

Τεχνολογία Ήχου

Διάλεξη 7: «Θεμελιώσεις Ψηφιακού Ήχου»

Φλώρος Ανδρέας
Επικ. Καθηγητής

Αναλογική/Ψηφιακή Μετατροπή

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



Αναλογική/Ψηφιακή Μετατροπή (συν.)

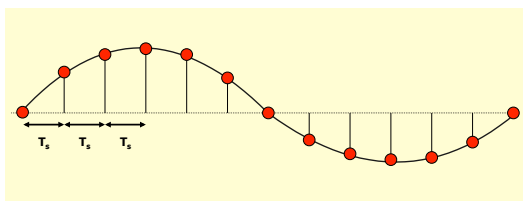
- Δειγματοληψία
 - Μετατροπή ενός χρονικά συνεχούς (αναλογικού) σήματος σε πεπερασμένο αριθμό διαδοχικών τιμών
- Κβαντισμός
 - Μετατροπή των διαδοχικών τιμών πλάτους σε διάκριτες τιμές



Στοιχεία δειγματοληψίας ηχητικών σημάτων



Δειγματοληψία ηχητικών σημάτων



— Αρχικό αναλογικό σήμα $s_a(t)$
 ● Δείγματα διακριτού χρόνου $s_d(nT_s)$
 T_s Περίοδος δειγματοληψίας

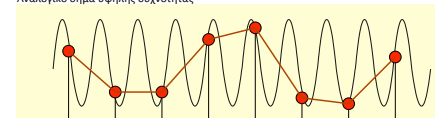


Ποιά η τιμή της περιόδου δειγματοληψίας;

Αναλογικό σήμα χαμηλής συχνότητας



Αναλογικό σήμα υψηλής συχνότητας



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

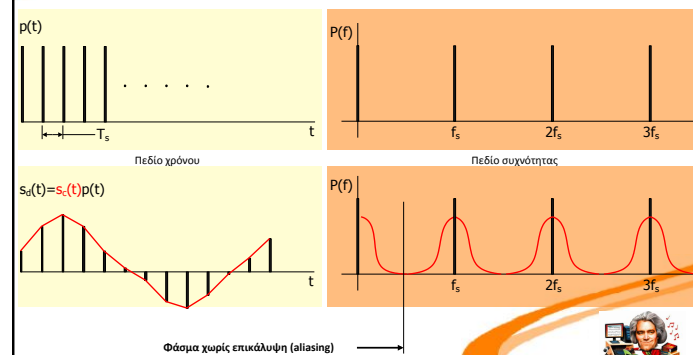
- Παράδειγμα: στο πρότυπο CD-DA
 - $f_{\max} = 22.05 \text{ kHz}$
 - $f_s = 44.1 \text{ kHz}$

Demonstration

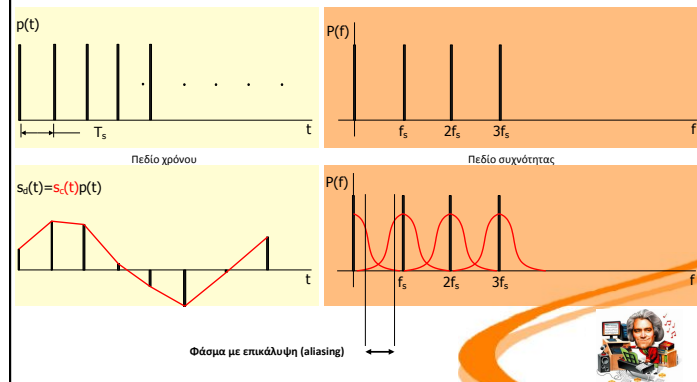
44.1kHz	22.05kHz	11.025kHz	6kHz
---------	----------	-----------	------



Δειγματοληψία: τι συμβαίνει στη συχνότητα;



Δειγματοληψία: τι συμβαίνει στη συχνότητα; (συν.)



Aliasing σε ηχητικά σήματα

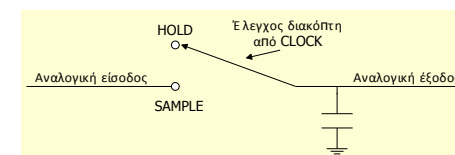
- Το αναλογικό σήμα πρέπει να είναι περιορισμένου συχνοτικού περιεχομένου (μέχρι $f_{max} = f_s/2$)
- Εάν δεν ισχύει η προηγούμενη συνθήκη, δημιουργείται φασματική επικάλυψη
- Στην πράξη, τα ηχητικά σήματα περιλαμβάνουν υψίσυχη πληροφορία σε συχνότητες $> f_{max}$
- Απαραίτητη η χρήση χαμηλοδιαβατού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

Anti-aliasing φίλτρα (συν.)

- Anti-aliasing φίλτρα υψηλής τάξης
 - Μικρή απαιτούμενη τιμή συχνότητας δειγματοληψίας
 - Μικρές απαιτήσεις μνήμης και ταχύτητας επεξεργασίας
 - Παραμορφώσεις φάσεις και μεταβατικών ακουστικών σημάτων
 - Π.χ. Ηχητική τραχύτητα
- Anti-aliasing φίλτρα χαμηλής τάξης
 - Απαιτείται χαμηλή συχνότητα αποκοπής f_c
 - Χαμηλή ποιότητα υψηλών συχνοτήτων
- Πιθανή λύση: υπερδειγματοληψία...

Υλοποίηση δειγματοληψίας

- Βαθμίδα sample and hold



- Βασικές απαιτήσεις:
 - Ρολόι CLOCK χωρίς jitter ($< 1\text{ns}$)
 - Αποφόρτωση πυκνωτή σε χρόνο μεγαλύτερο του T_s

Στοιχεία κβαντισμού ηχητικών σημάτων



Κβαντισμός - Ορισμός

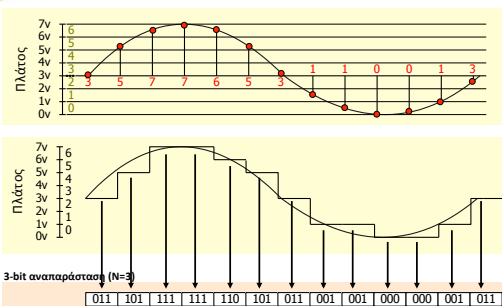
- Μετά τη δειγματοληψία, οι δυνατές τιμές πλάτους του σήματος $s_d(nT_s)$ είναι άπειρες
- Κβαντισμός: αντιστοίχιση των άπειρων τιμών σε πεπερασμένο αριθμό σταθμών
 - Μη γραμμική διαδικασία

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

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

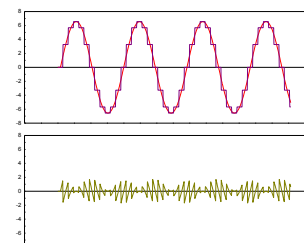


Γραφική αναπαράσταση κβαντισμού



Ο κβαντισμός ως προσθετικός θόρυβος

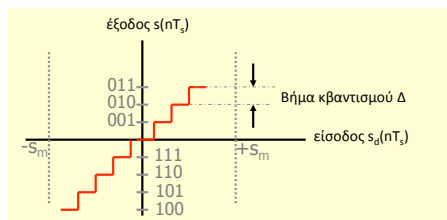
- Ο κβαντισμός είναι μια μορφή *προσθετικού θορύβου* $e(t)$ στο αναπαριστώμενο σήμα:



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



Χαρακτηριστικά κβαντιστών



$$\Delta = \frac{S_m}{2^{N-1} - 1}$$

όπου S_m η μέγιστη δυνατή τιμή πλάτους του σήματος



Κβαντισμός και δυναμική περιοχή

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

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

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



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:

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

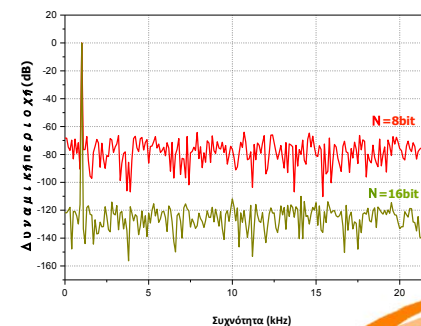
- Άρα, η απόδοση των 16-bit μετατροπών είναι οριακά αποδεκτή
- Λύση τα 24bit

Demonstration

16bit 8bit 4bit



Παράδειγμα θορύβου κβαντισμού



Demonstration

16bit 8bit



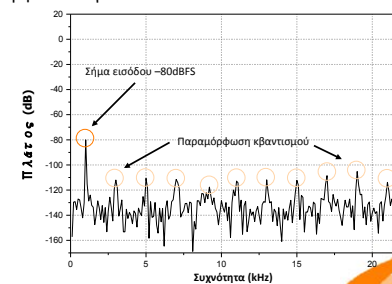
Παραμορφώσεις λόγω κβαντισμού

- Προβλήματα κβαντισμού εμφανίζονται για μικρές τιμές σήματος εισόδου
 - Ήσυχα περάσματα μουσικής
 - Στο τέλος της διάρκειας μιας μουσικής νότας
- Όσο μικραίνει το πλάτος του σήματος
 - Ο θόρυβος κβαντισμού παύει να έχει χαρακτηριστικά «λευκού θορύβου»
 - Γίνεται συσχετισμένος με το σήμα εισόδου
 - Ακουστική τραχύτητα στην χροιά των αναπαραγόμενων ήχων
- Αναγκαία η χρήση dither...



Παραμορφώσεις λόγω κβαντισμού (συν.)

- Ειδικά για πολύ μικρές τιμές πλάτους σήματος ($\sim \Delta$), το πρόβλημα των παραμορφώσεων γίνεται πολύ έντονο



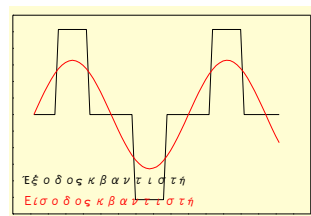
Demonstration

Sine 1kHz, -80dBFS



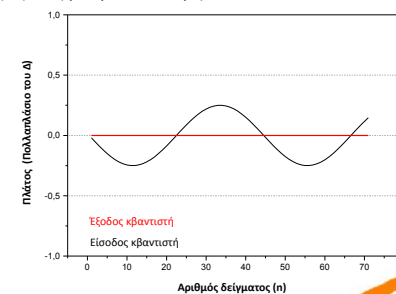
Παραμορφώσεις λόγω κβαντισμού (συν.)

- ... και στο πεδίο του χρόνου:



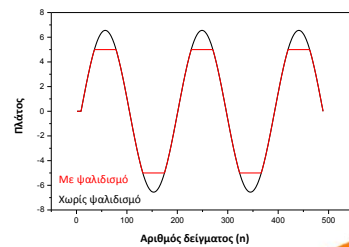
Παραμορφώσεις λόγω κβαντισμού (συν.)

- ... ενώ η έξοδος μπορεί και να μηδενιστεί:



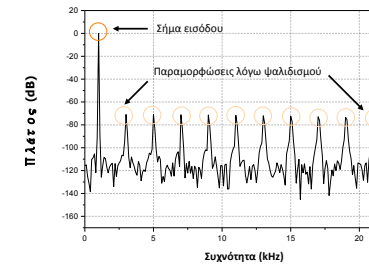
Παραμορφώσεις λόγω κβαντισμού - ψαλιδισμός

- Όταν η τιμή του σήματος εισόδου ξεπερνά την μέγιστη τιμή (στάθμη) κβαντισμού, το ψηφιακό σήμα «ψαλιδίζεται»



Παραμορφώσεις λόγω κβαντισμού – ψαλιδισμός (συν.)

- Ψαλιδισμός στο πεδίο της συχνότητας



Demonstration

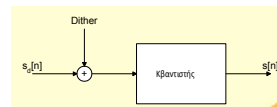
0dBFS

+3dBFS

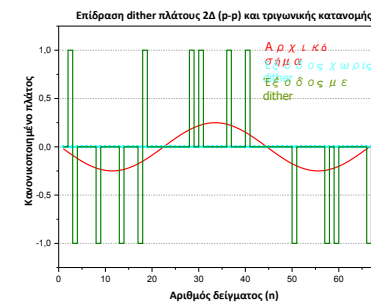


Κβαντισμός και dither

- Dither: θόρυβος μικρού πλάτους με συγκεκριμένα στατιστικά χαρακτηριστικά
 - Εφαρμόζεται προσθετικά πριν τον κβαντισμό
 - Αλλάζει τη μορφή του σφάλματος κβαντισμού, καθιστώντας το ανεξάρτητο από το σήμα εισόδου
 - Δίνει στο θόρυβο κβαντισμού χαρακτηριστικά λευκού θορύβου, ακόμα και για μικρές τιμές πλάτους του σήματος εισόδου
 - Υποκειμενική αύξηση της δυναμικής περιοχής του κβαντιστή
 - Αύξηση του επιπέδου του θορύβου κβαντισμού



Επίδραση dither στο πεδίο χρόνου



Demonstration

8bit, no dither

8bit, TPDF dither



Dither demonstration

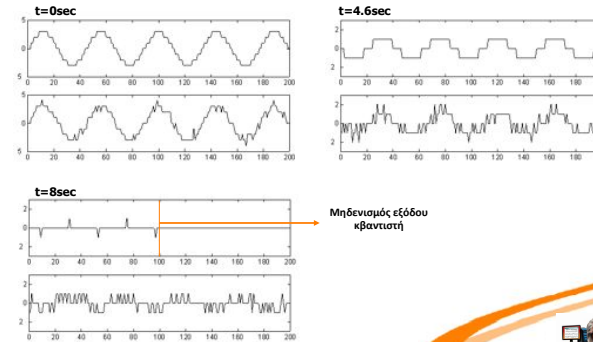
- Σήμα συχνότητας 500Hz μεταβλητού πλάτους
 - +20dB έως -20dB σε 20 δευτερόλεπτα (-2dB/sec)
 - 0dB το επίπεδο του θορύβου κβαντισμού χωρίς dither
 - @10sec, το πλάτος του σήματος ίσο με το θόρυβο κβαντισμού
 - 8bit (μόνο τα 3 χρησιμοποιούνται λόγω μικρού πλάτους), 22.05kHz

Χωρίς dither Μετά τα 10sec, έξοδος του κβαντιστή ίση με μηδέν

Με TPDF dither Αύξηση θορύβου κβαντισμού κατά 4.2dB

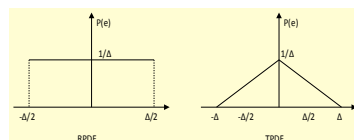


Dither demonstration (συν.)



Είδη/χαρακτηριστικά dither

- Κριτήριο η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF)
 - Ομοιόμορφη (rectangular) κατανομή (RPDF)
 - Τριγωνική (triangular) κατανομή (TPDF)
- Βέλτιστη λύση το TPDF dither με πλάτος 2Δ p-p
 - Αύξηση του θορύβου κβαντισμού κατά 6dB



Demonstration

RPDF dither

TPDF dither

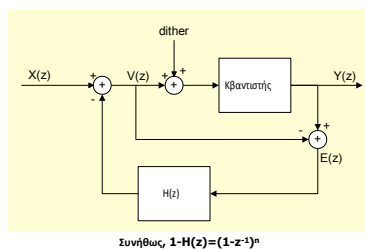


Μορφοποίηση θορύβου κβαντισμού

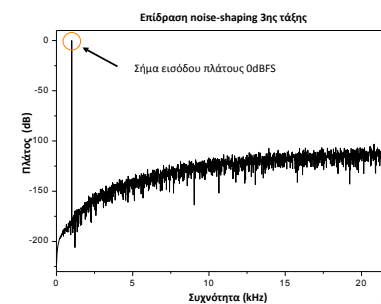
- Η «ακουστότητα» του θορύβου κβαντισμού αυξάνει με τη συχνότητα
 - Μεταβλητή ευαισθησία ανθρώπινου ακουστικού οργάνου
 - Κάτω από τα 4kHz, ο θόρυβος κβαντισμού είναι ιδιαίτερα ακουστός
- Μορφοποίηση θορύβου κβαντισμού (noise-shaping)
 - Χρήση ψηφιακών φίλτρων ως κλάδοι ανατροφοδότησης του κβαντιστή
 - Συντελεστές φίλτρου συνήθως ακέραιοι
 - Μικρό υπολογιστικό φορτίο
 - Φίλτρα με δεκαδικούς συντελεστές
 - Μεγάλο υπολογιστικό φορτίο
 - Μορφοποίηση σύμφωνα με το ελάχιστο κατώφλι ακοής



Τοπολογία μορφοποίησης θορύβου



Noise-shaping demonstration



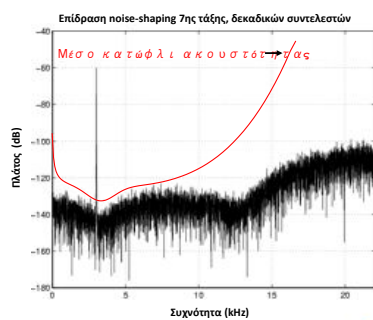
Demonstration (8bit, 22.05kHz, TPDF dither)

Dithered

NS + Dither



Noise-shaping demonstration (συν.)



Στοιχεία υπερδειγματοληψίας ηχητικών σημάτων



Τι είναι υπερδειγματοληψία;

- Αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας κατά R φορές
 - xR υπερδειγματοληψία
- Χρήση τόσο στην Α/Ψ όσο και στην Ψ/Α μετατροπή
 - Ελάττωση παραμορφώσεων από το antialiasing φίλτρο εισόδου/εξόδου
 - Μείωση επιπέδου θορύβου κβαντισμού
 - Δυνατότητα ελάττωσης τάξης κβαντιστή χωρίς μείωση του SNR
 - 1-bit κβαντισμός με x64 υπερδειγματοληψία
 - Ευκολότερη κατασκευή και ρύθμιση μετατροπών Α/Ψ και Ψ/Α

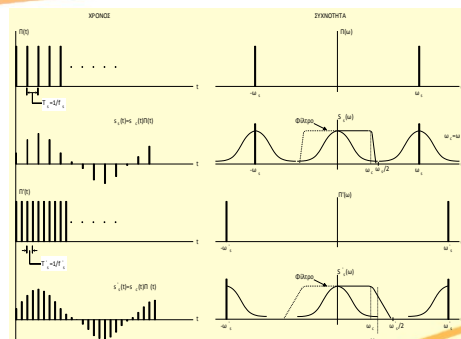


Η επίδραση της υπερδειγματοληψίας

- Κατά την xR υπερδειγματοληψία
 - $f'_s = R f_s$
 - $f'_{\max} = R f_{\max}$
- Χρήση ομαλότερων φίλτρων λόγω αύξησης του $f'_{\max}$
 - Μικρότερες παραμορφώσεις σε μεταβατικά και φάση
- Ο θόρυβος κβαντισμού «απλώνεται» σε μεγαλύτερη φασματική περιοχή
 - Μείωση επιπέδου θορύβου κβαντισμού
 - Για x4 υπερδειγματοληψία, πτώση θορύβου κατά -6dB
 - Διπλασιασμός του R μειώνει το θόρυβο κατά περίπου -3dB
 - Μεγαλύτερη μείωση με χρήση noise-shaping τεχνικών



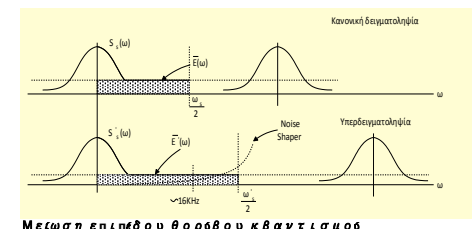
Υπερδειγματοληψία και antialiasing φίλτρο



Μικρότερες απαιτήσεις antialiasing φίλτρου



Υπερδειγματοληψία και θόρυβος κβαντισμού



Demonstration

8bit, R=1, 44.1kHz

8bit, R=2, 44.1kHz



Υπερδειγματοληψία και τάξη κβαντιστή

- Η μείωση του επιπέδου θορύβου κβαντισμού αυξάνει το SNR
 - Άρα και την τάξη του κβαντιστή (ευκρίνεια κβαντισμού)
- Έστω N-bit κβαντιστής με N'-bit ισοδύναμη τάξη για xR υπερδειγματοληψία
- Θεωρώντας σταθερή ποιότητα αναπαραγωγής, αποδεικνύεται ότι $N' < N$
- Γενικά ισχύει:

$$N - N' = \Delta N = 0.5 \log_2 R$$

- Δηλαδή διπλασιασμός του R ισοδυναμεί με κέρδος «μισού» bit
- Με χρήση noise-shaping, το κέρδος αυτό είναι ακόμα μεγαλύτερο
 - Με R=128 και φίλτρο NS 2ης τάξης, 1-bit κβαντιστής είναι ισοδύναμος με 16bit



Παράδειγμα υπερδειγματοληψίας x4

