

Μάθημα: «Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου»

Διάλεξη 1^η: «Εισαγωγή»

Φλώρος Ανδρέας
Επικ. Καθηγητής

digital
audio 
processing

Πληροφορίες για το μάθημα

- Διδάσκων
 - Ανδρέας Φλώρος(floros@ionio.gr)
- Ορολόγιο πρόγραμμα του μαθήματος
 - Ώρες διαλέξεων : **TBD**
 - Η θεωρία του μαθήματος
 - Εργαστηριακό: **TBD**
 - Πρακτική εξάσκηση / επίδειξη
- Εκπόνηση εργασίας / εργασιών
 - ατομικές
 - συμμετοχή στη βαθμολογία: 30%



digital
audio 
processing

Πληροφορίες για το μάθημα (συν.)

- Υλικό αναφοράς (προτεινόμενο)
 - «Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος Σήματα - Συστήματα και Φίλτρα»,
Αντωνίου Α.
 - <http://www.tziola.gr/gr/PreviewBook.asp?ID=54>
 - «Σήματα, Συστήματα και Ψηφιακή Επεξεργασία Σημάτων », Ασημάκης Ν.
 - <http://www.dardanosnet.gr/home/book-details.php?id=1557>



digital
audio
processing

Πληροφορίες για το μάθημα (συν.)

- E-class
 - <http://e-class.ionio.gr>
- Υπάρχει κάποιος που δεν γνωρίζει τη λειτουργία του;
- Εγγραφή χρηστών



digital
audio
processing

Στόχοι προγράμματος σπουδών ΤΤΗΕ

- Βασική ιδέα του πενταετούς προγράμματος σπουδών του ΤΤΗΕ
 - Η σύγχρονη εξειδίκευση στον οπτικοακουστικό χώρο και στα πολυμέσα πρέπει να στηρίζεται σε επαρκείς γνώσεις:
 - των οπτικοακουστικών τεχνικών
 - των σύγχρονων ψηφιακών μεθόδων επεξεργασίας του ήχου, της εικόνας και του συνδυασμού τους
 - της επιστημονικής θεμελίωσης του ρόλου των οπτικοακουστικών εφαρμογών στη σύγχρονη εξελισσόμενη κοινωνία

Πηγή

Ιστότοπος Ιονίου Πανεπιστημίου / ΤΤΗΕ (www.ionio.gr)

digital
audio processing

Στόχος του μαθήματος

«... Η παρουσίαση (εκ των έσω) των τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας ηχητικού σήματος...»

digital
audio processing

Εισαγωγή στο μάθημα...

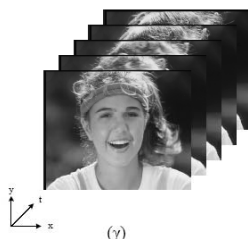
Τι είναι σήμα;



(α)



(β)



(γ)

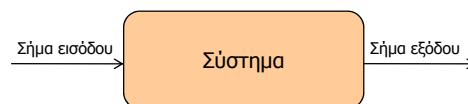
Τυπικές κατηγορίες σημάτων

- Τηλεοπτικό
- Ραδιοφωνικό
- Μετρούμενες τιμές
 - Θερμοκρασίας
 - Ατμοσφαιρικών ρύπων
 - Στάθμης ηχητικής πίεσης
 - Πυρετού ασθενών
- Μετρήσεις σειсмоγράφων
-

digital
audio 
processing

Τι είναι σύστημα;

- Ένα ομαδοποιημένο σύνολο «διαδικασιών» που
 - λαμβάνει ένα σήμα (ή περισσότερα) στην είσοδό του
 - και παράγει ένα σήμα (ή περισσότερα) στην έξοδό του
 - εξαρτάται από τις «διαδικασίες»



digital
audio 
processing

Τι είναι σύστημα; (συν.)

- Σύστημα πολλαπλών εισόδων / εξόδων



digital
audio
processing

Ένα παράδειγμα συστήματος...

- Μπορείτε να προσδιορίσετε:
 - Ποιά είναι η είσοδος του συστήματος;
 - Ποιά είναι η έξοδος του συστήματος;



digital
audio
processing

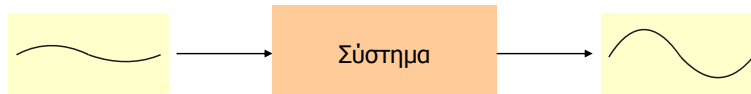
Κατηγορίες συστημάτων

- Τα συστήματα που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος διακρίνονται σε
 - Αναλογικά
 - Χειρίζονται σήματα τα οποία μεταβάλλονται σε ένα συνεχές διάστημα τιμών
 - Ψηφιακά
 - Χειρίζονται σήματα τα οποία μπορούν να λάβουν ένα πεπερασμένο αριθμό τιμών

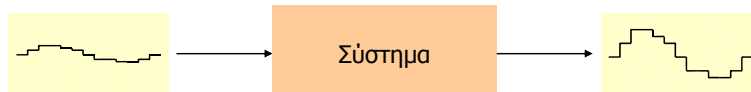
digital
audio
processing

Κατηγορίες συστημάτων (συν.)

- Αναλογικά συστήματα



- Ψηφιακά συστήματα



digital
audio
processing

Εφαρμογές ψηφιακών συστημάτων

- Επεξεργασία ψηφιακών δεδομένων
 - Ψηφιακοί επεξεργαστές
- Μετάδοση και διανομή δεδομένων / επικοινωνία
 - Ασύρματα δίκτυα
 - Ψηφιακά τηλεφωνικά κέντρα
- Αποθήκευση δεδομένων
 - Οπτικοί δίσκοι
 - USB flash δίσκοι



digital
audio processing

Γιατί ψηφιακά;

- Μέγεθος
- Απόδοση
 - Λήψη
 - Εκτύπωση
 - Επεξεργασία
 - Διανομή / Αναπαραγωγή
- Ποιότητα φωτογραφιών
 - Αντοχή στο χρόνο
- Κόστος
 - Απόκτησης
 - Χρήσης
- ...



Αναλογική μηχανή



Ψηφιακή μηχανή

digital
audio processing

Πλεονεκτήματα ψηφιακής τεχνολογίας

- Ευέλικτοι τρόποι αποθήκευσης και διανομής δεδομένων
 - Μέθοδοι ψηφιακής συμπίεσης δεδομένων
- Μεγαλύτερη «αντοχή» των ψηφιακών δεδομένων στο χρόνο
- Μεγαλύτερη φορητότητα
 - Μικρό μέγεθος
 - Χαμηλή κατανάλωση
- Μικρότερο κόστος
 - Διαρκής εξέλιξη στον τομέα του υλικού (ICs)
 - Μαζικός προγραμματισμός υλικού



digital
audio  
processing

Πλεονεκτήματα ψηφιακής τεχνολογίας (συν.)

- Μεγαλύτερη ανοχή στο θόρυβο
- Δυνατότητα ολοκληρωμένης διαχείρισης της ψηφιακής πληροφορίας
 - Επεξεργαστές ειδικού σκοπού
 - Επεξεργαστές γενικού σκοπού
 - Προσωπικοί ψηφιακοί υπολογιστές



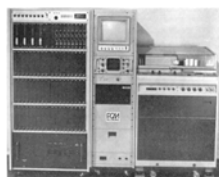
digital
audio  
processing

Ψηφιακά Ηχητικά Συστήματα

- Πρώτη εμφάνιση στα τέλη της δεκαετίας του '60
 - Βασική λειτουργία: αναπαραγωγή ήχου
 - Ικανοποιητική ποιότητα αναπαραγωγής
 - Η.Π.Α. – Πανεπιστήμιο Utah (T.G. Stookham)
 - Ιαπωνία (NHK)
 - Ευρώπη (Philips)
- Εμπορική διάθεση από τα μέσα του '70
 - Επαγγελματικές εφαρμογές
 - Οικιακές εφαρμογές
- Επανάσταση ψηφιακής τεχνολογίας του σήμερα
 - CD/DVD/SACD-players, DSPs, PCs, mp3/wma players

digital
audio processing

Ψηφιακά Ηχητικά Συστήματα (συν.)



Prototype Nippon Columbia PCM recording system
(2-ch, N=13-bit, $f_s=47.25$ KHz)



CD/DVD Players
(7.1-ch, N=24bit, $f_s=192$ kHz)



Portable audio devices
Wireless digital audio networking

digital
audio processing

Εξέλιξη της ψηφιακής ηχητικής τεχνολογίας*

1960s	Computer Music generation	(various, e.g. Pierce)
1961	Digital Artificial Reverb	(Schroeder & Logan)
1967	PCM prototype system	(NHK)
1969	PCM Audio Recorder	(Nippon Columbia)
1968	Binaural technology	(Blauert)
1971	Digital delay line	(Blesser & Lee)
1973	Time-delay Spectroscopy (TEF)	(Heyser)
1975	Digital synthesis algorithms	(various, e.g. Chowning)
1975	Audio DSP emulation	(Blesser et al.)
1976	Adaptive Transform Coding	(Zelinski & Noll)
1977	Prototypes of CD & DAD	(Philips, Sony, Mitsubishi)
1977	Digital Loudspeaker measurements	(Berman & Fincham)
1978-9	PCM / U-matic & VHS recorder	(Sony)
1978	32-ch digital multitrack	(3M)
1978	Hard-disk audio recording / editing	(Stockham)
1979	Prototype digital mixing console	(McNally)

*Πηγή: I.N Μουρτζόπουλος, "The evolution of digital audio technology"

digital
audio 
processing

Εξέλιξη της ψηφιακής ηχητικής τεχνολογίας (συν.)

1981	CD-DA standard	(industry)
1982	Adaptive loudspeaker equalisation	(Mourjopoulos & Clarkson)
1983	PWM class-D amplifier	(Attwood)
1984	DAT standard	(industry)
1985	Digital mixing console	(Neve)
1987-90	Perceptual audio data reduction	(Brandenburg, Johnston)
1991	Dolby AC-3	(Dolby)
1992	Mini Disc	(Sony)
1993	MPEG -1 Standard	(ISO)
1994	DVD proposals	(industry)
1994	MPEG-2 (BC, LSF) Standard	(ISO)
1995	DVD-Video standard	(industry)
1997	MPEG II (AAC) Standard	(ISO)
1997	SA-CD proposal	(Sony)
1998	MPEG-4 Standard	(ISO)
1999	DVD-Audio standard	(industry)
....		

digital
audio 
processing

Σύγκριση αναλογικών-ψηφιακών συστημάτων ήχου

- Πλεονεκτήματα ψηφιακών συστημάτων
 - Υψηλότερη τιμή σχέσης SNR
 - Αυξημένη δυναμική περιοχή λειτουργίας
 - Μικρές γραμμικές/μη-γραμμικές παραμορφώσεις
 - Εύκολη αποθήκευση/μετάδοση και επικοινωνία συσκευών
 - Ευκολία στον τρόπο χρήσης
 - Μικρό μέγεθος - φορητότητα
 - Χαμηλό κόστος παραγωγής
 - Αυξημένη δυνατότητα επεξεργασίας στο ψηφιακό πεδίο
- Μειονεκτήματα ψηφιακών συστημάτων
 - Μετατροπή αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά και αντίστροφα
 - Παραμορφώσεις κατά την επεξεργασία

digital
audio 
processing

Λειτουργίες ψηφιακών συστημάτων ήχου

- Αποθήκευση ηχητικών δεδομένων
 - CD, DAT, DVD, flash memory
- Μετάδοση/διανομή
 - S/PDIF, DAB
- Αναπαραγωγή ήχου
- Επεξεργασία
 - Φιλτράρισμα, κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση
- Ανάλυση
 - Φασματική/χρονική
- Μέτρηση ηχητικών/ακουστικών σημάτων
 - Εκτίμηση ποιότητας σημάτων



digital
audio 
processing

Ψηφιακά υποσυστήματα ήχου

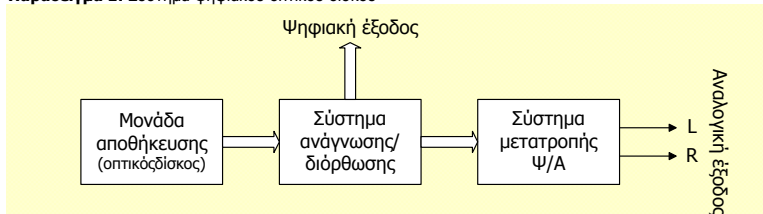
- Μετατροπείς Α/Ψ και Ψ/Α
 - A/D και D/A Converters
- Υποσυστήματα κωδικοποίησης και μετάδοσης
 - PCM/mp3 codecs, DAB, Wireless audio
- Υποσυστήματα αποθήκευσης ηχητικών δεδομένων
 - DAT, HD, CD, DVD κ.ά.
- Ψηφιακοί επεξεργαστές ήχου (audio processors)
 - DSPs
- Υποσυστήματα λογισμικού επεξεργασίας και διαχείρισης ήχου
 - Software DSPs, Digital JukeBoxes, κ.ά.



digital
audio processing

Ψηφιακά υποσυστήματα ήχου (συν.)

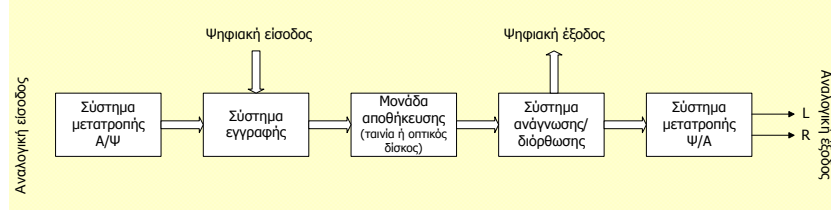
Παράδειγμα 1: Σύστημα ψηφιακού οπτικού δίσκου



digital
audio processing

Ψηφιακά υποσυστήματα ήχου (συν.)

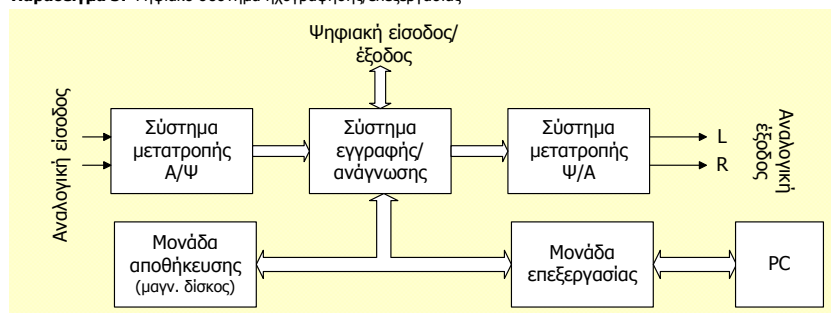
Παράδειγμα 2: Σύστημα ψηφιακής ταινίας (DAT) ή εγγραφόμενου ψηφιακού δίσκου



digital
audio
processing

Ψηφιακά υποσυστήματα ήχου (συν.)

Παράδειγμα 3: Ψηφιακό σύστημα ηχογράφησης/επεξεργασίας



digital
audio
processing

Βασική Θεωρία Ψηφιακού Ήχου

digital
audio processing

Αναλογική/Ψηφιακή Μετατροπή

- Τα ψηφιακά ηχητικά συστήματα πρέπει να επικοινωνήσουν με τον «αναλογικό» ανθρώπινο κόσμο
 - Μετατροπή αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά δεδομένα (π.χ. κατά την ηχογράφηση)
 - Μετατροπή ψηφιακών δεδομένων σε αναλογικό σήμα (π.χ. κατά την αναπαραγωγή)



digital
audio processing

Αναλογική/Ψηφιακή Μετατροπή (συν.)

- Δειγματοληψία
 - Μετατροπή ενός χρονικά συνεχούς (αναλογικού) σήματος σε πεπερασμένο αριθμό διαδοχικών τιμών
- Κβαντισμός
 - Μετατροπή των διαδοχικών τιμών πλάτους σε διάκριτες τιμές

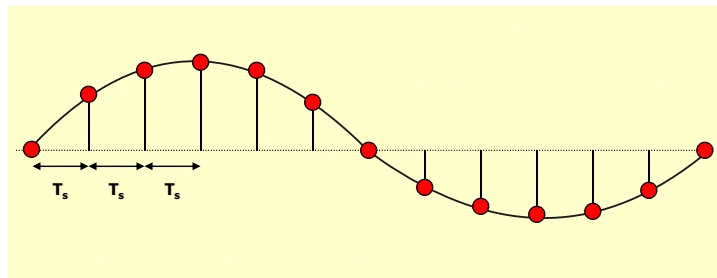


digital
audio processing

Στοιχεία δειγματοληψίας ηχητικών σημάτων

digital
audio processing

Δειγματοληψία ηχητικών σημάτων

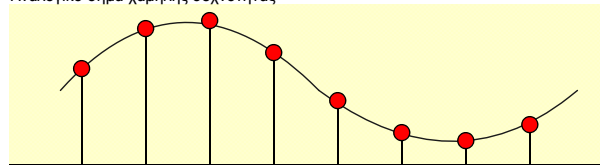


- Αρχικό αναλογικό σήμα $s_c(t)$
- Δείγματα διάκριτου χρόνου $s_d(nT_s)$
- T_s Περίοδος δειγματοληψίας

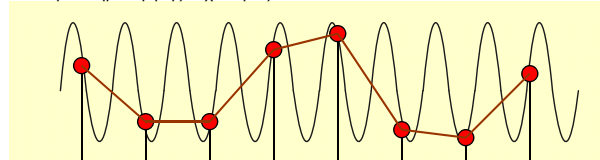
digital
audio processing

Ποιά η τιμή της περιόδου δειγματοληψίας;

Αναλογικό σήμα χαμηλής συχνότητας



Αναλογικό σήμα υψηλής συχνότητας



digital
audio processing

Θεώρημα του Nyquist

- Συχνότητα δειγματοληψίας $f_s = 1/T_s$
- Θεμελιώδης σχέση δειγματοληψίας

$$f_s > 2f_{\max}$$

όπου f_{\max} η μέγιστη συχνότητα του σήματος υπό μετατροπή

- Παράδειγμα: στο πρότυπο CD-DA
 - $f_{\max} = 22.05\text{kHz}$
 - $f_s = 44.1\text{kHz}$

Demonstration

44.1kHz

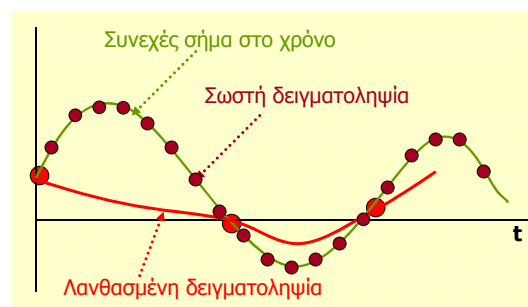
22.05kHz

11.025kHz

6kHz

digital
audio
processing

Aliasing: στο πεδίο του χρόνου



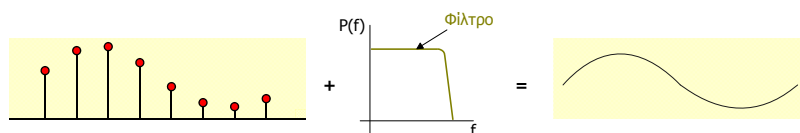
digital
audio
processing

Aliasing σε ηχητικά σήματα

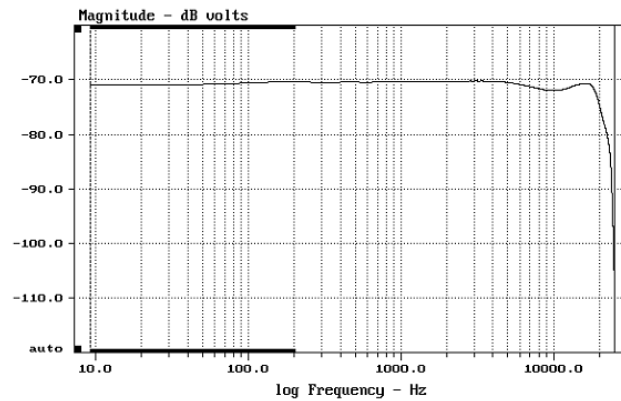
- Το αναλογικό σήμα πρέπει να είναι περιορισμένου συχνοτικού περιεχομένου (μέχρι $f_{\max}=f_s/2$)
- Εάν δεν ισχύει η προηγούμενη συνθήκη, δημιουργείται επικάλυψη
- Στην πράξη, τα ηχητικά σήματα περιλαμβάνουν υψίσυχη πληροφορία σε συχνότητες $> f_{\max}$
- Απαραίτητη η χρήση χαμηλοδιαβατού (low-pass) φίλτρου
 - Anti-aliasing filter
 - Περιορίζει το υψίσυχο περιεχόμενο

Reconstruction φίλτρα στην Ψ/Α μετατροπή

- Εάν το σήμα μετά τη δειγματοληψία δεν παρουσιάζει aliasing, τότε το αρχικό αναλογικό σήμα μπορεί να ανασυσταθεί με χρήση χαμηλοδιαβατού φίλτρου (*reconstruction filter*)



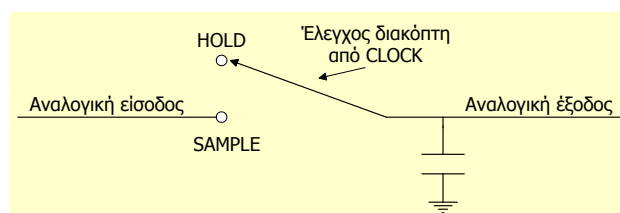
Τυπική απόκριση reconstruction φίλτρου CD-DA



digital
audio
processing

Υλοποίηση δειγματοληψίας

- Βαθμίδα sample and hold

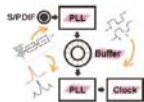


- Βασικές απαιτήσεις:
 - Ρολόι CLOCK χωρίς jitter (<math><1\text{ns}</math>)
 - Αποφόρτιση πυκνωτή σε χρόνο μεγαλύτερο του T_s

digital
audio
processing

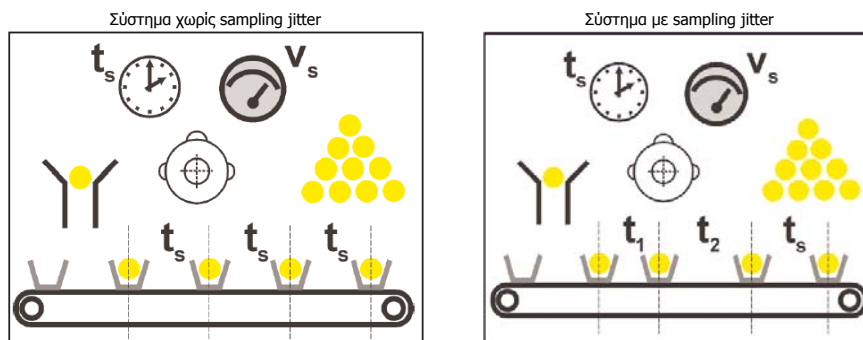
Το πρόβλημα του sampling jitter

- Τι είναι sampling jitter?
 - «Οι στιγμιαίες αποκλίσεις καθοριστικών τμημάτων ενός ψηφιακού σήματος σε σχέση με τις ιδανικές θέσεις τους στο χρόνο»
- Στα ψηφιακά συστήματα πρέπει να γνωρίζουμε το χρόνο στον οποίο έχει γίνει η λήψη της τιμής ενός δείγματος
 - Γίνεται πάντα η παραδοχή ότι ο χρόνος της λήψης διαδοχικών δειγμάτων είναι σταθερός
 - Δεν υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης χρόνου λήψης και τιμής δείγματος
 - ... Γιατί οι δέκτες του ψηφιακού σήματος δεν μπορούν να αξιοποιήσουν τέτοια πληροφορία!



digital
audio
processing

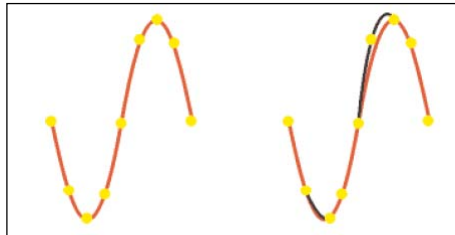
Το πρόβλημα του sampling jitter (συν.)



digital
audio
processing

Το πρόβλημα του **sampling jitter** (συν.)

- Τελικά, το jittered σήμα είναι ίδιο με το ιδανικό;
 - Προφανώς όχι!



- Υπάρχουν και άλλα είδη jitter
 - Clock jitter (εκτός του εύρους ύλης του μαθήματος)

digital
audio 
processing

Στοιχεία κβαντισμού ηχητικών σημάτων

digital
audio 
processing

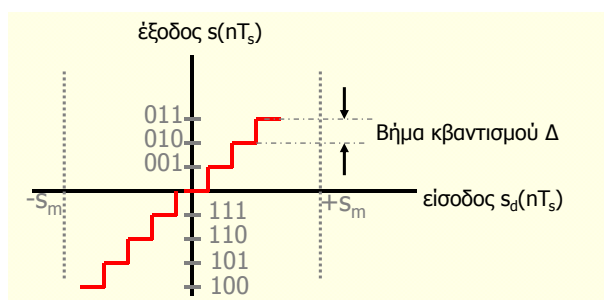
Κβαντισμός - Ορισμός

- Μετά τη δειγματοληψία, οι δυνατές τιμές πλάτους του σήματος $s_d(nT_s)$ είναι άπειρες
- Κβαντισμός: αντιστοίχιση των άπειρων τιμών σε πεπερασμένο αριθμό σταθμών
 - Μη γραμμική διαδικασία

$$s(nT_s) = Q[s_d(nT_s)]$$

- Το πλήθος των σταθμών εξαρτάται από την τάξη του κβαντιστή
 - Ευκρίνεια κβαντισμού N (bit)

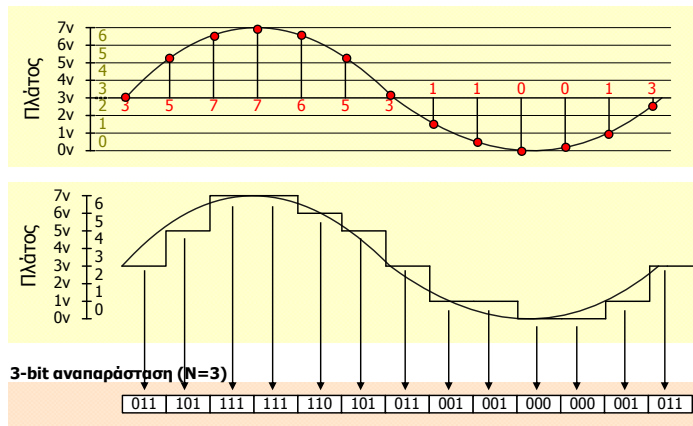
Το «βήμα» κβαντισμού



$$\Delta = \frac{S_{max} - S_{min}}{2^N - 1}$$

όπου S_{max} και S_{min} η μέγιστη και ελάχιστη τιμή πλάτους του σήματος

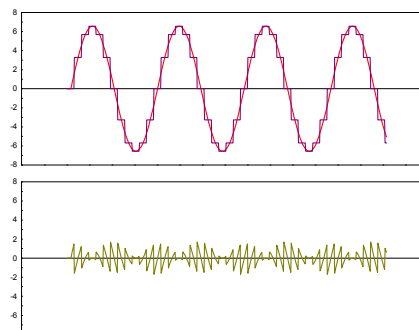
Γραφική αναπαράσταση κβαντισμού



digital
audio
processing

Ο κβαντισμός ως προσθετικός θόρυβος

- Ο κβαντισμός είναι μια μορφή *προσθετικού θορύβου* $e(t)$ στο υπό αναπαράσταση ηχητικό σήμα:



$$s(t) = s_c(t) + e(t)$$

digital
audio
processing

Η έννοια της δυναμικής περιοχής

- Πόσες διαφορετικές καταστάσεις μπορούν να απεικονίσουν τα
 - 4bit
 - 8bit
 - 16bit
- Γενικός κανόνας
 - N bit -> 2^N καταστάσεις
 - Αυτή είναι και η δυναμική περιοχή του ψηφιακού σήματος



digital
audio
processing

Κβαντισμός και δυναμική περιοχή

- Για ημιτονοειδή σήματα, η θεωρητική δυναμική περιοχή του κβαντισμένου ηχητικού σήματος είναι:

Τάξη N (bits)	SNR (dB)
8	49.8
12	73.8
16	97.8
18	109.8
24	145.76

$$\text{SNR} = 6N + 1.76 \text{ (dB)}$$

digital
audio
processing

Κβαντισμός και δυναμική περιοχή (συν.)

- Τα ακουστικά σήματα καλύπτουν μια δυναμική περιοχή της τάξης των 100dB.
- Τα αναλογικά συστήματα έχουν δυναμική περιοχή της τάξης των 80-90dB.
- Θεωρητικά, για $N=16\text{bit}$ έχουμε ικανοποιητική τιμή SNR
- Στην πράξη όμως, για μη ημιτονικά σήματα ισχύει:

$$\text{SNR} = 6.02N - 24.77 \text{ (dB)}$$

- Άρα, η απόδοση των 16-bit μετατροπών είναι οριακά αποδεκτή
- Λύση τα 24bit

Demonstration

16bit

8bit

4bit

digital
audio processing

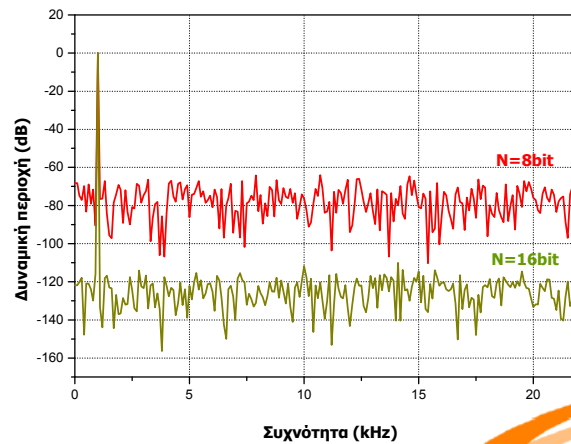
Κβαντισμός και δυναμική περιοχή (συν.)

- Τυπικές τιμές δυναμικής περιοχής

Audio Device/Application	Typical Signal Quality
AM Radio	48 dB
Analog Broadcast TV	60 dB
FM Radio	70 dB
Analog Cassette Player	73 dB
Video Camcorder	75 dB
ADI SoundPort Codecs	80 dB
16 Bit Audio Converters	90 to 95 dB
Digital Broadcast TV	85 dB
Mini-Disk Player	90 dB
CD Player	92 to 96 dB
18-bit Audio Converters	104 dB
Digital Audio Tape (DAT)	110 dB
20-bit Audio Converters	110 dB
24-bit Audio Converters	110 to 120 dB
Analog Microphone	120 dB

digital
audio processing

Παράδειγμα «θορύβου» κβαντισμού



Demonstration

16bit

8bit

digital
audio processing

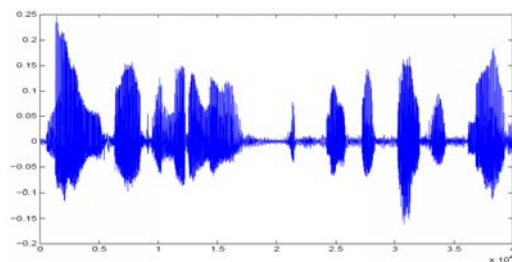
Συνοψίζοντας...

- Ένα ψηφιακό σήμα είναι η «κβαντισμένη» εκδοχή ενός σήματος διάκριτου χρόνου
- Τυπικός συμβολισμός *μονοδιάστατου* (π.χ. ηχητικού) ψηφιακού σήματος
 - $x(nT)$, $n = \dots -2, -1, 0, 1, 2 \dots$
 - $x(n)$ ή x_n
- Ουσιαστικά ένα ψηφιακό σήμα είναι μία ακολουθία (πεπερασμένων σε εύρος) τιμών

digital
audio processing

Μονοδιάστατα και πολυδιάστατα ψηφιακά σήματα

- Σήματα διάκριτου χρόνου μίας διάστασης
 - $n \rightarrow x(n)$
 - Παραδείγματα: Ψηφιακό ηχητικό σήμα, σήμα φωνής, μουσικής κ.λ.π.



digital
audio processing

Μονοδιάστατα και πολυδιάστατα ψηφιακά σήματα (συν.)

- Σήματα διάκριτου χρόνου δύο διαστάσεων
 - Χωρικά σήματα: Μεταβολή του πλάτους στο χώρο
 - $(i, j) \rightarrow x(i, j)$
- Παραδείγματα: Ψηφιακή εικόνα (π.χ. Grayscale)



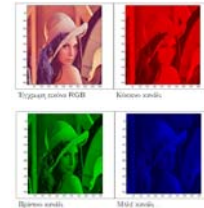
digital
audio processing

Μονοδιάστατα και πολυδιάστατα ψηφιακά σήματα (συν.)

- Πολυκαναλικά χωρικά σήματα

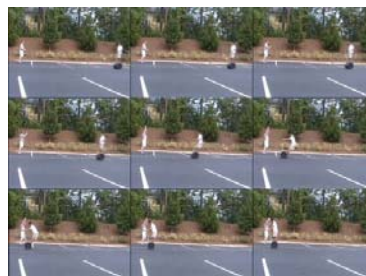
$$(i, j) \rightarrow x(i, j), \quad x(i, j) = \begin{bmatrix} x_1(i, j) \\ \vdots \\ x_k(i, j) \end{bmatrix}$$

- Συνολικά k-канάλια...
- Παράδειγμα: έγχρωμη (RGB) εικόνα
 - k = 3



Μονοδιάστατα και πολυδιάστατα ψηφιακά σήματα (συν.)

- Χωροχρονικά ψηφιακά σήματα
 - Μεταβολή του πλάτος στο χώρο και το χρόνο
 - $(i, j, n) \rightarrow x(i, j, n)$
 - Παράδειγμα: Ψηφιακό σήμα video



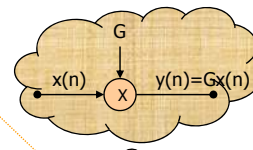
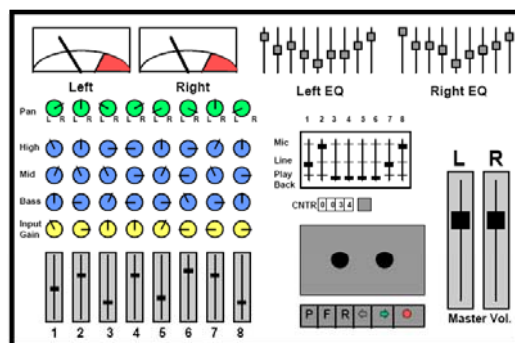
Αντί επιλόγου: περιεχόμενο μαθήματος

- Ανάλυση τεχνικών επεξεργασίας μονοδιάστατων ηχητικών σημάτων
- Χρήση τεχνικών για την υλοποίηση ψηφιακών ηχητικών συστημάτων
- Εκ των «έσω» προσέγγιση που στοχεύει
 - Κατανόηση δυνατοτήτων τεχνολογίας
 - Κατανόηση ορίων τεχνολογίας
 - Παρόχή γνώσης για την ανάπτυξη εξειδικευμένων συστημάτων



digital
audio
processing

Αντί επιλόγου: περιεχόμενο μαθήματος (συν.)



digital
audio
processing

ΤΕΛΟΣ (για σήμερα...)

REACHED
YOUR
LIMIT?

digital
audio
processing

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΙΟΝΙΑ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑ
www.ionio.gr/~floros/