

## Μάθημα: «Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου»

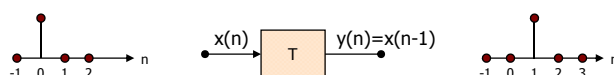
### Διάλεξη 6<sup>η</sup>: «Επεξεργαστές με Μνήμη (Μέρος ΙΙ)»

Φλώρος Ανδρέας  
Επικ. Καθηγητής

digital  
audio processing

### Από προηγούμενο μάθημα...

- Αναπαράσταση καθυστέρησης ενός δείγματος
  - $T$  η περίοδος δειγματοληψίας



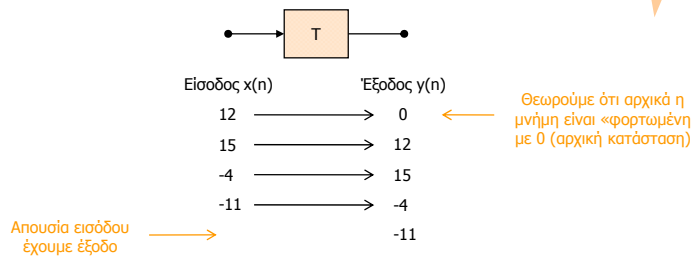
- Για την υλοποίηση τέτοιων αλγορίθμων επεξεργασίας απαιτείται η χρήση μνήμης

digital  
audio processing

### Από προηγούμενο μάθημα...

- Καθυστέρηση ενός δείγματος
  - Single delay buffer ή Pure delay filter

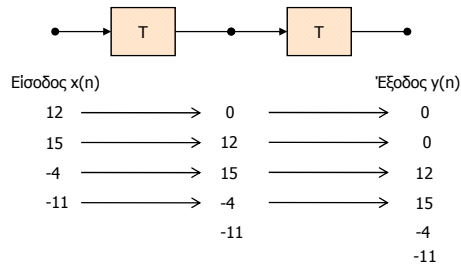
Η έξοδος έχει N+1 δείγματα (1 παραπάνω από την είσοδο)



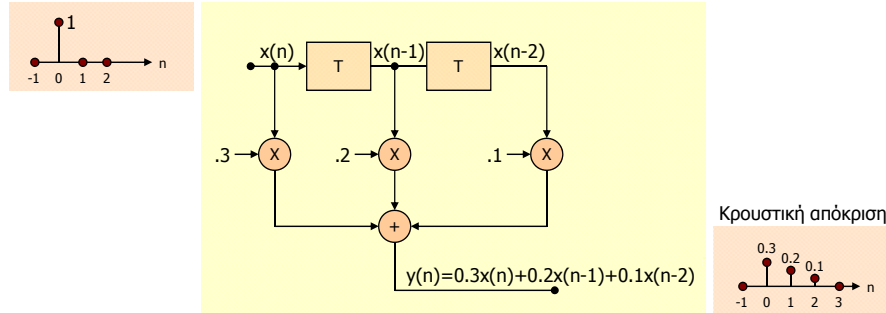
### Από προηγούμενο μάθημα...

- Καθυστέρηση δύο δειγμάτων

Η έξοδος έχει N+2 δείγματα (2 παραπάνω από την είσοδο)



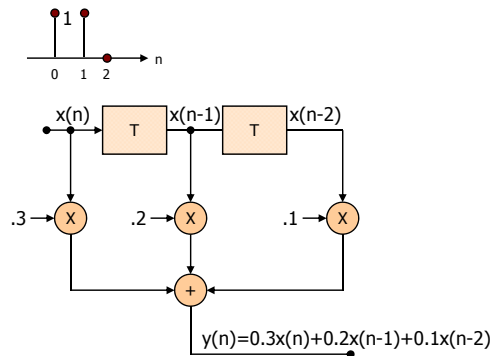
## Παράδειγμα συστήματος επεξεργασίας με μνήμη



digital  
audio  
processing

## Άσκηση #1 📖

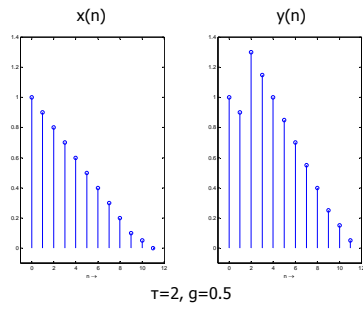
- Ποιά θα είναι η έξοδος του προηγούμενου συστήματος για



Κώδικας – παράδειγμα: Example\_SimpleSystem.m

digital  
audio  
processing

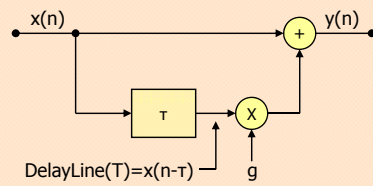
## Η απλή μονάδα καθυστέρησης



```

DelayLine=zeros(T,1);
for n=1:length(x)
    y(n)=x(n)+g*DelayLine(T);
    DelayLine=[x(n);DelayLine(1:T-1)];
end

```



Κώδικας – παράδειγμα: `Example_SimpleDelay.m`

digital  
audio  
processing

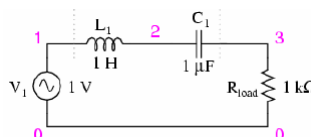
## Ψηφιακά φίλτρα ηχητικών σημάτων



digital  
audio  
processing

## Γιατί ψηφιακά; Μια σύγκριση...

- Τα αναλογικά φίλτρα υλοποιούνται με διάκριτα αναλογικά στοιχεία
  - Μη ιδανικά πηνία και πυκνωτές
  - Απόκλιση από την ιδανική κρουστική απόκριση
  - Δύσκολη σχεδίαση
  - Μικρή τάξη για αξιόπιστη παραγωγή
  - Υψηλές ταχύτητες λειτουργίας ( $\approx$ GHz)
  - Υψηλή δυναμική περιοχή



digital  
audio  
processing

## Γιατί ψηφιακά; Μια σύγκριση...

- Τα ψηφιακά φίλτρα υλοποιούνται σε μικροεπεξεργαστές
  - Εύκολη σχεδίαση, κατασκευή και προγραμματισμός
  - Υψηλή κατανάλωση και κόστος
  - Ακριβής υλοποίηση επιθυμητής κρουστικής απόκρισης
  - Περιορισμός στην ταχύτητα λειτουργίας

digital  
audio  
processing

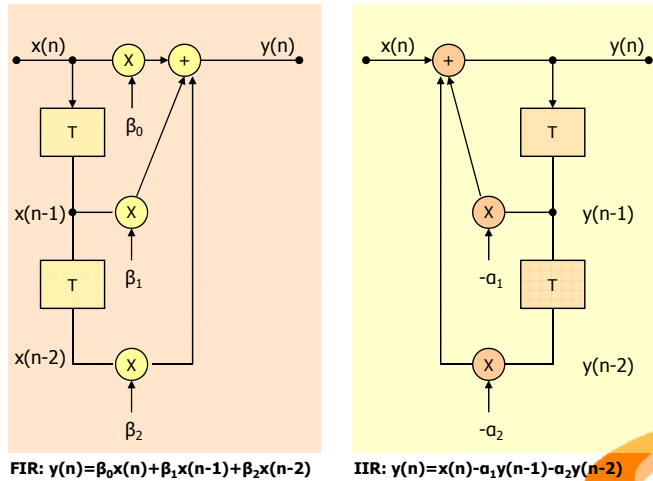
## Κατηγορίες ψηφιακών φίλτρων: FIR

- Φίλτρα πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης
  - Finite Impulse Response (FIR)
  - Η απόκριση σε μια κρουστική ολοκληρώνεται σε πεπερασμένο χρόνο
- Η απόκριση μπορεί να έχει απόλυτα γραμμική φάση
  - Εξάλειψη παραμορφώσεων φάσης
- Δεν εμφανίζουν αστάθεια
- Εύκολη και απλή υλοποίηση
  - ειδικά για αριθμητική σταθερού σημείου
- Υψηλό υπολογιστικό φορτίο
  - Μεγάλο πλήθος πολλαπλασιασμών σε σχέση με τα IIR φίλτρα για δεδομένη κρουστική απόκριση

## Κατηγορίες ψηφιακών φίλτρων: IIR

- Η απόκριση σε κρουστικό σήμα δεν ολοκληρώνεται σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα
  - Ανατροφοδότηση του ζυγισμένου αθροίσματος της εξόδου
- Το υπολογιστικό φορτίο είναι μικρότερο σε σχέση με αντίστοιχα FIR φίλτρα
- Υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης
  - Αστάθεια (ειδικά για μεγάλες τάξεις φίλτρου)
  - Μη γραμμική φάση

## Βασική δομή φίλτρων FIR και IIR



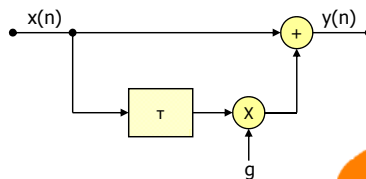
digital  
audio  
processing

## FIR μονάδα καθυστέρησης

- FIR Comb Filter
- Η μονάδα καθυστέρησης ορίζεται ως

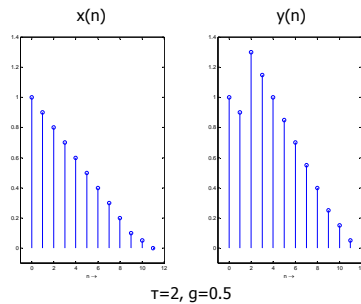
$$y(n) = x(n) + gx(n-T)$$

- Παράμετροι της καθυστέρησης
  - $g$ : σχετικό πλάτος του καθυστερημένου σήματος
  - $T$ : το πλήθος των δειγμάτων της καθυστέρησης



digital  
audio  
processing

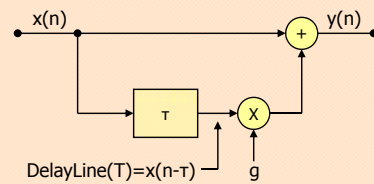
## FIR μονάδα καθυστέρησης (συν.)



```

DelayLine=zeros(T,1);
for n=1:length(x)
    y(n)=x(n)+g*DelayLine(T);
    DelayLine=[x(n);DelayLine(1:T-1)];
end

```



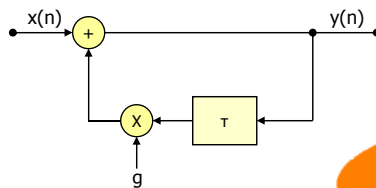
digital  
audio  
processing

## IIR μονάδα καθυστέρησης

- IIR Comb Filter
- Η μονάδα καθυστέρησης ορίζεται ως

$$y(n)=x(n)+gy(n-T)$$

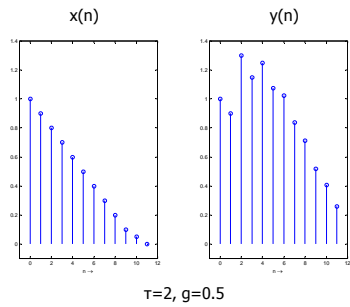
- Παράμετροι της καθυστέρησης
  - $g$ : σχετικό πλάτος του καθυστερημένου σήματος
  - $T$ : το πλήθος των δειγμάτων της καθυστέρησης



digital  
audio  
processing

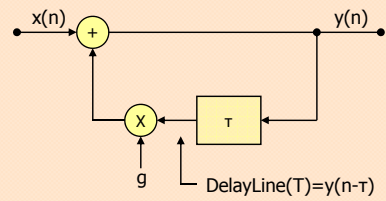


## IIR μονάδα καθυστέρησης



```

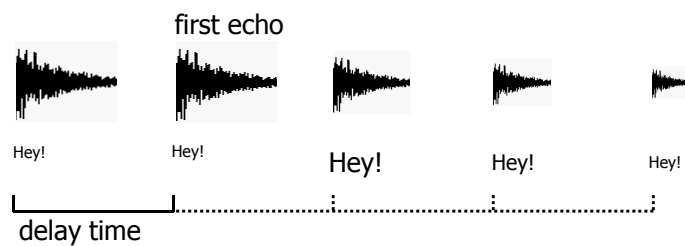
DelayLine=zeros(T,1);
for n=1:length(x)
    y(n)=x(n)+g*DelayLine(T);
    DelayLine=[y(n);DelayLine(1:T-1)];
end
    
```



Κώδικας – παράδειγμα: Example\_SimpleIIRDelay.m



## Η μονάδα καθυστέρησης (σύνοψη)



## Αναπαράσταση ψηφιακών ηχητικών σημάτων στο πεδίο της συχνότητας



digital  
audio processing

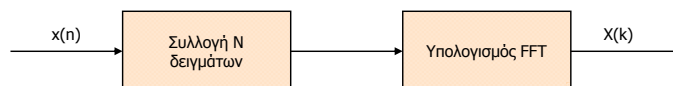
## Ο μετασχηματισμός Fourier

- Η αναπαράσταση σημάτων στο πεδίο της συχνότητας γίνεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier (**Fourier Transformation**)
  - Το σήμα πρέπει να είναι περιοδικό
- Για σήματα διάκριτου χρόνου χρησιμοποιείται ο διάκριτος μετασχηματισμός Fourier (**Discrete Fourier Transform, DFT**)
  - Υψηλό υπολογιστικό φορτίο
- Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (**Fast Fourier Transform, FFT**)
  - Χαμηλό υπολογιστικό φορτίο
  - Ο αριθμός σημείων του υπό αναπαράσταση σήματος δύναμη του 2

digital  
audio processing

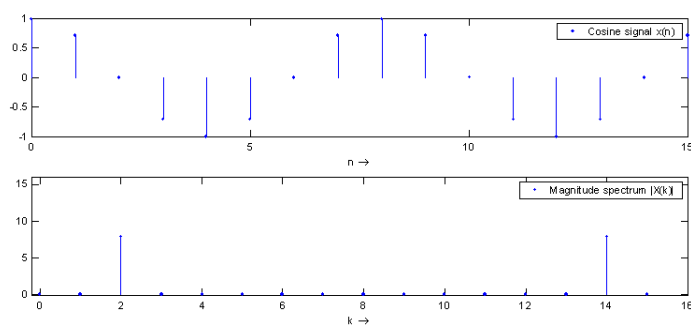
## Ο μετασχηματισμός Fourier (συν.)

- Έστω σήμα διάκριτου χρόνου  $x(n)$



- Η απεικόνιση στη συχνότητα έχει επίσης  $N$  σημεία
  - $0 \leq k \leq N-1$
- Οι τιμές  $X(k)$  ονομάζονται και φασματικοί συντελεστές
  - Μιγαδικές τιμές

## Παράδειγμα υπολογισμού FFT



```

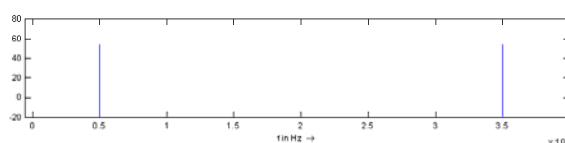
N=16;
x=cos(2*pi*2*(0:1:N-1)/N)';
X=abs(fft(x,N));
  
```

## Παράδειγμα υπολογισμού FFT (συν.)

- Εάν  $f_s$  (Hz) η συχνότητα δειγματοληψίας τότε

$$0 \leq k \frac{f_s}{N} \leq (N-1) \frac{f_s}{N}$$

- Φασματικοί συντελεστές  $X(f)$ 
  - Έκφραση σε dB



```
N=1024; fs=40000; f=5000;
t=[0:1/fs:(N-1)/fs];
x=cos(2*pi*f*t)';
f=(0:(N-1)/N)*fs;
X=abs(fft(x,N));
```

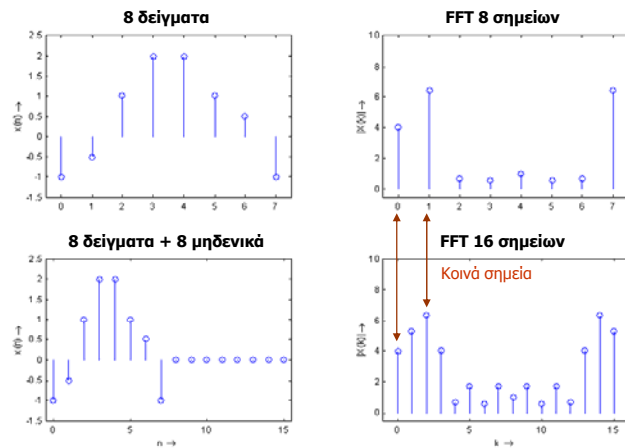
digital  
audio processing

## Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας

- Η ανάλυση της αναπαράστασης στο πεδίο της συχνότητας εξαρτάται από το πλήθος  $N$  των σημείων του σήματος
  - Π.χ.  $N=128, 256, 512, 1024, 2048, \dots$
- Αύξηση του μήκους  $N$  μας δίνει μεγαλύτερη ανάλυση
- Για δεδομένη τιμή του  $N$ , η ανάλυση μπορεί να αυξηθεί με προσθήκη μηδενικών δειγμάτων
  - Συνήθως στο τέλος του σήματος
  - Zero padding

digital  
audio processing

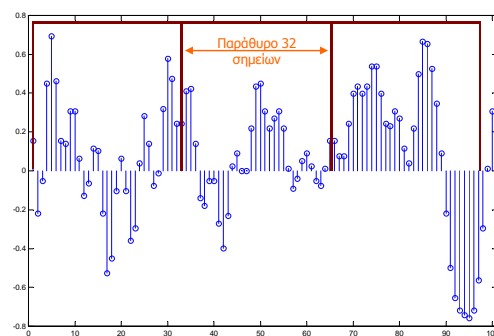
## Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας (συν.)



digital  
audio  
processing

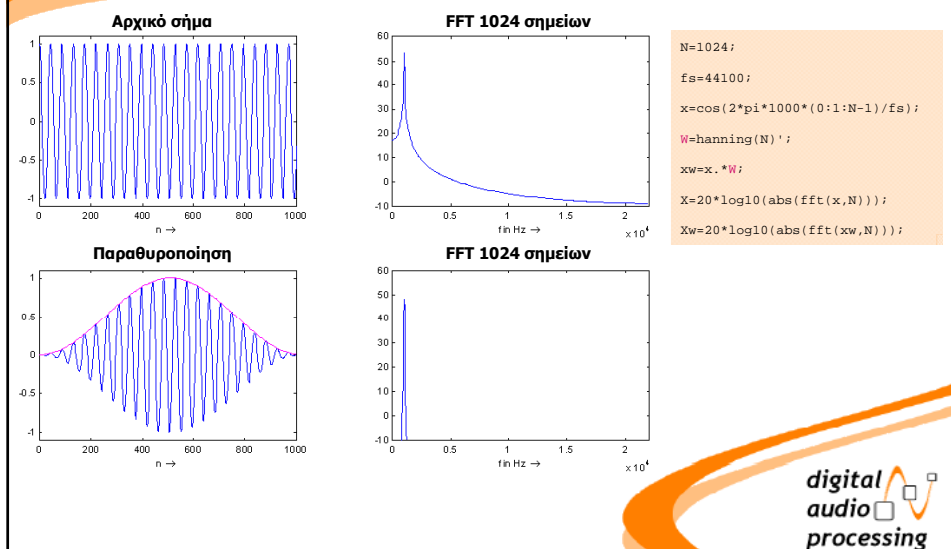
## Χρονικά παράθυρα και FFT

- Η εξέλιξη ενός σήματος στο χρόνο απαιτεί την συλλογή  $N$  σημείων του υπό αναπαράσταση σήματος
- Για κάθε τμήμα  $N$  σημείων υπολογίζεται ο FFT εκ νέου
- Το σήμα  $N$  δειγμάτων δεν είναι περιοδικό
- Η επιλογή  $N$  σημείων για τον υπολογισμό του FFT προκαλεί παραμόρφωση στον ορθό υπολογισμό του μετασχηματισμού



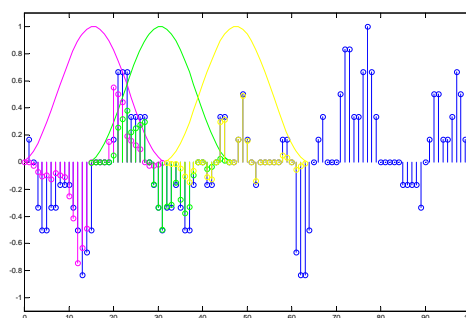
digital  
audio  
processing

## Χρονικά παράθυρα και FFT (συν.)

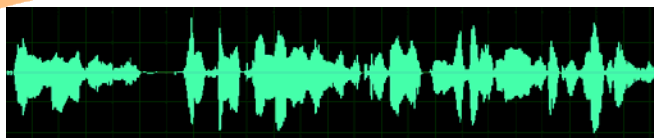


## Χρονικά παράθυρα και επικάλυψη

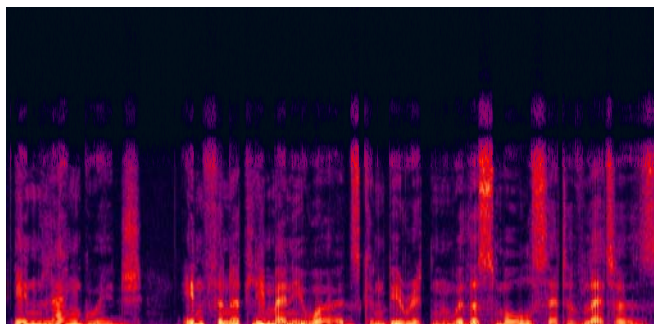
- Η εφαρμογή παραθύρου «μηδενίζει» την επίδραση κάποιων δειγμάτων
- Λύση η μερική επικάλυψη των διαδοχικών παραθύρων
  - Π.χ. κατά 25%, 50%
- Μεγαλύτερη ακρίβεια
- Μεγαλύτερο υπολογιστικό φορτίο



## Παράδειγμα υπολογισμού FFT στο χρόνο



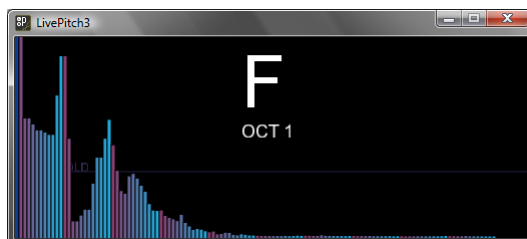
Σήμα στο χρόνο



Σήμα στη συχνότητα

digital  
audio  
processing

## Παράδειγμα φασματικής επεξεργασίας

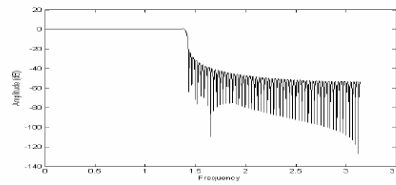


Κώδικας – παράδειγμα: LivePitch3 (processing)

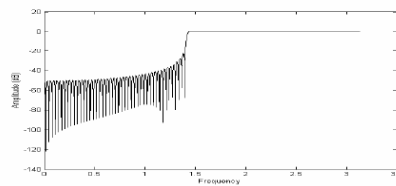
digital  
audio  
processing

## Τυπικές μορφές φίλτρων

Low Pass Filter



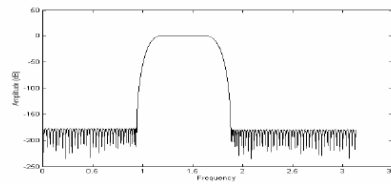
High Pass Filter



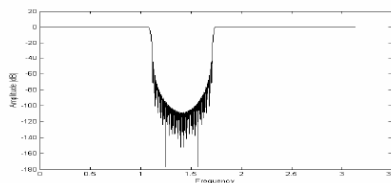
digital  
audio  
processing

## Τυπικές μορφές φίλτρων (συν.)

Band Pass Filter



Band Stop Filter



digital  
audio  
processing



**ΤΕΛΟΣ (για σήμερα...)**

REACHED  
YOUR  
LIMIT?

digital  
audio  
processing



[www.ionio.gr/~floros/](http://www.ionio.gr/~floros/)