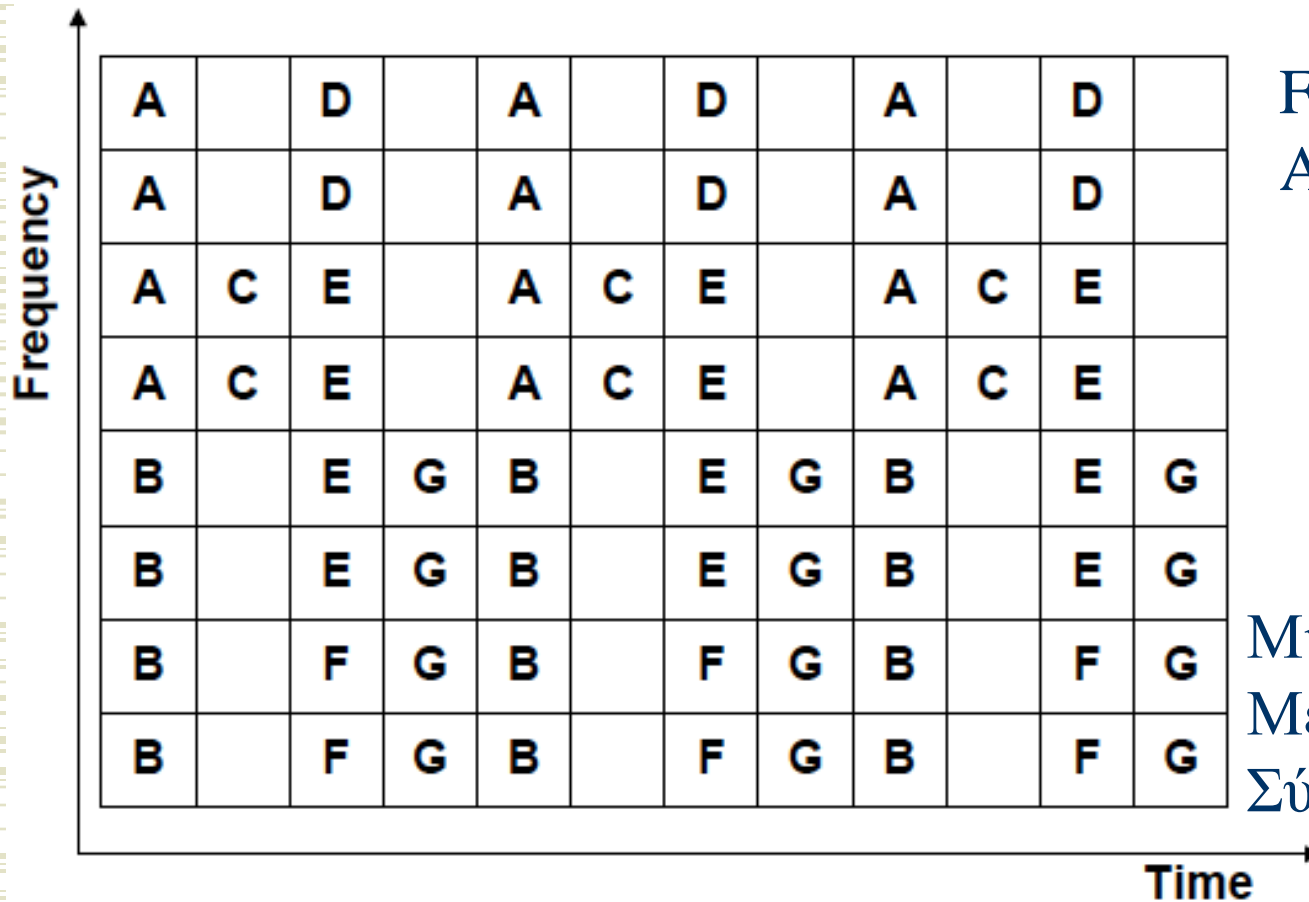
- ◆ Στην κάτω ζεύξη ο έλεγχος εντοπίζεται στο σταθμό βάσης και περιλαμβάνει τον πλήρη έλεγχο του συγχρονισμού στο χρόνο και στη συχνότητα
- ◆ Στην άνω ζεύξη τα τερματικά των χρηστών δεν επικοινωνούν μεταξύ τους
- ◆ Παρουσιάζονται δύο παράμετροι οι οποίες δυσκολεύουν την ελαχιστοποίηση της ICI:
 - Η ορθογωνικότητα των υπο-φορέων διαφορετικών χρηστών μειώνεται εξαιτίας ατελειών στο συγχρονισμό μεταξύ τερματικών
 - Τα σήματα από τα τερματικά προς το σταθμό βάσης λαμβάνονται με σημαντικά διαφορετική ισχύ

OFDMA

- ◆ Τα σήματα OFDM χαρακτηρίζονται από μεγάλο λόγο μεγίστης προς μέση ισχύ (PAPR)
- ◆ Οι ενισχυτές ισχύος του πομπού πρέπει να είναι γραμμικοί
- ◆ Στο τερματικό του χρήστη αυτό οδηγεί σε αύξηση κατανάλωσης και κόστους
- ◆ Απαιτείται μία μέθοδος ελέγχου της ισχύος στους κινητούς σταθμούς
- ◆ Οπότε στην άνω ζεύξη υιοθετείται η τεχνική SC-FDMA μία παραλλαγή της OFDMA με άπλωμα DFT



OFDMA – TDMA



Fixed Subcarriers
Allocation

Μικρά Guard Bands
Μεταξύ χρηστών (σε
Σύγκριση με FDM)

Συμπεράσματα

- ◆ Η OFDM μπορεί να αντιμετωπίσει την πολυδιαδρομική διάδοση χωρίς να απαιτεί πολύπλοκη τεχνολογία στο δέκτη → μία απλή λήψη ισοστάθμισης είναι αρκετή.
- ◆ Η χρήση τεχνικών FFT είναι απλή και φθηνή → αλλαγή του μεγέθους FFT επιτρέπει κλιμάκωση στο εύρος ζώνης.
- ◆ Το OFDM σήμα χαρακτηρίζεται από υψηλό PAPR, ο οποίος αυξάνει με την αύξηση του αριθμού των
- ◆ χρησιμοποιούμενων υπο-καναλιών.
- ◆ Για να επιτευχθεί γραμμική συμπεριφορά απαιτείται υψηλό περιθώριο ισχύος στον ενισχυτή → υψηλό κόστος και μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος στον πομπό του τερματικού του χρήστη.
- ◆ Το OFDMA πλεονεκτεί στην κλιμάκωση του καταμερισμού των πόρων στους διάφορους χρήστες με ευέλικτο τρόπο είτε χρησιμοποιείται FDD είτε TDD.
- ◆ Η OFDMA χρησιμοποιεί διαφορισιμότητα χρόνου και συχνότητας → προγραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλι.
- ◆ Η ευρεία υιοθέτηση αυτών των τεχνικών από τα νέα ασύρματα πρότυπα επικοινωνιών επιβεβαιώνει τη χρησιμότητά τους στην παρούσα και την επόμενη γενιά ασύρματων

Επιλεγμένη Βιβλιογραφία

1. Alard, M., and Lassalle, R., “Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers”, *EBU Review*, (224):3-25, August 1987.
2. Cimini, L.,J., “Analysis and simulation of a digital mobile channel using Orthogonal Frequency Division Multiplexing”, *IEEE Trans. Commun.*, COM- 33(7):665-675, July 1985.
3. Hanzo, L., Webb, W., and Keller, T., “*Single- and Multi-carrier Quadrature Amplitude Modulation*”, John Wiley & Sons, 2000.
4. LeFloch, B., Alard, M., and Berrou, C., “Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing”, *Proc. IEEE*, 83(6):982-996, June 1995.
5. Moose, P., “A Technique for OFDM Frequency Offset Correction”, *IEEE Trans. Commun.*, 42(10):2908-2914, Oct. 1994.
6. Pantos, G.,D., Kanatas, A.,G., and Constantinou, Ph., “Performance Evaluation of OFDM Transmission Over a Challenging Urban Propagation Environment”, *IEEE Trans. Broadcast.*, 49(1):87-96, Mar. 2003.
7. Salzberg, B.,R., “Performance of an efficient parallel data transmission system”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-15(6):805-811, December 1967.

Επιλεγμένη Βιβλιογραφία

8. Sari, H., Karam, G., Jeanclaude, I., “Transmission Techniques for Digital Terrestrial Television”, *IEEE Commun. Mag.*, 33(2):100-109, Feb. 1995.
9. Schmidl, T.,M., and Cox, D.,C., “Robust Frequency and Time Synchronization for OFDM”, *IEEE Trans. Commun.*, 45(12):1613-1621, Dec. 1997.
10. Stantchev, B., and Fettweis, G., “Time-Variant Distortions in OFDM”, *IEEE Commun. Lett.*, 4(10):312-314, October 2000.
11. Steendam, H.,and Moeneclaey, M., “Analysis and Optimization of the Performance of OFDM on Frequency-Selective Time-Selective Fading Channels”, *IEEE Trans. Commun.*, 47(12):1811-1819, December 1999.
12. Russel, M., and Stuber, G.,L., “Terrestrial Video Broadcasting for Mobile Reception Using OFDM”, *Kluwer Wireless Personal Communications*, (2), pp. 45-66, 1995.
13. Van Nee, R., and Prasad, R., “*OFDM Wireless Multimedia Communications*”, Artech House, 2000.
14. Weinstein, S.,B., and Ebert, P.,M., “Data transmission by frequency division multiplexing using the Discrete Fourier Transform”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-19(5):628-634, October 1971.