



ΒΕΣ 04 - Συμπίεση και Μετάδοση Πολυμέσων



Ψηφιακή Αναπαράσταση Σήματος: Δειγματοληψία, Κβαντισμός και Κωδικοποίηση

- ★ Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Βασικές έννοιες επεξεργασίας σημάτων



◇ Τι είναι Σήμα;

- ◇ Πληροφορίες που αντιλαμβανόμαστε μέσω των αισθήσεων μας και μπορούν να περιγραφούν ως μια ή περισσότερες φυσικές μεταβλητές η τιμή των οποίων είναι μια συνάρτηση του χρόνου (και / ή του χώρου)

◇ Παράδειγμα:

- ◇ **Ηχητικό Σήμα:** Ο ήχος παράγεται από ταλάντωση στοιχείων (χορδής, στήλης αέρα, μεμβράνης) που συμπιέζουν τον περιβάλλον αέρα. Ο αέρας μεταφέρει τις διαταραχές ως κύμα.

◇ Παραδείγματα Σημάτων:

- ◇ Ανθρώπινος λόγος, μουσική, εικόνες, βίντεο

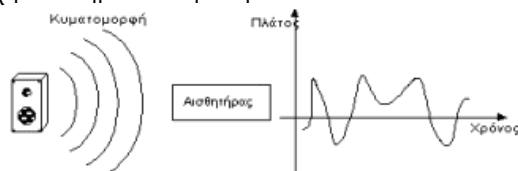
- ★ Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Αναπαράσταση Φυσικών Σημάτων



Μορφές και Αναπαραστάσεις Σημάτων

- ◇ Ηλεκτρικά σήματα, οπτικά σήματα, ακουστικά σήματα, μαγνητικά σήματα
- ◇ Τι είναι σύστημα;
- ◇ Υπολογιστικά περιβάλλοντα με τα οποία μπορούμε να χειριστούμε να μεταβάλλουμε, να καταγράψουμε ή να μεταδώσουμε σήματα.
- ◇ Παραδείγματα Συστημάτων:
- ◇ Το μικρόφωνο είναι ένα απλό σύστημα (αισθητήρας) το οποίο μετατρέπει τα ηχητικά σήματα σε ηλεκτρικά



© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- ★ Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Αναπαράσταση Φυσικών Σημάτων (II)



Μορφές και Αναπαραστάσεις Σημάτων

- ◇ Ένας αναγνώστης οπτικών δίσκων (CD player) αποτελεί ένα σύστημα με το οποίο μετατρέπουμε την ακολουθία αριθμών που έχει αποθηκευτεί σε ένα οπτικό δίσκο (δηλ. την αριθμητική αναπαράσταση ενός σήματος) σε ένα ακουστικό σήμα.
- ◇ Μονοδιάστατα και Πολυδιάστατα σήματα
- ◇ Μονοδιάστατα είναι τα σήματα που περιγράφονται μαθηματικά ως μια συνάρτηση μίας ανεξάρτητης μεταβλητής (πχ. ένα ηχητικό σήμα είναι μια μεταβολή της πίεσης του αέρα ως συνάρτηση του χρόνου)
- ◇ Διοδιάστατα σήματα:
 - ◇ Εικόνα: μεταβολή της φωτεινότητας ή του χρώματος ως συνάρτηση της θέσης (x,y)
- ◇ Τριοδιάστατα σήματα:
 - ◇ Βίντεο: μεταβολή της φωτεινότητας ή του χρώματος ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου (x,y,t)

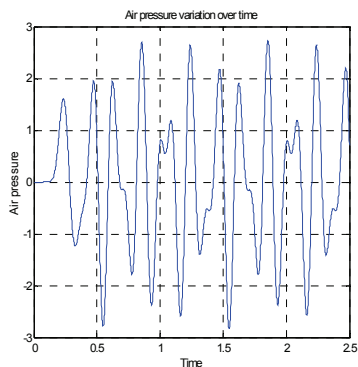
© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- ★ Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Συνεχή (αναλογικά) Σήματα



- ◇ Η πληροφορία που συλλέγεται από τα ανθρώπινα αισθητήρια όργανα είναι αναλογική, δηλαδή το σήμα που περιγράφει το φυσικό μέγεθος μεταβάλλεται ανάλογα με τον τρόπο που μεταβάλλεται και το φυσικό μέγεθος. Αναπαριστά αυτό το μέγεθος και παρακολουθεί τις όποιες μεταβολές του μέσα από μια σχέση αναλογίας.



- ◇ Στη γλώσσα των μαθηματικών λέμε ότι η συνάρτηση που περιγράφει το καταγραφόμενο μέγεθος είναι συνεχής συνάρτηση

Συνεχή Σήματα:

- ◇ Ένα σήμα για το οποίο για κάθε τιμή της ανεξάρτητης (ή των ανεξάρτητων) μεταβλητής μπορεί να υπολογιστεί μια τιμή του σήματος ονομάζεται συνεχές σήμα

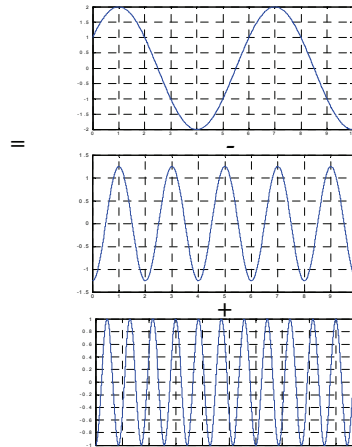
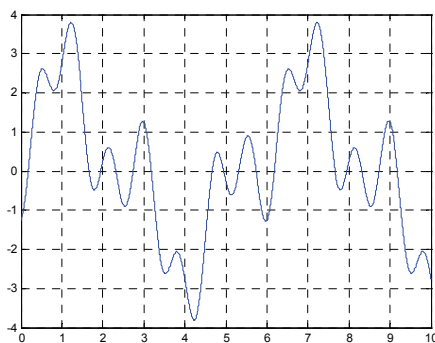
© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- ★ Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Τα σήματα ως άθροισμα ημιτονικών συναρτήσεων



- ◇ Κάθε συνεχές σήμα αναλύεται σε ένα άθροισμα ημιτονικών συναρτήσεων με διάφορα πλάτη, συχνότητες και φάσεις.



© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

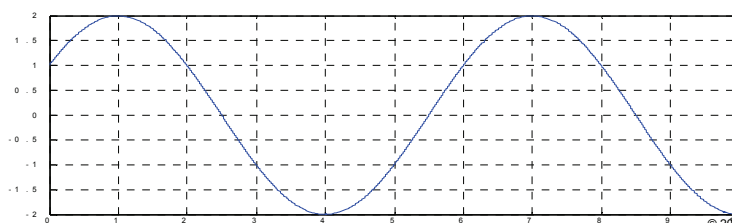
- ★ Βασικές έννοιες
- ☐ Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- ☐ Δειγματοληψία
- ☐ Θεώρημα Nyquist
- ☐ Κβαντισμός
- ☐ Κωδικοποίηση
- ☐ Παραδείγματα

Τα σήματα ως άθροισμα ημιτονικών συναρτήσεων (II)



Χαρακτηριστικά Ημιτονικών Συναρτήσεων:

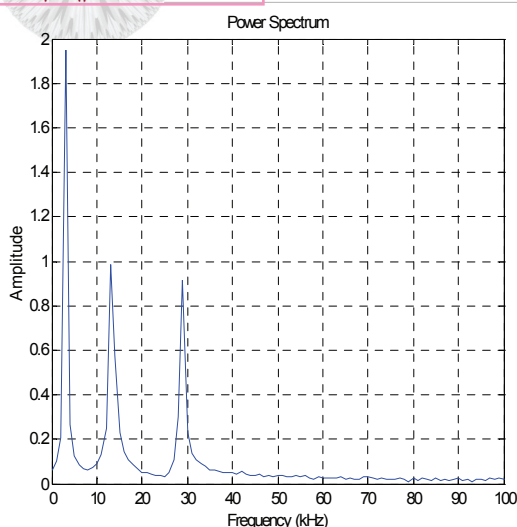
- ◇ Συχνότητα (frequency)
 - ◇ Η αντίστροφη τιμή της περιόδου του ημιτονικού σήματος
 - ◇ Δηλώνει τον αριθμό των περιόδων ανά sec και μετρείται σε Hz
- ◇ Πλάτος (amplitude)
 - ◇ Η μέγιστη απομάκρυνση του σήματος από τη θέση ισορροπίας
- ◇ Φάση
 - ◇ Η γωνία που αντιστοιχεί στη αρχική τιμή του ημιτονικού σήματος



© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- ★ Βασικές έννοιες
- ☐ Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- ☐ Δειγματοληψία
- ☐ Θεώρημα Nyquist
- ☐ Κβαντισμός
- ☐ Κωδικοποίηση
- ☐ Παραδείγματα

Φάσμα Συχνοτήτων Σήματος



Χρησιμοποιώντας την ανάλυση κάθε σήματος σε άθροισμα ημιτονικών συναρτήσεων μπορούμε να περιγράψουμε κάθε σήμα με ένα διάγραμμα που απεικονίζει το πλάτος των συχνοτήτων από τις οποίες αποτελείται.

Η αναπαράσταση αυτή αποτελεί το φάσμα συχνοτήτων (frequency spectrum) για το συγκεκριμένο σήμα.

© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων



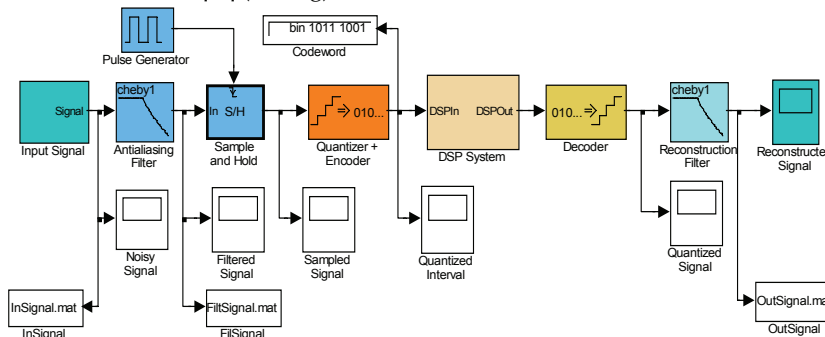
- ◇ Το πέρασμα από τον αναλογικό στον ψηφιακό κόσμο είναι η διαδικασία της ψηφιοποίησης (digitization).
 - ◇ Κατά την ψηφιοποίηση ένα σήμα αναλογικής μορφής μετατρέπεται σε ψηφιακό (συνήθως δυαδικό), δηλ. από συνεχή συνάρτηση του χρόνου μετατρέπεται σε μια σειρά διακριτών αριθμητικών τιμών.
- ◇ Στους Η/Υ η αναπαράσταση της κάθε πληροφορίας γίνεται σε δυαδική μορφή. Η δυαδική κωδικοποίηση χρησιμοποιεί δύο τιμές 1 και 0 οι οποίες αντιστοιχούν στις καταστάσεις θετικό και μη θετικό. Έτσι κάθε πληροφορία αποθηκεύεται σαν μια ακολουθία από 0 και 1.
- ◇ Για να μπορέσουμε να αποθηκεύσουμε και να επεξεργαστούμε συνεχή σήματα στον Η/Υ πρέπει επομένως να τα μετατρέψουμε σε ακολουθίες αριθμών μέσω της ψηφιοποίησης

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων (II)

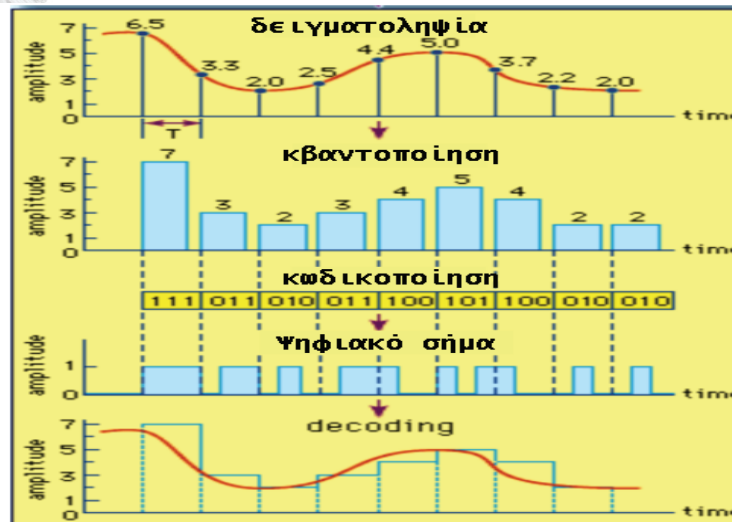


- ◇ Η ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:
 - ◇ Δειγματοληψία (sampling),
 - ◇ Κβαντισμός (quantization) και
 - ◇ Κωδικοποίηση (coding).



- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων κατά PCM



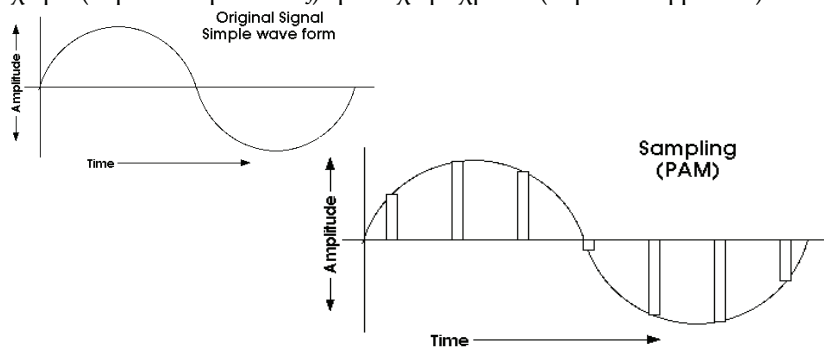
© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Δειγματοληψία



Η διαδικασία με την οποία παράγουμε ένα διακριτό από ένα συνεχές σήμα ονομάζεται δειγματοληψία (sampling) και προκύπτει από την καταγραφή των τιμών του συνεχούς σήματος σε μια σειρά από διακριτά και ισαπέχοντα σημεία στο χρόνο (περίπτωση ήχου), στο χώρο (περίπτωση εικόνας) ή στο χωροχρόνο (περίπτωση βίντεο).



© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

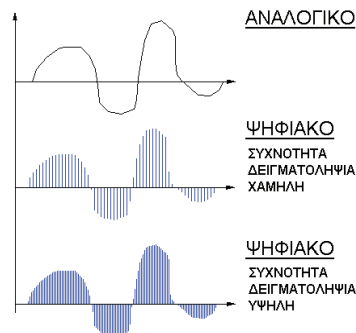
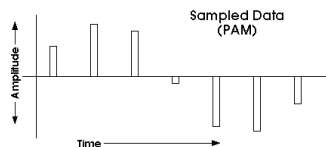
Δειγματοληψία (II)



- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

◇ Με τη δειγματοληψία το σήμα μετασχηματίζεται σε μια σειρά δειγμάτων (samples). Η μορφή αυτή του σήματος είναι γνωστή και ως PAM (Pulse Amplitude Modulation).

◇ Σημειώνεται ότι το πλάτος των δειγμάτων (η αριθμητική τους τιμή δεν υπόκειται σε κανένα περιορισμό)



◇ Συχνότητα δειγματοληψίας: Ρυθμός καταγραφής των δειγμάτων

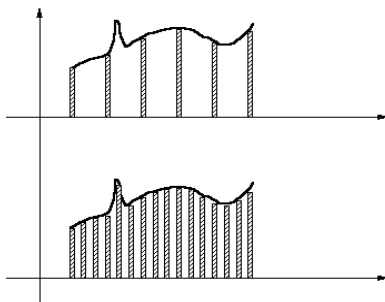
◇ Μετριέται σε δείγματα ανά δευτερόλεπτο (ή Hz)

Πιστότητα καταγραφής αναλογικού σήματος



- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

◇ Πόσο καλή μπορεί να είναι η προσέγγιση του αρχικού αναλογικού σήματος από το σήμα διακριτού χρόνου (δειγματοληπτημένο);



Στην περίπτωση χαμηλής συχνότητας δειγματοληψίας ο υψίσυχνος παλμός δεν καταγράφεται και η πληροφορία που μεταφέρει «χάνεται» αφού η διάρκειά του είναι μικρότερη από την περίοδο λήψης δειγμάτων.

Το πρόβλημα διορθώνεται αν αυξήσουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας.

◇ Η τιμή της συχνότητας δειγματοληψίας πρέπει να ικανοποιεί δύο αντικρουόμενες απαιτήσεις:

- ◇ ποιότητα ψηφιοποίησης (υψηλή συχνότητα),
- ◇ μικρό μέγεθος ψηφιακού αρχείου (χαμηλή συχνότητα).

Θεώρημα Nyquist



- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

- ◇ Τελικά πόσα δείγματα πρέπει να παίρνουμε κατά τη διακριτοποίηση ενός σήματος;
- ◇ Η απάντηση στο συγκεκριμένο ερώτημα δίνεται από ένα από τα θεμελιώδη θεωρήματα της επεξεργασίας σήματος, το θεώρημα του Nyquist, το οποίο αποδεικνύει ότι:
 - ◇ Ένα συνεχές στο χρόνο σήμα $x(t)$ που περιέχει συχνότητες όχι μεγαλύτερες από f_{max} μπορεί να ανακατασκευαστεί ακριβώς από τα δείγματα του $x[n] = x[nT_s]$, αν τα δείγματα αυτά έχουν ληφθεί με συχνότητα $f_s = 1/T_s$ που είναι μεγαλύτερη από $2f_{max}$.
 - ◇ Η $f_N = 2f_{max}$ ονομάζεται συχνότητα Nyquist
- ◇ Η συχνότητα f_{max} είναι στην ουσία η συχνότητα εκείνη πάνω από την οποία η ενέργεια του σήματος είναι πρακτικά μηδέν. Η f_{max} αναφέρεται συνήθως και ως συχνότητα αποκοπής (cutoff frequency).

Θεώρημα Nyquist (II)



- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

- ◇ Τι μας λέει το θεώρημα δειγματοληψίας:
 - ◇ Το θεώρημα καθορίζει μια ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας (την f_N) κάτω από την οποία η ακριβής ανακατασκευή του αναλογικού σήματος δεν είναι δυνατή.
 - ◇ Δηλαδή πόσα δείγματα;
 - ◇ Τουλάχιστον $2f_{max}$ δείγματα ανά δευτερόλεπτο (f_{max} σε Hz).
- ◇ Παράδειγμα:
 - ◇ Υπάρχουν πάρα πολλές εφαρμογές του θεωρήματος του Nyquist. Οι μουσικοί οπτικοί δίσκοι (Audio CD-ROM) χρησιμοποιούν συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 44.1KHz (44100 δείγματα ανά δευτερόλεπτο) για την αποθήκευση του ηχητικού σήματος.
 - ◇ Η συγκεκριμένη συχνότητα είναι ελαφρά μεγαλύτερη από 2 φορές τη συχνότητα των 20 KHz που κατά γενική παραδοχή αποτελεί το άνω όριο για τις συχνότητες που γίνονται αντιληπτές από το ανθρώπινο αυτί. Με ένα τέτοιο ρυθμό δειγματοληψίας διασφαλίζεται ότι όλες οι συχνότητες που είναι μικρότερες ή ίσες με 20 kHz θα αποδοθούν σωστά στο διακριτό σήμα.

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- ★ Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Συχνότητα Δειγματοληψίας



- ◇ Δειγματοληψία με συχνότητα χαμηλότερη από τη συχνότητα Nyquist παραμορφώνει το σήμα:
 - ◇ Χάνει τις υψηλότερες συχνότητες που τυχόν δεν καλύπτει η επιλεγμένη συχνότητα δειγματοληψίας f_s
 - ◇ Δημιουργεί συχνότητες οι οποίες δεν υπήρχαν στο αρχικό σήμα (το φαινόμενο ονομάζεται **αναδιπλωση** ή αλίαση "aliasing").
- ◇ Συχνότητα δειγματοληψίας f_s υψηλότερη από τη συχνότητα Nyquist f_N αποτελεί σπατάλη αποθηκευτικού χώρου καθώς δημιουργεί πρόσθετα δείγματα χωρίς αυτά να είναι απαραίτητα.
- ◇ Στην πράξη επιλέγεται πάντα συχνότητα λίγο υψηλότερη από τη συχνότητα Nyquist.

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- ★ Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Φαινόμενο Αναδιπλωσης



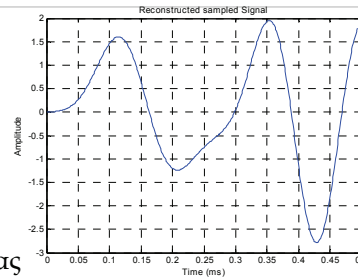
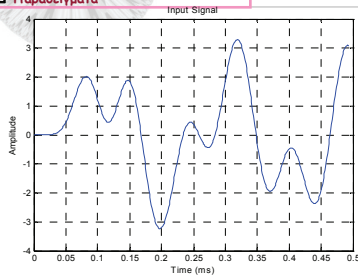
- ◇ Όταν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μικρότερη της συχνότητας Nyquist ($f_s < f_N$) τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της αναδιπλωσης (aliasing ή foldover) για τις συχνότητες που περιέχονται στο σήμα και είναι μεγαλύτερες από το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας.
 - ◇ Πιο συγκεκριμένα, αν f_o είναι η συχνότητα ενός σήματος το οποίο θέλουμε να δειγματοληψήσουμε και για την οποία ισχύει ότι:

$$f_s/2 < f_o < f_s$$
 τότε το συγκεκριμένο σήμα θα εμφανιστεί μετά τη δειγματοληψία με συχνότητα:

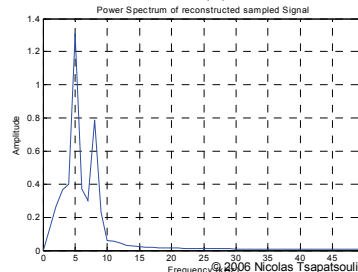
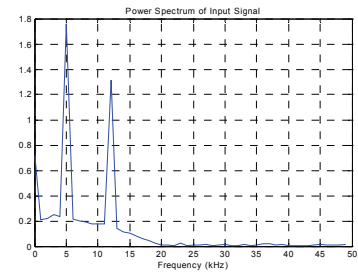
$$f_1 = f_s - f_o$$
 - ◇ **Παράδειγμα**
 - ◇ Αν ψηφιοποιήσουμε ένα σήμα συχνότητας $f_o = 30 \text{ KHz}$ με συχνότητα δειγματοληψίας $f_s = 50 \text{ kHz}$ τότε θα έχουμε αναδιπλωση και το σήμα εξόδου θα έχει συχνότητα $f_1 = 50 - 30 = 20 \text{ kHz}$.

Φαινόμενο Αναδίπλωσης (II)

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- ★ Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα



Συχνότητα
δειγματοληψίας
 $f_s = 20 \text{ kHz}$

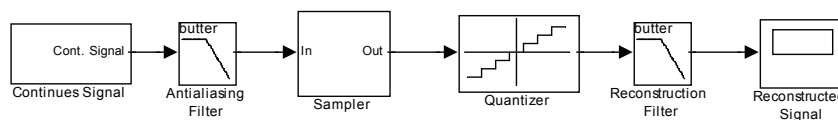


Αντιαναδιπλωτικά Φίλτρα

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- ★ Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα



- ◇ Τι γίνεται όταν δεν ξέρουμε τη μέγιστη συχνότητα του σήματος που θέλουμε να δειγματοληψήσουμε;
 - ◇ Χρησιμοποιούμε φίλτρα (τα οποία έχουν την ονομασία **αντιαναδιπλωτικά φίλτρα - antialiasing filters**) για να αποκόψουμε τις υψηλές συχνότητες που δεν μας ενδιαφέρουν.
 - ◇ Παράδειγμα:
 - ◇ Στην ISDN τηλεφωνία αποκόπτονται όλες οι συχνότητες της φωνής πάνω από 3.4 kHz (με χρήση ενός αντιαναδιπλωτικού φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_c = 3.4 \text{ kHz}$) ώστε να μπορούμε να διακριτοποιήσουμε το σήμα φωνής με 8000 δειγμάτα / δευτερόλεπτο



- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- * Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Κβαντισμός



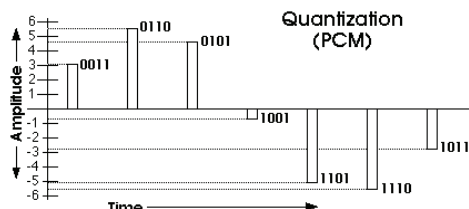
- ◊ Ένα συνεχές σήμα, όπως η φωνή, έχει συνεχές πεδίο τιμών πλάτους και συνεπώς τα δείγματά του έχουν συνεχές πεδίο τιμών πλάτους. Με άλλα λόγια μέσα στο πεπερασμένο πεδίο τιμών του σήματος βρίσκουμε έναν άπειρο αριθμό σταθμών πλάτους.
- ◊ Η δειγματοληψία δημιουργεί διακριτοποίηση του σήματος στο χρόνο (ή χώρο για την περίπτωση εικόνων ή χωροχρόνο για περίπτωση video). Οι τιμές των δειγμάτων (πλάτος σήματος) όμως μπορούν να είναι οποιεσδήποτε. Πως μπορούμε να αναπαραστήσουμε τις τιμές αυτές στον υπολογιστή;
- ◊ Χρειαζόμαστε και διακριτοποίηση των τιμών πλάτους (προσέγγιση των πραγματικών τιμών με κάποιες προκαθορισμένες)
- ◊ Η διακριτοποίηση των τιμών πλάτους του σήματος (δειγμάτων) ονομάζεται κβαντισμός.

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- * Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Κβαντισμός (II)



- ◊ Κατά τη διαδικασία του κβαντισμού, επομένως, σε κάθε δείγμα πρέπει να εκχωρηθεί μία τιμή από αυτές που διαθέτει και επιτρέπει η χρησιμοποιούμενη κλίμακα.
- ◊ Για να γίνει αυτό υποδιαιρείται το εύρος τιμών του συνεχούς σήματος σε συγκεκριμένα επίπεδα και σε κάθε τέτοιο επίπεδο εκχωρείται ένας ψηφιακός κωδικός από τους διαθέσιμους της κλίμακας
- ◊ Κάθε δείγμα παίρνει εκείνη την ψηφιακή τιμή πλησιέστερα στην οποία βρίσκεται η αρχική του τιμή, δηλ. στρογγυλοποιείται στον κοντινότερο διαθέσιμο κωδικό.



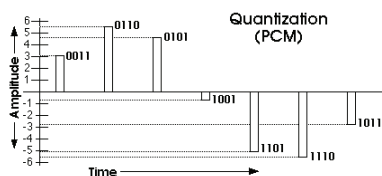
- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- * Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Κβαντισμός (III)



- ◇ Έστω ότι έχουμε ένα σήμα για το οποίο γνωρίζουμε ότι η μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να πάρει είναι V_{max} και η ελάχιστη V_{min} . Ποιες τιμές του σήματος θα πρέπει να κωδικοποιούμε (στάθμες) αν έχουμε διαθέσιμα n bits για την κωδικοποίηση κάθε δείγματος;
- ◇ Διάστημα (βήμα) Κβαντισμού:
 - ◇ Διαχωρισμός του εύρους του σήματος σε διαστήματα
 - ◇ Κάθε διάστημα έχει εύρος: $q = (V_{max} - V_{min}) / 2^n$
 - ◇ Ποιες τιμές θα αναπαριστάνονται;

Οι τιμές στο μέσο των διαστημάτων κβαντοποίησης



© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- * Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Μέγεθος Δείγματος



- ◇ Το πλήθος των διαθέσιμων τιμών (σταθμών) οι οποίες μπορούν να ανατεθούν στη τιμή ενός δείγματος εξαρτάται από το πλήθος ψηφίων του κωδικού (codeword) n που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των τιμών αυτών.
- ◇ Το μέγεθος αυτό (n) χαρακτηρίζεται ως «μέγεθος δείγματος» (sampling size).
 - ◇ Πλήθος σταθμών κωδικοποίησης = 2^n
- ◇ Αφού κάθε δείγμα παριστάνεται και αποθηκεύεται με χρήση ενός τέτοιου κωδικού το μέγεθος δείγματος δείχνει ταυτόχρονα και το ποσό της μνήμης που απαιτείται για την ψηφιακή αποθήκευση του κάθε δείγματος.
- ◇ Αν για παράδειγμα χρησιμοποιήσουμε μήκος λέξης 16 bit τότε κάθε δείγμα του ψηφιοποιημένου σήματος θα καταλαμβάνει 2 bytes μνήμης

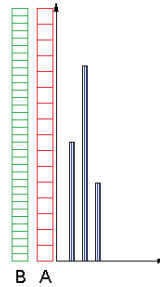
© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- ★ Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Σφάλμα Κβαντισμού



- ◇ Μέγεθος δείγματος:
 - ◇ 1 bit => 2 επίπεδα κβάντωσης
 - ◇ 2 bit => 4 επ.
 - ◇ 4 bit => 16 επ. , κοκ.
 - ◇ n bit => 2^n
- ◇ Χαρακτηριστικές τιμές
 - ◇ 8 bit => 256 στάθμες κβάντωσης
 - ◇ 16 bit => 65536 στάθμες
- ◇ «Σφάλμα κβαντισμού» (quantization error) είναι η διαφορά της πραγματικής τιμής του δείγματος από την τιμή που τελικά κωδικοποιείται:
 - ◇ Η διαφορά αυτή εισάγει παραμόρφωση στο κβαντισμένο σήμα. Η παραμόρφωση αυτή είναι τόσο πιο μικρή όσο περισσότερες στάθμες κβαντισμού υπάρχουν



© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

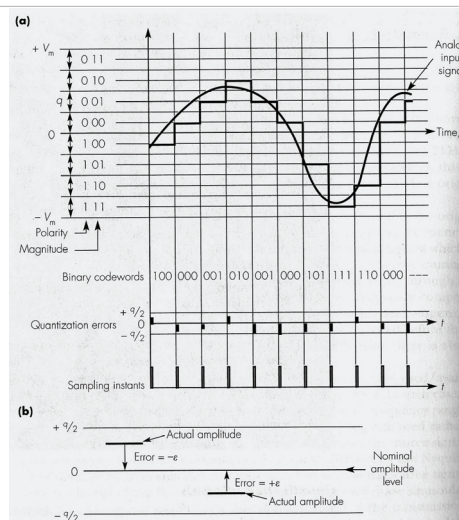
- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- ★ Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Σφάλμα Κβαντισμού (II)



- ◇ Πόσο είναι το μέγιστο σφάλμα κβαντισμού στη περίπτωση του κατωτέρω παραδείγματος?
 - ◇ Αν κωδικοποιήσουμε το μέσο των διαστημάτων κβαντισμού τότε το μέγιστο σφάλμα κβαντισμού είναι:

$$e = q/2 = (V_{max} - V_{min}) / 2^{n+1}$$



© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- * Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Το σφάλμα κβαντισμού ως Σηματοθορυβικός λόγος



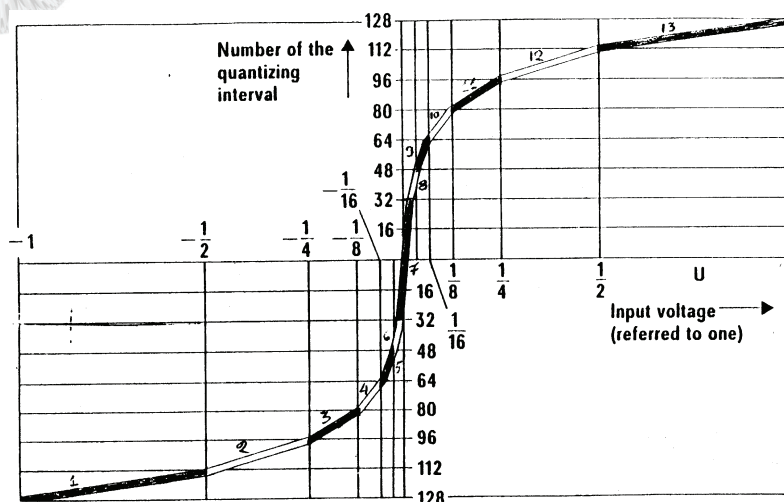
- ◇ Σηματοθορυβικό λόγο ονομάζουμε το λόγο της τιμής του σήματος προς τη τιμή των ανεπιθύμητων παρεμβολών που επενεργούν στο σήμα (θόρυβος).
- ◇ Το σφάλμα κβαντισμού θεωρείται μια τέτοια παρεμβολή
- ◇ Ο σηματοθορυβικός λόγος εκφράζεται συνήθως σε db (decibel)

$$SNR = 20\log_{10}(\text{Πλάτος Σήματος} / \text{Πλάτος Θορύβου})$$
- ◇ Το πλάτος ποιου δείγματος θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό του σηματοθορυβικού λόγου?
- ◇ Αν χρησιμοποιήσουμε τη μέγιστη τιμή του σήματος και τη μέγιστη τιμή του θορύβου τότε έχουμε το λόγο PSNR (Peak Signal to Noise Ratio):

$$PSNR = 20\log_{10}(V_{\max} / e_{\max})$$

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- * Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Μη ομοιόμορφοι κβαντιστές



Κωδικοποίηση



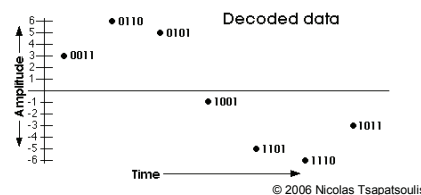
- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

- ◊ Κωδικοποίηση ονομάζουμε την αναπαράσταση των κβαντισμένων τιμών πλάτους των δειγμάτων του σήματος σε δυαδική ακολουθία (ακολουθία δυαδικών ψηφίων). Δημιουργείται έτσι το τελικό ψηφιακό σήμα σαν μια σειρά bits.
- ◊ Ο κώδικας κάθε τιμής στάθμης ονομάζεται **κωδική λέξη (codeword)**
- ◊ Το σύνολο των διαφορετικών κωδικών λέξεων που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση ονομάζεται **κώδικας**
- ◊ Όταν το σύνολο των κωδικών λέξεων έχει το ίδιο μέγεθος (αριθμό bits) τότε ο κώδικας ονομάζεται **κώδικας σταθερού μήκους**.

Storage & Transmission
(digital)

0011011001011001110111101011

Time →

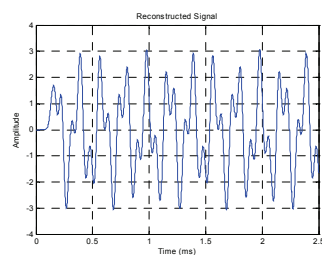
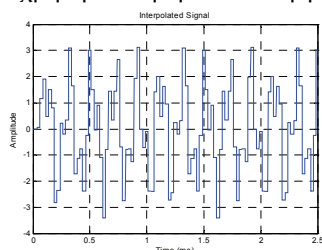


Αναδημιουργία (reconstruction)



- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

- ◊ Η δημιουργία (στο δέκτη) του συνεχούς σήματος από τα δειγματα του γίνεται με τεχνικές παρεμβολής (interpolation) ώστε να δημιουργηθούν περισσότερες ενδιάμεσες τιμές και βαθυπερατό φιλτράρισμα μέσω ενός φίλτρου ανακατασκευής. Το αρχικό αναλογικό σήμα ανακτάται έτσι κατά μεγάλη προσέγγιση
- ◊ Η ποιότητα του αναπαραγόμενου σήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος δείγματος και τη συχνότητα δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε κατά τη ψηφιοποίηση.



- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Ρυθμός μετάδοσης ψηφιακών δεδομένων (Bit rate)



- ◇ Ένα σήμα στο οποίο έχει γίνει δειγματοληψία, κβαντοποίηση και κωδικοποίηση αποκαλείται μερικές φορές και «σήμα PCM» (Pulse Code Modulation ή σήμα παλμοκωδικά διαμορφωμένο).
 - ◇ Αν η συχνότητα δειγματοληψίας ενός τέτοιου σήματος είναι f_s δείγματα το δευτερόλεπτο και το μέγεθος δείγματος n bit ανά δείγμα, τότε ως «ρυθμός μετάδοσης ψηφιακών δεδομένων» (bit rate) ορίζεται το γινόμενο $f_s \times n$ και μετριέται σε bps (bits per second ή bits ανά δευτερόλεπτο).
- ◇ Παράδειγμα
 - ◇ Στις τηλεφωνικές επικοινωνίες: Δειγματοληψία: 8000 δείγματα /sec (8 kHz), Κβαντοποίηση: 256 επίπεδα => Κωδικοποίηση: 8bits/δείγμα και το bit rate που προκύπτει είναι: $8000 \times 8 = 64000$ bits/sec = 64 kbps.
 - ◇ Αυτή η τιμή χαρακτηρίζεται ως DS0 (Digital Service επιπέδου μηδέν) και είναι το βασικό bit rate στα περισσότερα συστήματα ψηφιακής μετάδοσης που συνήθως μεταδίδουν πολλαπλάσια του DS0, δηλ. πολλαπλάσια των 64 kbps.

© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- Παραδείγματα

Ψηφιακή πληροφορία: πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα



- ◇ Πλεονεκτήματα:
 - ◇ μικρότερη ευαισθησία στο θόρυβο
 - ◇ υψηλός βαθμός ολοκλήρωσης (integration)
 - ◇ Ο όρος «ολοκλήρωση» αναφέρεται στην τεχνολογική δυνατότητα να διαχειρίζεται με τον ίδιο τρόπο οποιαδήποτε ψηφιακή πληροφορία ανεξάρτητα από το τι αυτή παριστάνει (κείμενα, εικόνες, video, ήχο, κλπ)
 - ◇ Ο αντίλογος για την ολοκλήρωση: Σε πολλές περιπτώσεις οι δυνατότητες τεχνολογικής ολοκλήρωσης δεν φαίνονται να έχουν ανταπόκριση στο αγοραστικό κοινό,
 - ◇ Εύκολη υλοποίηση μεθόδων εντοπισμού και διόρθωσης λαθών, συμπύεσης και κρυπτογράφησης της πληροφορίας
- ◇ Μειονεκτήματα
 - ◇ Πιστότητα στην καταγραφή της πληροφορίας
 - ◇ Η δημιουργία ψηφιακής πληροφορίας ισορροπεί ανάμεσα στην απαίτηση για υψηλή ποιότητα αλλά και μικρό μέγεθος αρχείων

© 2006 Nicolas Tsapatsoulis

Παραδείγματα



- Βασικές έννοιες
- Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων
- Δειγματοληψία
- Θεώρημα Nyquist
- Κβαντισμός
- Κωδικοποίηση
- ★ Παραδείγματα

- ◇ Να υπολογιστεί η συχνότητα δειγματοληψίας και η συχνότητα αποκοπής του αντιαναδιπλωτικού φίλτρου ενός συνεχούς σήματος με ελάχιστη συχνότητα 15Hz και μέγιστη 10kHz υποθέτοντας ότι το ψηφιοποιημένο σήμα θα:
 - ◇ Αποθηκευτεί στο σκληρό δίσκο ενός υπολογιστή
 - ◇ Μεταδοθεί μέσω ενός χάλκινου καλωδίου το οποίο παραμορφώνει συχνότητες μεγαλύτερες των 3.4 kHz.
- ◇ Ένα αναλογικό, συνεχές σήμα λαμβάνει μόνο θετικές τιμές από $V_{min} = 0.5$ έως $V_{max} = 32.5$. Υπολογίστε τον ελάχιστο και μέγιστο σηματοθορυβικό λόγο (υποθέτοντας ότι το σφάλμα κβαντισμού λαμβάνει πάντοτε τη μέγιστη του τιμή) όταν για την κωδικοποίηση κάθε δείγματος διατίθενται:
 - ◇ 5 bits
 - ◇ 10 bits