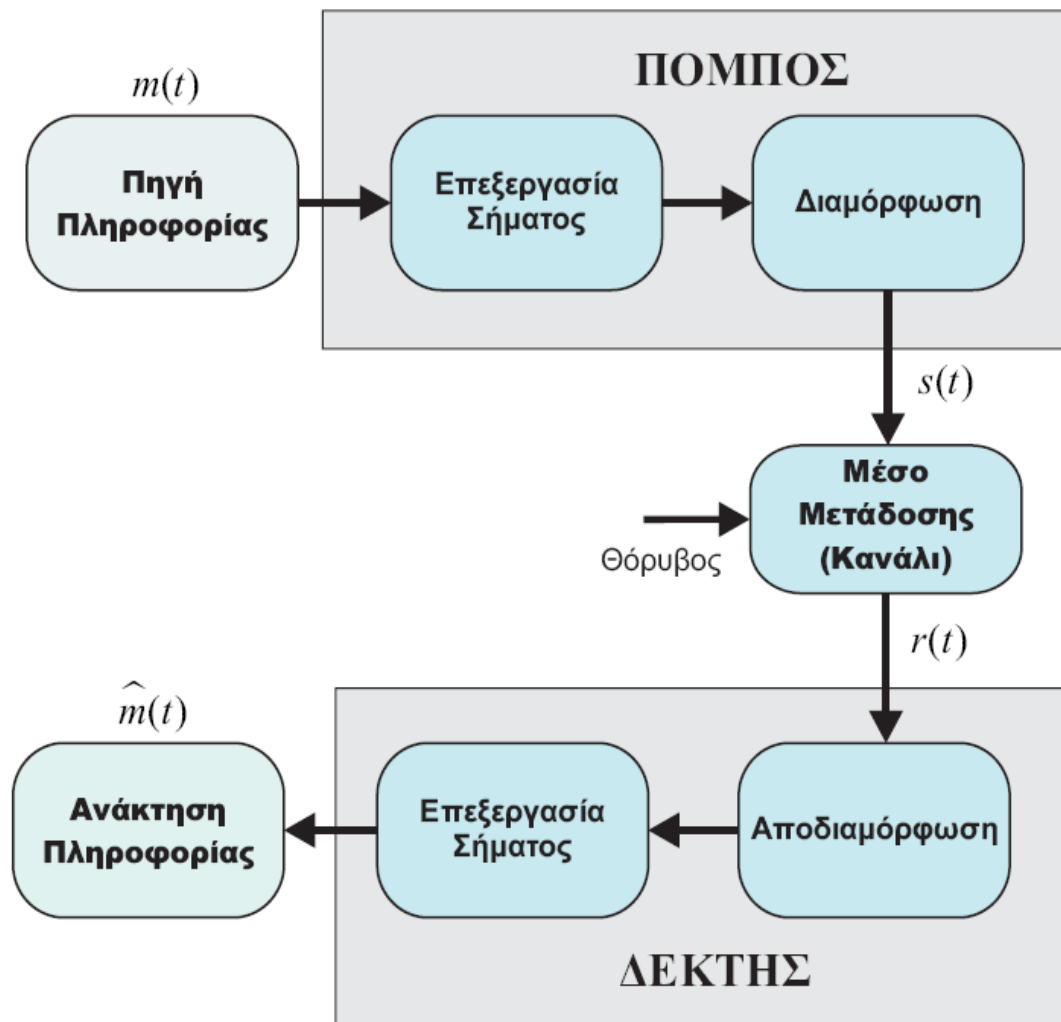
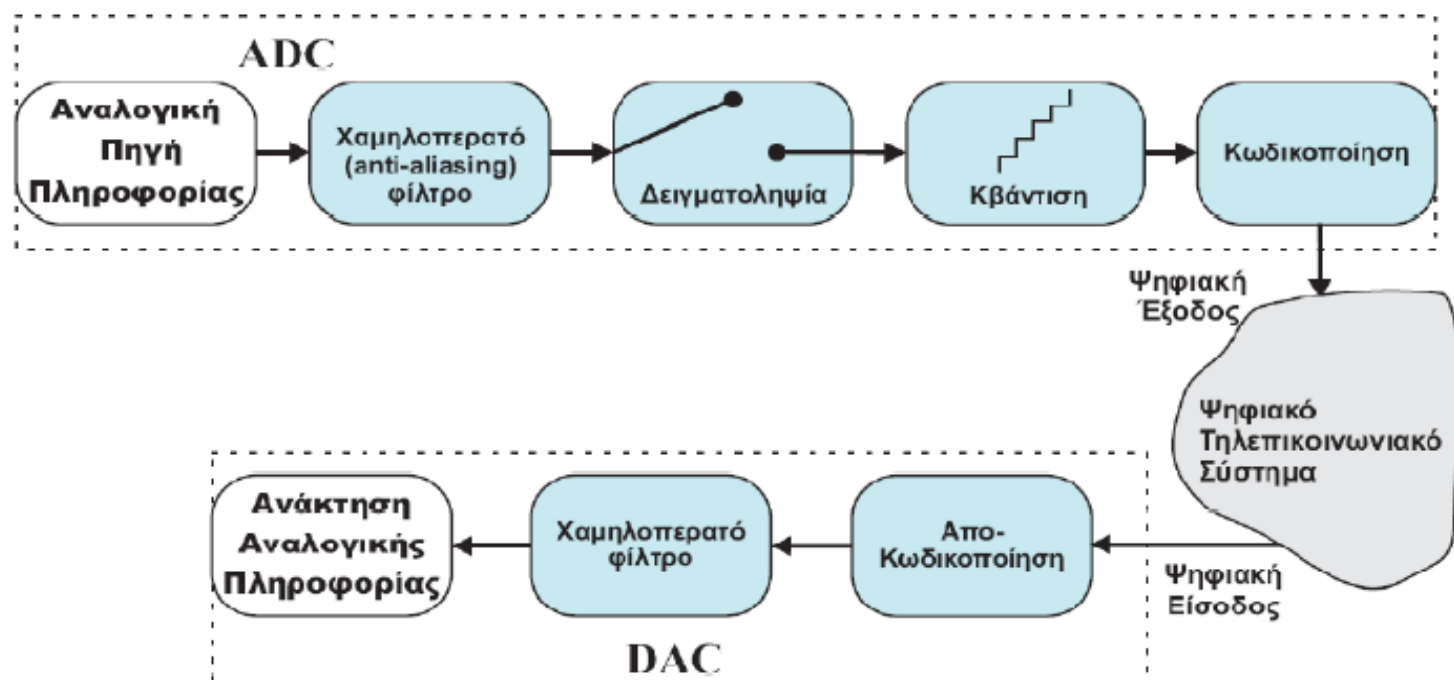


ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ - ΛΗΨΗΣ



Σύστημα ADC και DAC



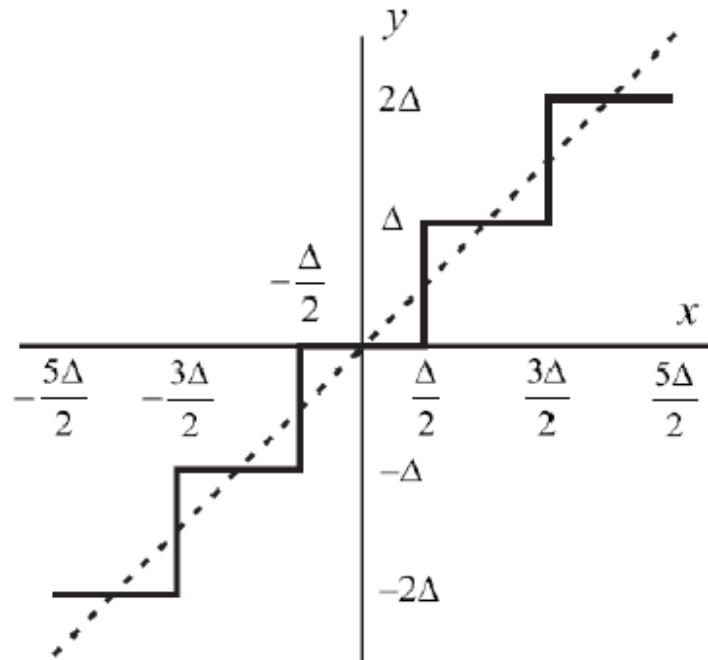
- Το *Χαμηλοπερατό φίλτρο*, γνωστό και ως *anti-aliasing*, περιορίζει το φάσμα του αναλογικού σήματος, ώστε σε συνδυασμό με τη συχνότητα δειγματοληψίας να ικανοποιείται η συνθήκη του *Nyquist*, η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια.
- Ο *Δειγματολήπτης* (*Sampler*) μετατρέπει το αναλογικό σήμα συνεχούς χρόνου στο αντίστοιχο σήμα διακριτού χρόνου.
- Ο *Κβαντιστής* (*Quantizer*), έχοντας σαν είσοδο το διακριτό σήμα της εξόδου του δειγματολήπτη, προσεγγίζει τις διακριτές τιμές με συγκεκριμένα επίπεδα πλάτους.
- Ο *Κωδικοποιητής* (*Coder*) μετατρέπει την ακολουθία των επιπέδων πλάτους της εξόδου του κβαντιστή σε δυαδικές κωδικολέξεις (*codewords*).

Κβάντιση (Quantization)

Κβάντιση (*Quantization*) είναι η διαδικασία μετατροπής των δειγμάτων (τιμών) της εξόδου του δειγματολήπτη σε ακολουθία διακριτών τιμών, οι οποίες ανήκουν σε ένα πεπερασμένο σύνολο επιπέδων πλάτους. Αν τα επίπεδα αυτά είναι ισαπέχοντα τότε η κβάντιση ονομάζεται ομοιόμορφη (*uniform*) ενώ στην αντίθετη περίπτωση ονομάζεται μη-ομοιόμορφη (*non-uniform*).

Η κβάντιση είναι μια διαδικασία που θεωρητικά οδηγεί σε απώλεια πληροφορίας. Έτσι, κρίσιμο σημείο στη σχεδίαση του κβαντιστή είναι η πληροφορία που θα χαθεί να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο “χρήσιμη” στο δέκτη.

Ομοιόμορφη Κβάντιση (mid-tread)

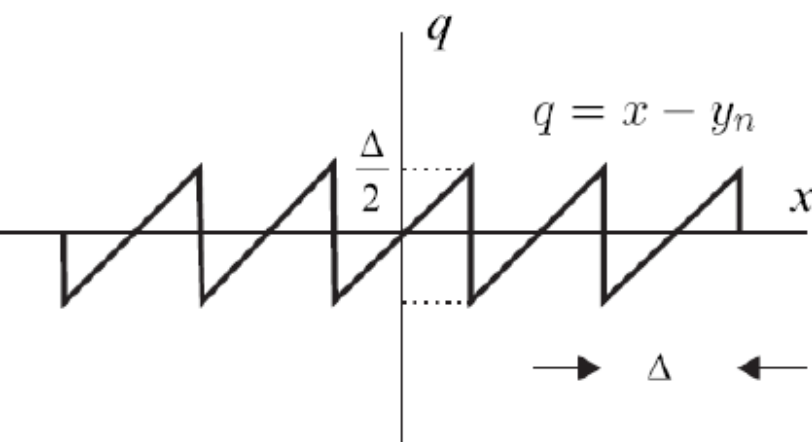


$$L = 2^R \Rightarrow \Delta = \frac{V_{pp}}{2^R}$$

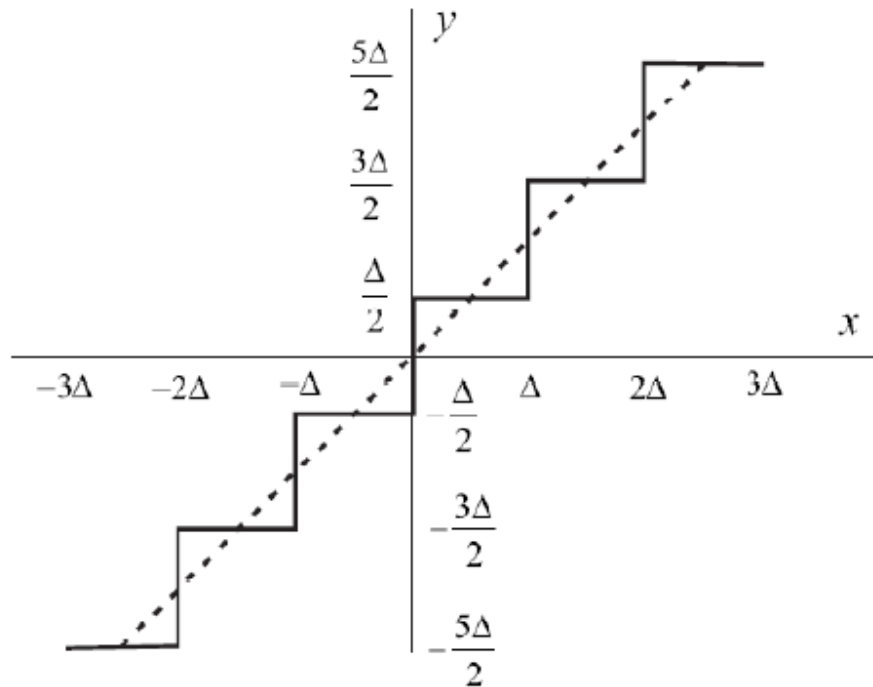
Βήμα

$$x \in \left[\left(n - \frac{1}{2}\right)\Delta, \left(n + \frac{1}{2}\right)\Delta \right) \Rightarrow y = n\Delta$$

$$n = -\frac{L}{2}, -\frac{L}{2} + 1, \dots, \frac{L}{2} - 2, \frac{L}{2} - 1$$

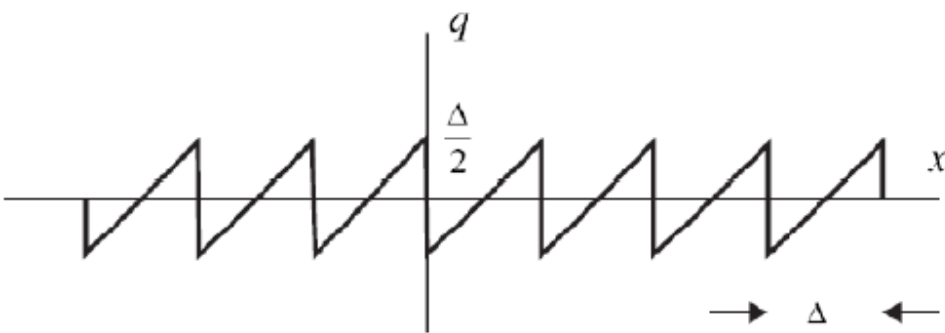


Ομοιόμορφη Κβάντιση (mid-rise)

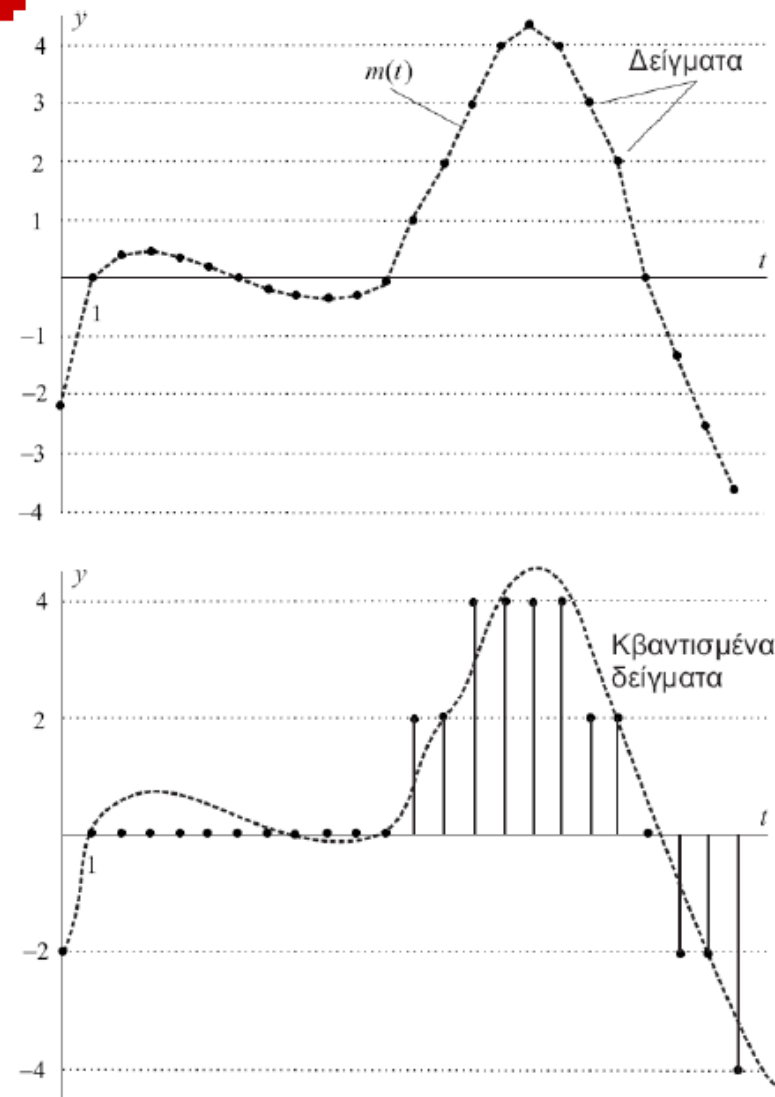
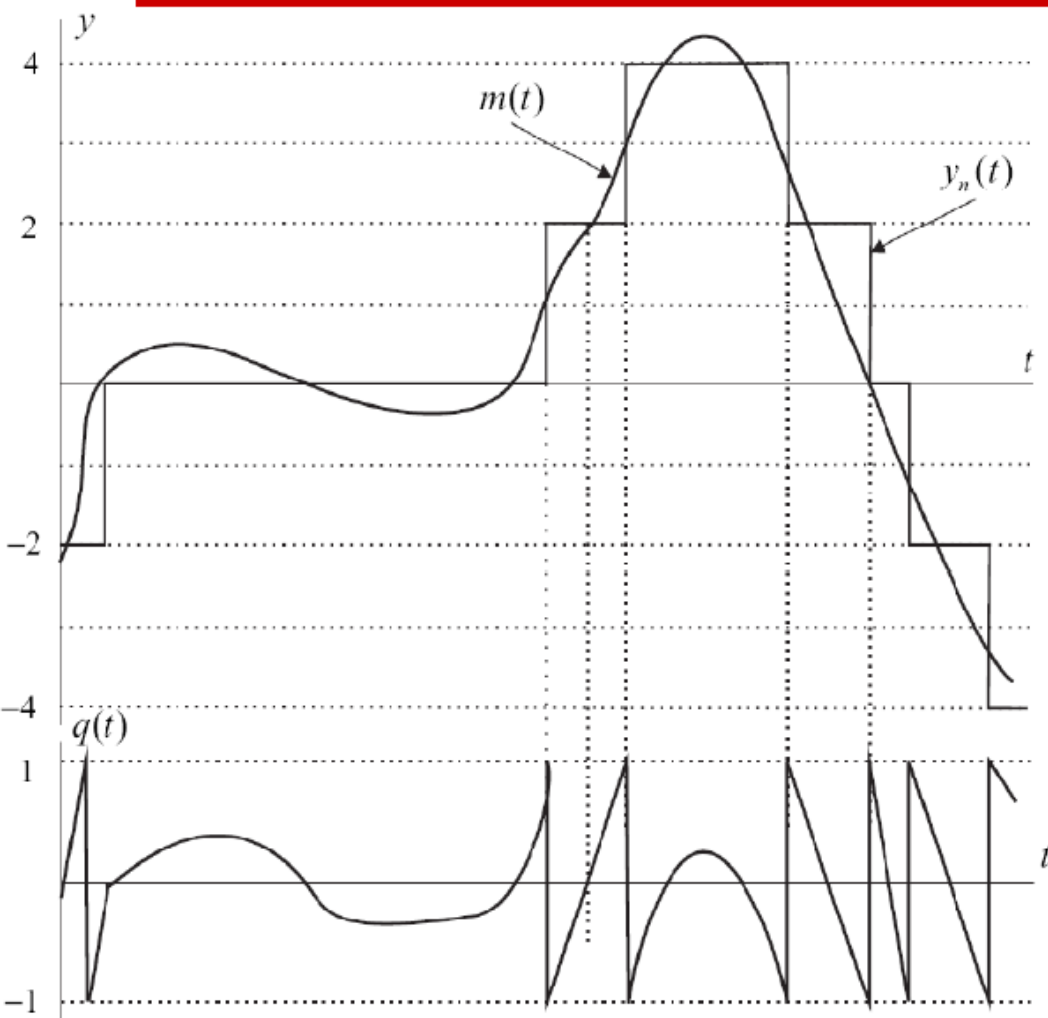


$$x \in \{(n-1)\Delta, n\Delta\} \Rightarrow y = (n - \frac{1}{2})\Delta.$$

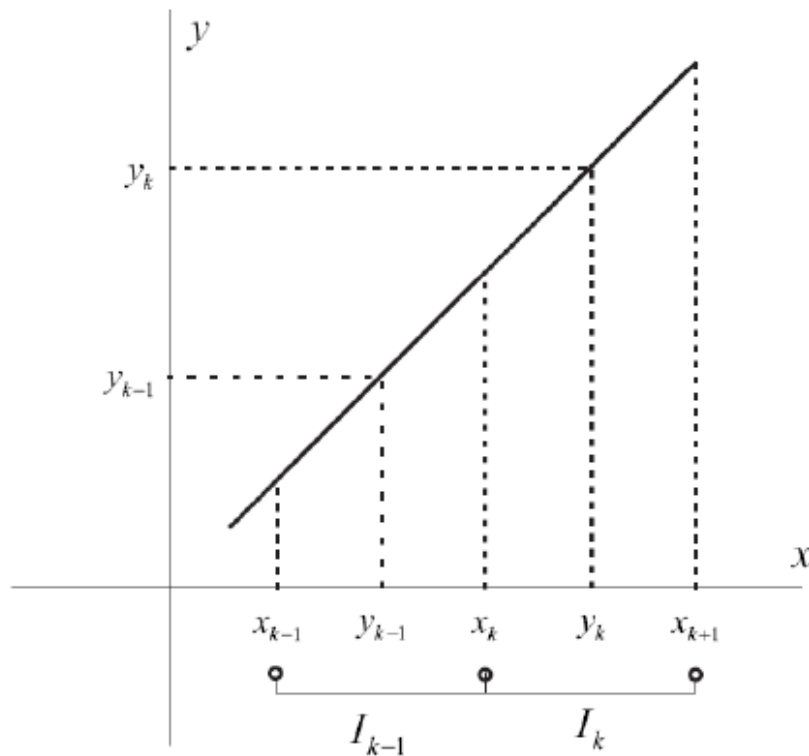
$$n = -\frac{L}{2} + 1, -\frac{L}{2} + 2, \dots, \frac{L}{2} - 1, \frac{L}{2}$$



Ομοιόμορφη Κβάντιση-Παράδειγμα



Θόρυβος Κβάντισης



$$I_k = \{x_k < x \leq x_{k+1}\}, k = 1, 2, \dots, L$$

$$y = y_k \text{ αν } x \in I_k \Rightarrow y_k = x + q, x \in I_k$$

$\swarrow$
 Σφάλμα $|q| \leq \frac{\Delta}{2}$

$$\sigma_Q^2 = E[Q^2] - (E[Q])^2 = E[Q^2] - 0$$

$$\sigma_Q^2 = E[Q^2]$$

$$f_Q(q) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta}, & q \in \{-\frac{\Delta}{2}, \frac{\Delta}{2}\} \\ 0, & \text{αλλού,} \end{cases}$$

$$\sigma_Q^2 = \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} \frac{1}{\Delta} q^2 dq = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{1}{12} \frac{V_{pp}^2}{2^{2K}}$$

$$(\text{SNR})_{o,q} = \frac{\sigma_X^2}{\sigma_Q^2}$$



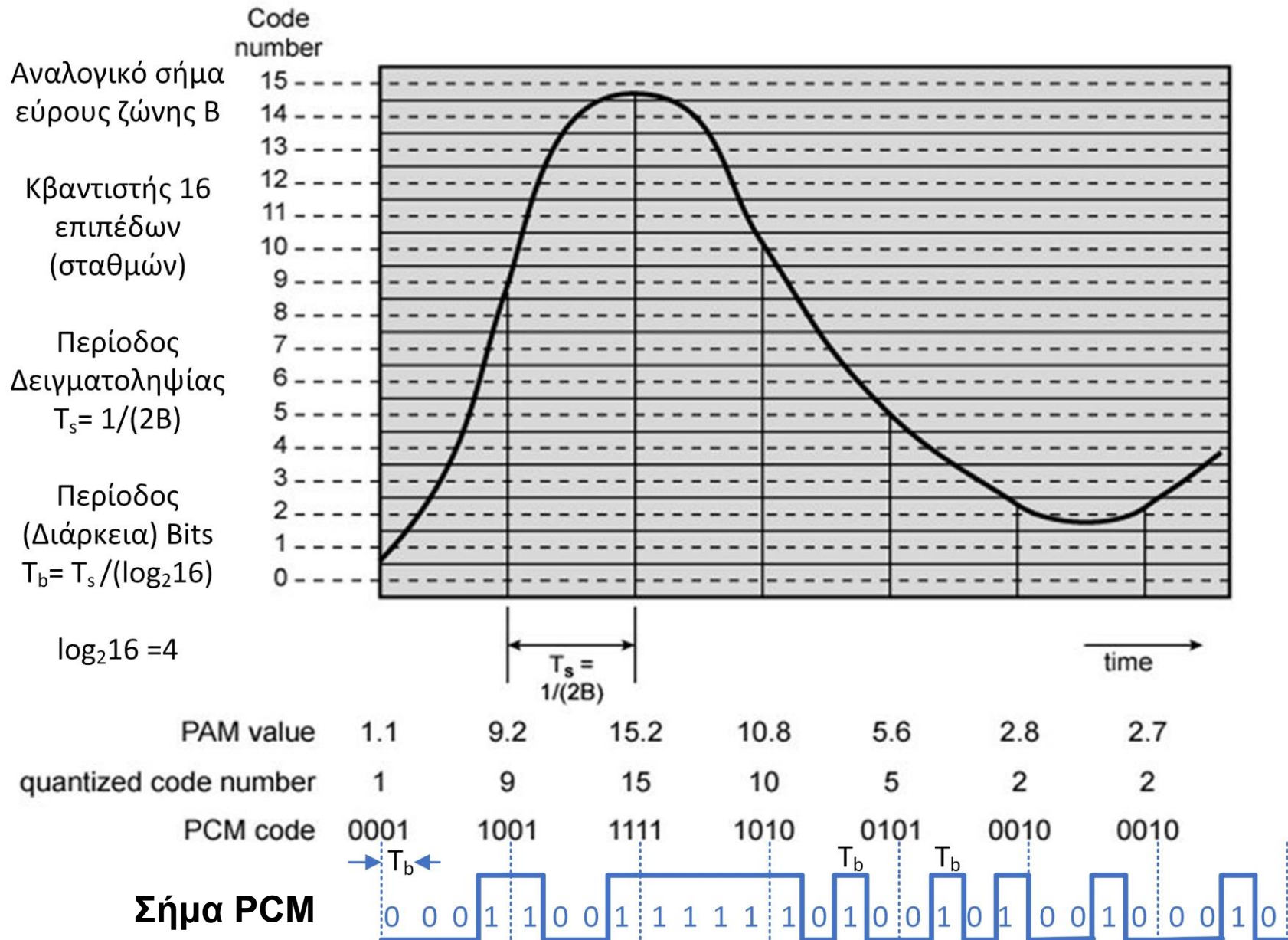
$$(\text{SNR})_{o,q} = \frac{12\sigma_X^2}{\Delta^2}$$

$$\text{SNR}_{o,q} = 12S/\Delta^2$$

Ανταλλαγή επίδοσης με εύρος ζώνης στην PCM

- Για να δώσουμε χρήσιμη έννοια στην σχέση $\text{SNR}_{o,q} = 12S/\Delta^2$ (όπου S = ισχύς της πληροφορίας = σ^2), έστω PCM με δυαδικό κώδικα. Αν η πληροφορία κυμαίνεται στο $[-M, +M]$, τότε $V_{pp} = 2M = n\Delta \Rightarrow \Delta = 2M/n$ ($=V_{pp}/L$), όπου $n = L$ είναι τα βήματα κβαντισμού (άρα $\log_2 n$ είναι ο αριθμός των bits κωδικοποίησης). Οπότε: $\text{SNR}_{o,q} = 12S/(2M/n)^2 = 3n^2S/M^2$
- Έστω ω_s η μέγιστη (κυκλική) συχνότητα του πληροφοριακού σήματος και $W = \omega_s$ το εύρος ζώνης του. Η περίοδος δειγματοληψίας του είναι $T_s = \pi/\omega_s$ sec. Στο διάστημα αυτό θα μπουν τα $\log_2 n$ bits του κωδικοποιητή. Δηλ. Διάρκεια (περίοδος) των bits: $T_b = \pi/(\omega_s \log_2 n) = 2\pi/(2\omega_s \log_2 n) = 2\pi/B$ όπου B το εύρος ζώνης (μέγιστη συχνότητα του PCM). Οπότε:
- $B = 2\omega_s \log_2 n \Rightarrow \log_2 n = B/(2\omega_s) \Rightarrow n = 2^{B/(2\omega_s)} \Rightarrow n^2 = 2^{B/\omega_s}$ Οπότε:
- $\text{SNR}_{o,q} = 3 \cdot S \cdot 2^{B/\omega_s} / M^2$
- Ο τύπος αυτός δείχνει την ανταλλαγή της επίδοσης με το εύρος ζώνης B του σήματος PCM (μόνο που η επίδοση είναι ο SNR και όχι το $K.A$). Μάλιστα, η επίδοση εξαρτάται από το εύρος ζώνης B με εκθετικό τρόπο. Αν έχουμε περισσότερα βήματα κβαντισμού θα έχουμε και περισσότερα ψηφία στις κωδικολέξεις (codewords) και μεγαλύτερο εύρος ζώνης B .

Παράδειγμα σήματος PCM



Μη-ομοιόμορφη Κβάντιση

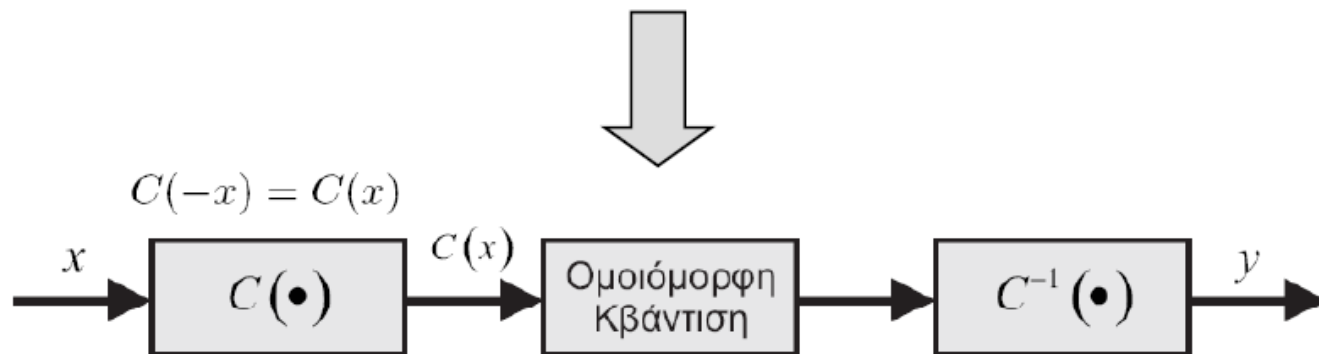
$$(\text{SNR})_{o,q} = \frac{12\sigma_X^2}{\Delta^2}$$

Πρόβλημα με αυξομείωση της έντασης

Πρόβλημα από το γεγονός ότι οι χαμηλές τιμές τάσης (Volts) στατιστικά είναι περισσότερες από τις υψηλότερες τιμές.

Ομοιόμορφη Κβάντιση

Μη-ομοιόμορφη Κβάντιση



COMpressor
Συμπιεστής

exPANDER
Διαστολέας

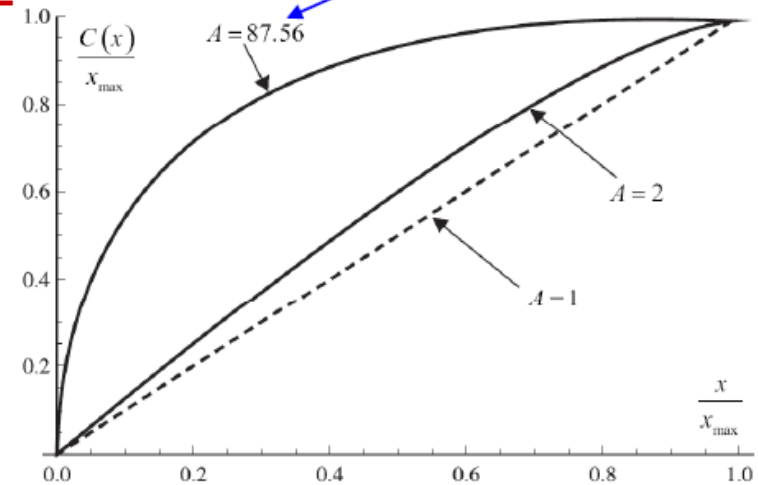
COMPANDER

Μη-ομοιόμορφη Κβάντιση

Ευρωπαϊκό PCM

A-law COMPANDER:

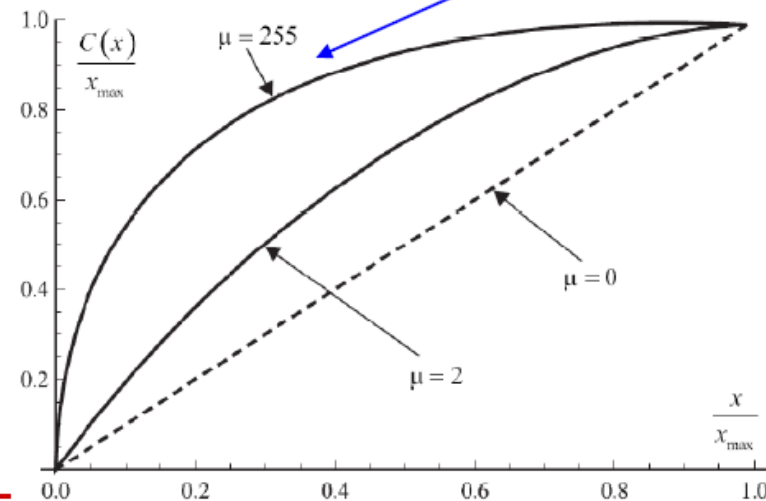
$$C(x) = \begin{cases} \frac{A|x|}{1+\log A} \operatorname{sgn}(x), & 0 \leq \frac{|x|}{x_{\max}} \leq \frac{1}{A} \\ x_{\max} \left[\frac{1+\log\left(\frac{A|x|}{x_{\max}}\right)}{1+\log A} \right] \operatorname{sgn}(x), & \frac{1}{A} \leq \frac{|x|}{x_{\max}} \leq 1 \end{cases}$$



μ -law COMPANDER:

$$C(x) = x_{\max} \left[\frac{\log\left(1 + \mu \frac{|x|}{x_{\max}}\right)}{\log(1 + \mu)} \right] \operatorname{sgn}(x)$$

USA PCM



Σύγκριση των νόμων A και μ

Ε
υ
ρ
ώ
π
η

Α
μ
ε
ρ
ι
κ
ή
-
ι
α
π
ω
ν
ί
α

$$v_{\text{out}} = \frac{1 + \log A v_{\text{in}}}{1 + \log A}$$

αν

$$\frac{1}{A} \preceq v_{\text{in}} \preceq 1$$

$$v_{\text{out}} = \frac{A v_{\text{in}}}{1 + \log A}$$

αν

$$0 \preceq v_{\text{in}} \preceq \frac{1}{A}$$

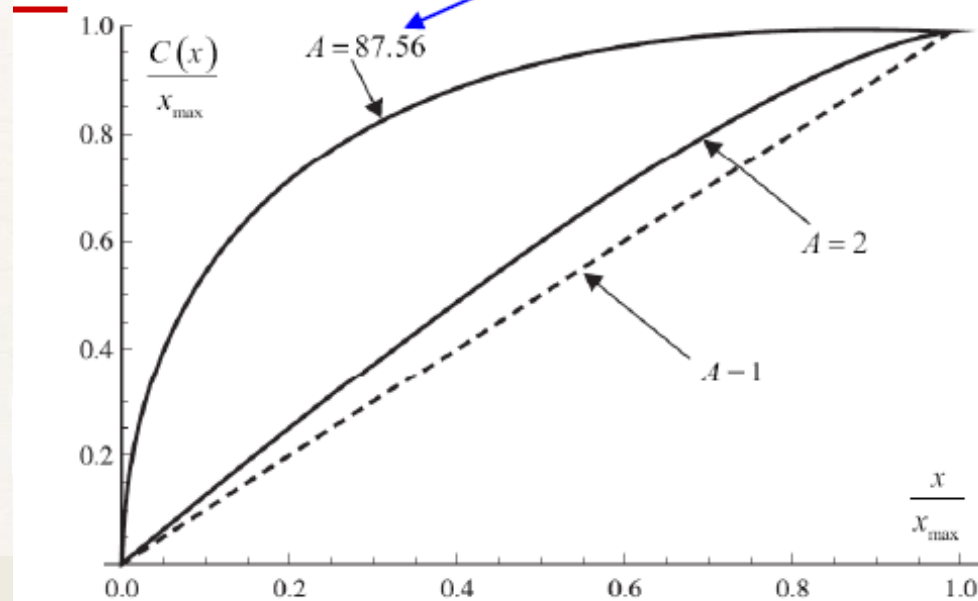
$$v_{\text{out}} = \frac{\log(1 + \mu v_{\text{in}})}{\log(1 + \mu)}$$

αν

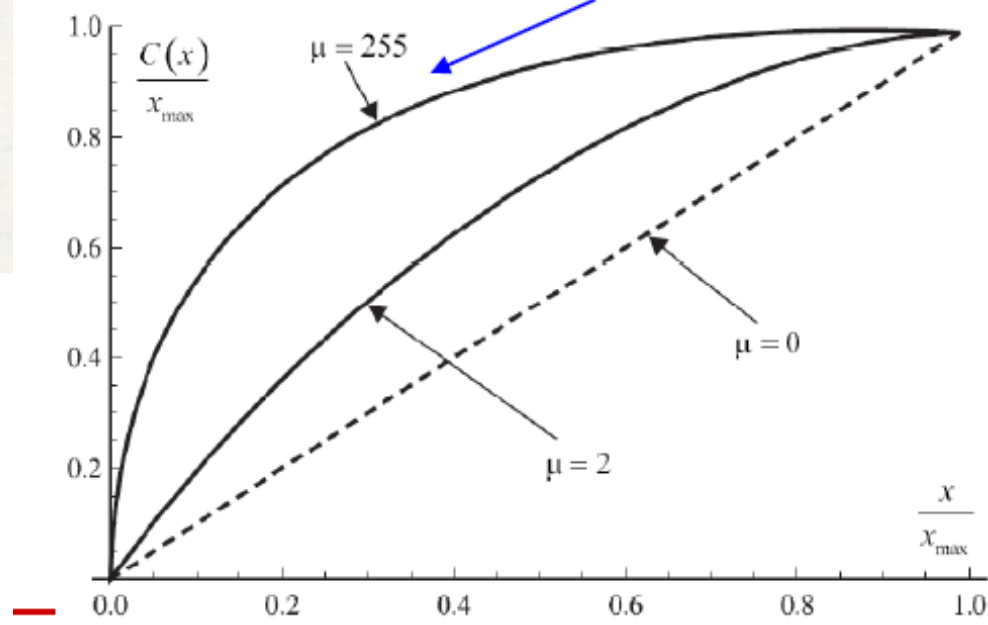
$$0 \preceq v_{\text{in}} \preceq 1$$

Κβάντιση

Ευρωπαϊκό PCM



USA PCM



ITU-T RECOMMENDATION ΓΙΑ PCM (στην πράξη)

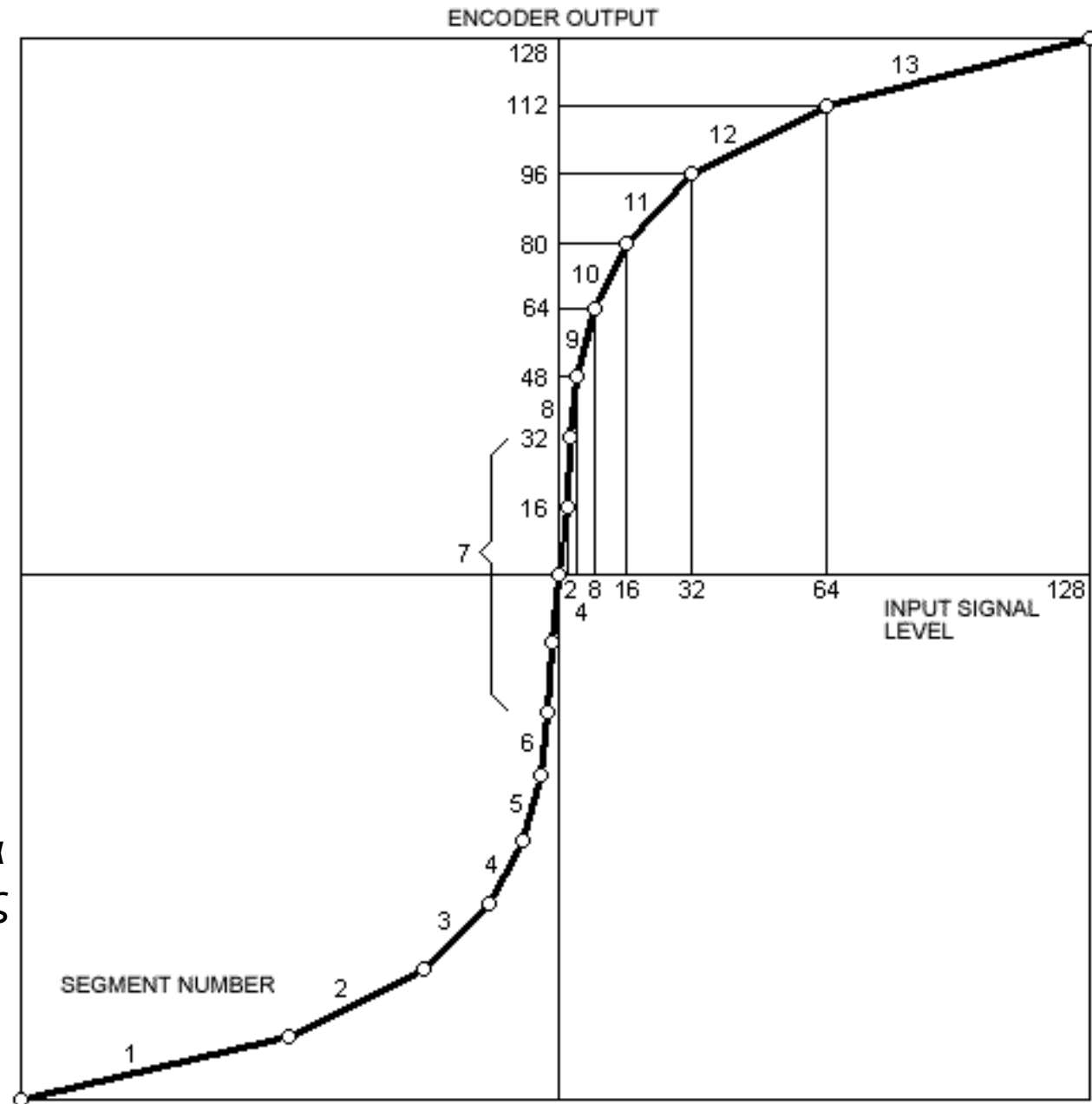
Τηλεφωνία

Μέγιστη συχνότητα ομιλίας
4000 Hz
(ακριβέστερα 300 – 3400 Hz)

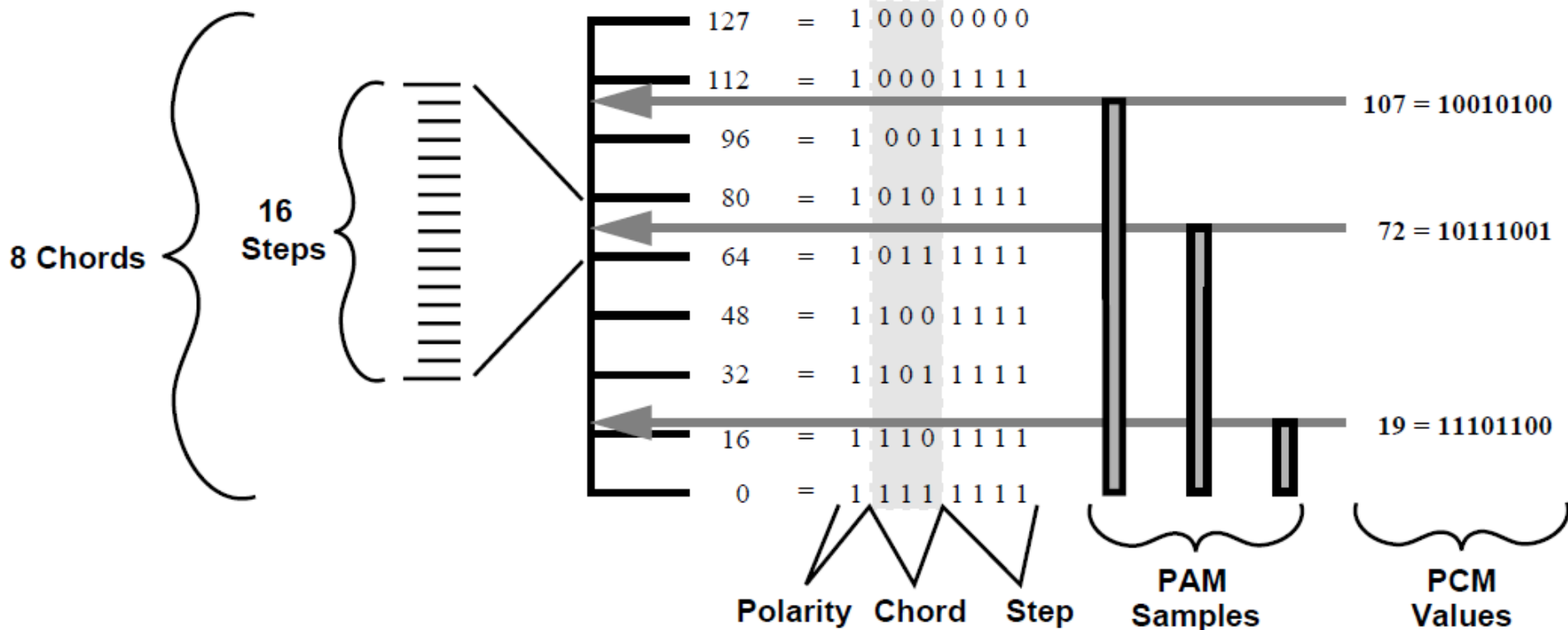
Δειγματοληψία
8000 Hz

Άρα το χρονικό διάστημα
μεταξύ των διαδοχικών
δειγματοληψιών (του ίδιου
σήματος ομιλίας):
 $1/8000 = 125 \mu\text{s}$.

Κβαντοποίηση με 256 βήματα
Κατανεμημένα σε 13 περιοχές

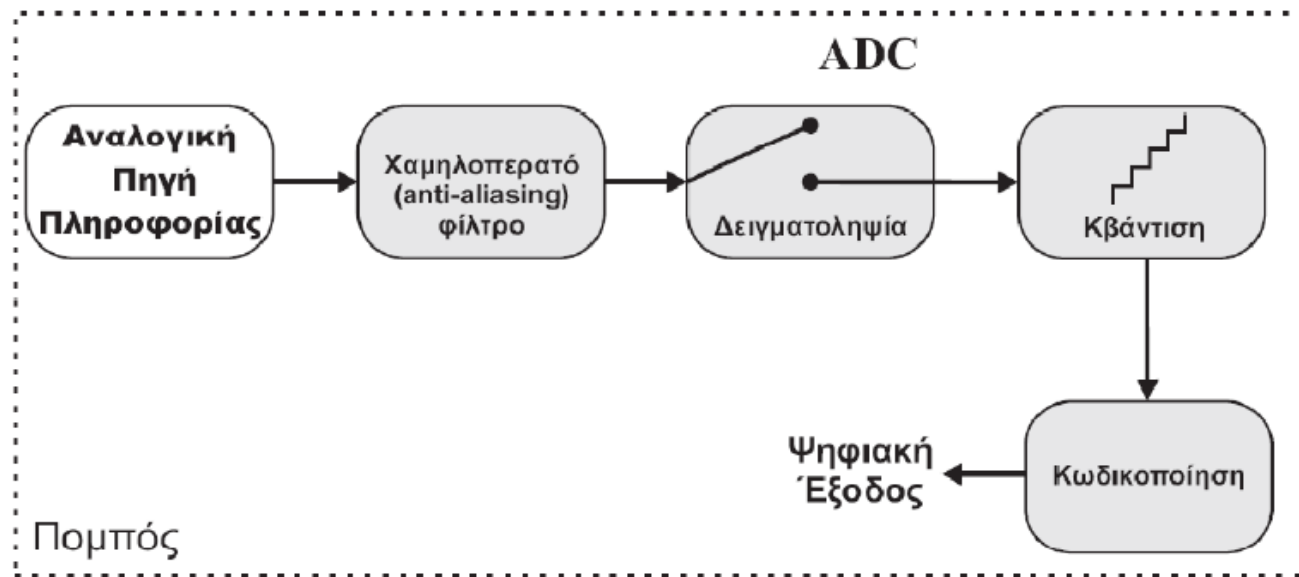


PCM (στην πράξη) - επεξήγηση

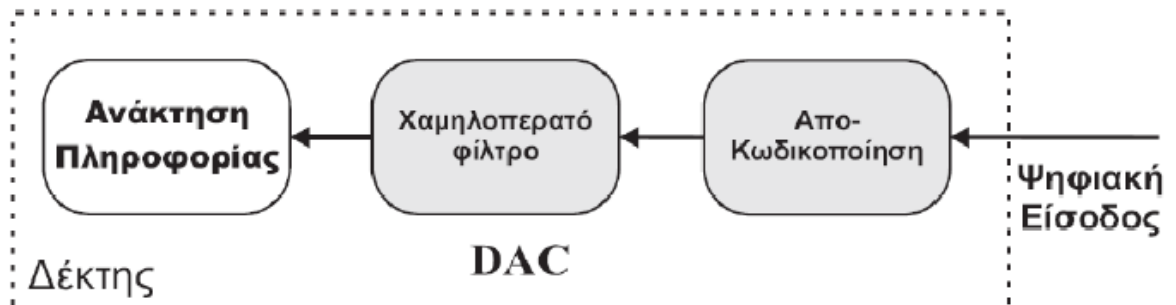


Παλμοκωδική Διαμόρφωση (Pulse Code Modulation-PCM)

- Ψηφιακή τηλεφωνία
- Μουσικά πληκτρολόγια
- Ήχος στους υπολογιστές
- Ψηφιακό video
- Compact Disc
- Blu-ray



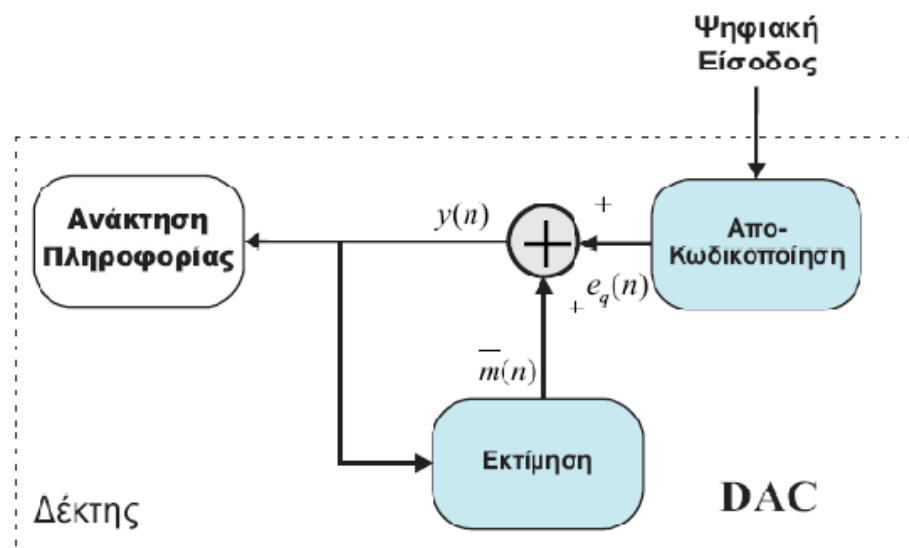
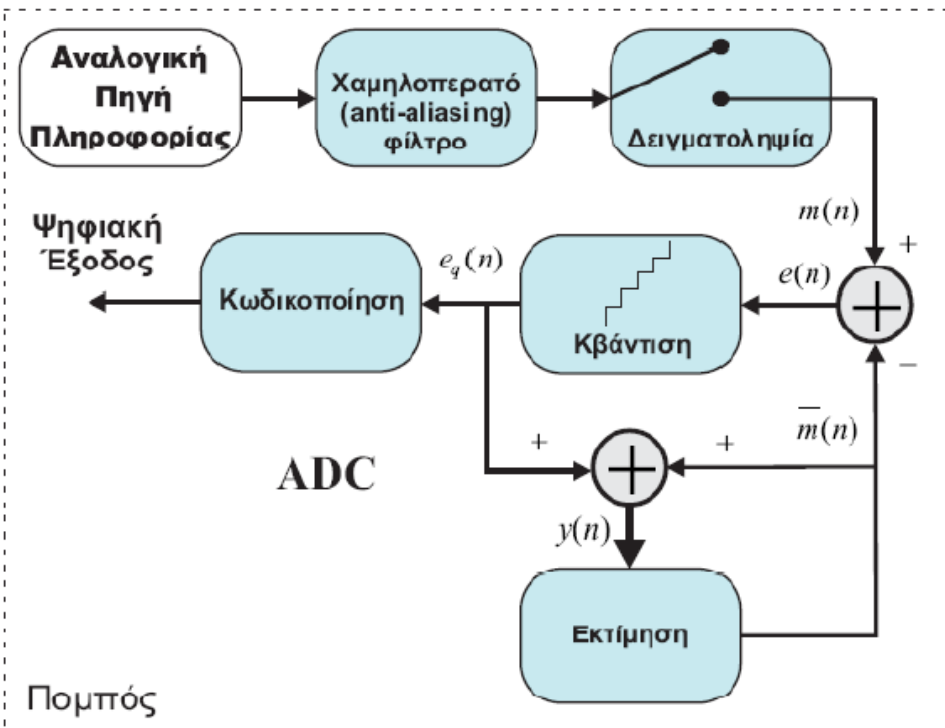
Ψηφιακή Κβαντιστής Ψηφιακή
Έξοδος «1/0» Είσοδος
(κάνάλι) (δέκτη)



Διαφορική Παλμοκωδική Διαμόρφωση (Differential Pulse Code Modulation-DPCM)

- Παραλλαγή του PCM
- Περιλαμβάνει δειγματοληψία, κβάντιση και κωδικοποίηση
- Η βασική διαφορά είναι ότι δεν κβαντίζεται η τιμή του δείγματος αλλά η διαφορά αυτής με μια εκτιμώμενη τιμή
- Τα περισσότερα σήματα που συναντώνται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των δειγμάτων

Διαφορική Παλμοκωδική Διαμόρφωση (Differential Pulse Code Modulation-DPCM)



DPCM Πλεονεκτήματα σε σχέση με το PCM

- i) Ο αριθμός των επιπέδων του κβαντιστή είναι μικρότερος. Για παράδειγμα, ένα PCM 8 επιπέδων μετατρέπεται σε DPCM 4 επιπέδων, οπότε αντί για 3 απαιτούνται 2 bits για κωδικοποίηση ενός δείγματος πληροφορίας. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη μετάδοση της ίδιας πληροφορίας με εξοικονόμηση εύρους ζώνης.
- ii) Ο σχεδιασμός του συστήματος απλοποιείται αφού δεν απαιτείται στο δέκτη φίλτρο μετατροπής του ψηφιακού σήματος σε αναλογικό όπως συμβαίνει στο PCM.
- iii) Επειδή στο DPCM λαμβάνεται υπόψη και η φυσική (πέρα από τη στατιστική) σχέση διαδοχικών δειγμάτων, η ανάκτηση του αναλογικού σήματος είναι πιο αξιόπιστη συγκρινόμενη με την αντίστοιχη του PCM.

DPCM Μειονεκτήματα σε σχέση με το PCM

Το μειονέκτημα του DPCM είναι η μεγαλύτερη ευαισθησία του στο θόρυβο από το αντίστοιχο PCM. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ανάκτηση ενός δείγματος στο δέκτη εξαρτάται από τα προηγούμενα δείγματα, με αποτέλεσμα τη διάδοση λαθών που έχουν συμβεί προηγουμένως και στα επόμενα δείγματα.

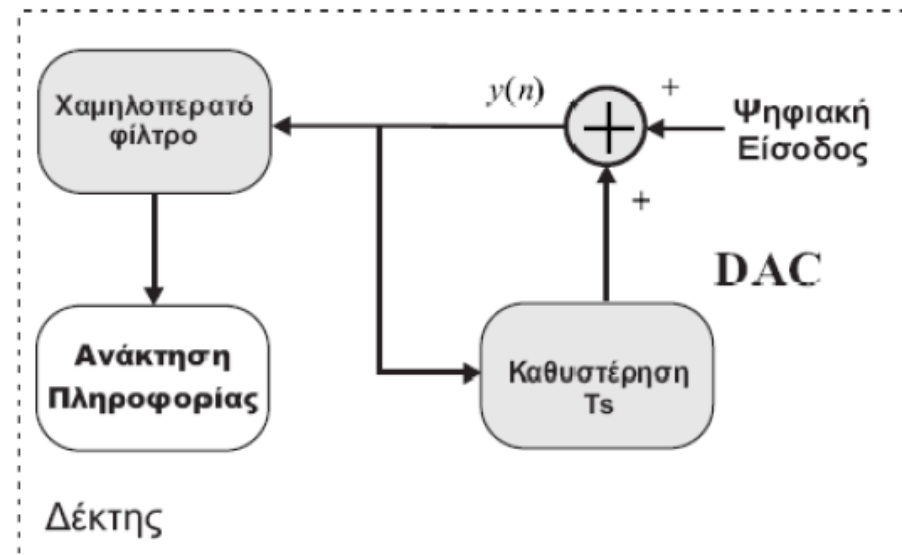
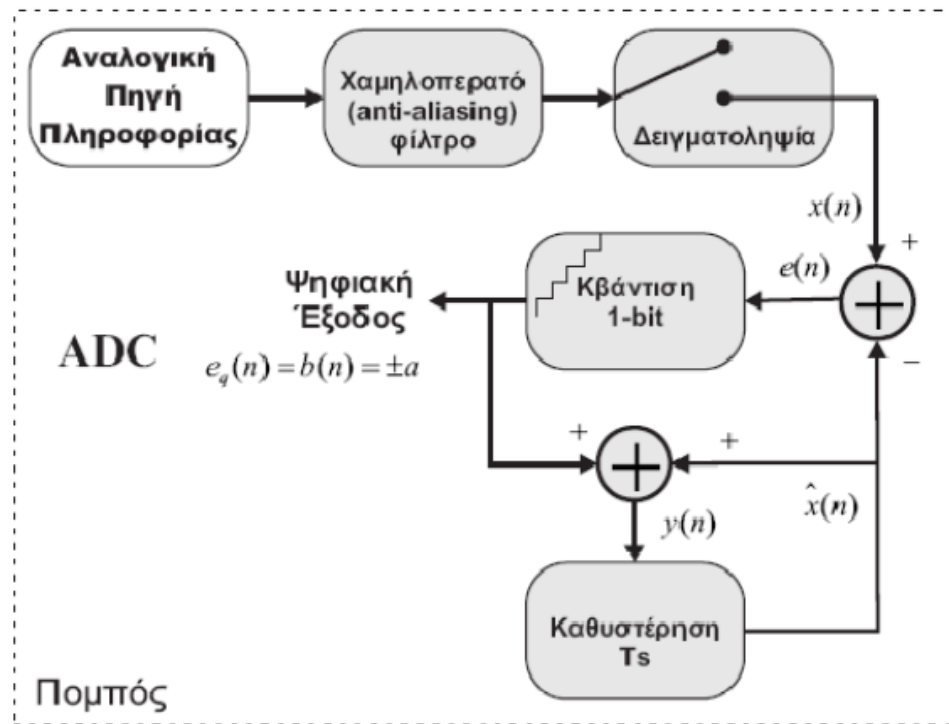
Το DPCM χρησιμοποιείται σε πρότυπα όπως το *Joint Photographic Experts Group (JPEG)* για την ψηφιοποίηση εικόνας και σαν *Adaptive DPCM (ADPCM)* για τη συμπίεση ήχου.

Διαμόρφωση Δέλτα (Delta Modulation)

Η Διαμόρφωση Δέλτα (*Delta Modulation-DM*) μπορεί να θεωρηθεί σαν ειδική περίπτωση του DPCM η οποία χρησιμοποιεί τον περισσότερο απλό κβαντιστή, τον επονομαζόμενο κβαντιστή δύο επιπέδων ή ενός *bit*.

Το αντίτιμο για τη χρήση του κβαντιστή χαμηλής πολυπλοκότητας είναι η απαίτηση για δειγματοληψία σε μεγάλους ρυθμούς, συνήθως μεγαλύτερους από τη διπλάσια συχνότητα Nyquist, με στόχο την αύξηση της συσχέτισης των γειτονικών δειγμάτων. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει πολύ μικρή αλλαγή μεταξύ των δειγμάτων αυτών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ένα DPCM σύστημα με κβαντιστή δύο επιπέδων.

Διαμόρφωση Δέλτα (Delta Modulation)



Κωδικοποίηση (Encoding)

Κωδικοποίηση (*Encoding*) είναι η μετατροπή των κβαντισμένων δειγμάτων σε κατάλληλη μορφή για τη μετάδοση από τον πομπό. Η κωδικοποίηση είναι μία διαδικασία που αντιστοιχεί ένα-προς-ένα τα κβαντισμένα δείγματα σε σύμβολα-κωδικολέξεις (*codewords*) ορισμένου μεγέθους.

Η κωδικοποίηση των δειγμάτων υλοποιείται στην πράξη με δυαδικούς (οι κωδικολέξεις περιλαμβάνουν δύο διακριτές τιμές 0 ή 1) η τετραδικούς (0,1,2 ή 3) κώδικες. Όμως στη μεγάλη πλειοψηφία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων χρησιμοποιούνται οι πρώτοι.

Αν χρησιμοποιηθούν R bits ανά δείγμα τότε ο μέγιστος αριθμός των δυνατών κωδικολέξεων είναι 2^R οπότε ο απαιτούμενος αριθμός επιπέδων κβάντισης πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος του 2^R .

Κωδικοποίηση

$$N = b_R(2^{R-1}) + b_{R-1}(2^{R-2}) + \dots + b_2(2^1) + b_1(2^0) \Rightarrow \text{Φυσικός δυαδικός κώδικας (NBC)}$$

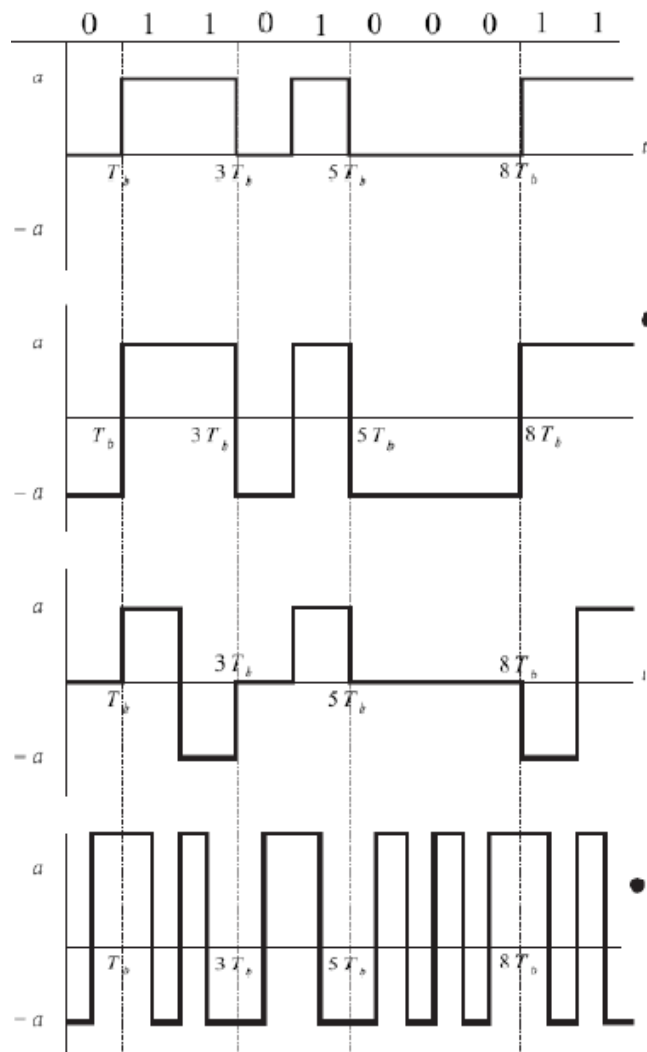
Folded Binary Code-FBC. Το πρώτο από αριστερά bit καθορίζει το πρόσημο και τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται για να κωδικοποιήσουν το πλάτος. Ο κώδικας αυτός είναι ανώτερος του φυσικού όσον αφορά την ανίχνευση σφαλμάτων, ιδιαίτερα όταν κωδικοποιείται φωνή.

Inverted Folded Binary Code-IFBC. Ο κώδικας αυτός προκύπτει από τον FBC με αντιστροφή των bits πλάτους (το 1 αλλάζει σε 0 και το 0 σε 1). Έχει το πλεονέκτημα της μεγάλης συγκέντρωσης σε 1 για σήματα μικρού πλάτους, κατάσταση που εμφανίζεται με μεγάλη πιθανότητα σε περίπτωση κωδικοποίησης φωνής.

Gray Code-GC. Με το φυσικό κώδικα μπορούν να αλλάζουν περισσότερα από ένα bits σε κωδικολέξεις ακόμα και αν αυτές αντιστοιχούν σε γειτονικά επίπεδα. Για παράδειγμα κατά τη μετάβαση από το επίπεδο 7 στο 8, αλλάζουν όλα τα bits.

Επίπεδο	Natural Binary Code				Folded Binary Code				Inverted Folded Binary Code				Gray Code			
	b_4	b_3	b_2	b_1									g_4	g_3	g_2	g_1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0
14	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
13	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
12	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0
11	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
10	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1
8	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
6	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
5	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
4	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
3	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
2	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Αντιστοιχία bits σε κυματομορφές



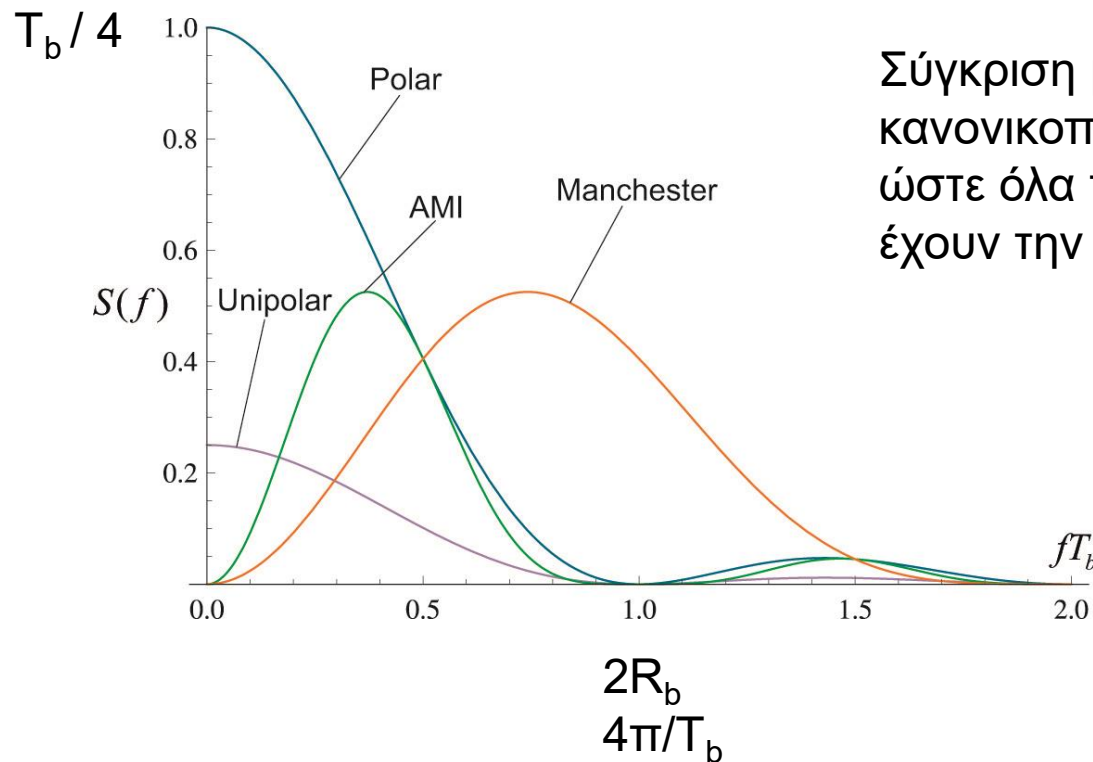
- **Unipolar ή On-Off.** Το 1 αντιστοιχεί σε ένα παλμό ενώ το 0 σε παύση της εκπομπής. Η τεχνική αυτή δημιουργεί DC συνιστώσα η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανεπιθύμητη.

- **Polar,** όπου χρησιμοποιείται ένας θετικός παλμός για το 1 και ένας αρνητικός για το 0. Εδώ δεν υπάρχει DC συνιστώσα με την προϋπόθεση ότι τα 0 και 1 στην ακολουθία εισόδου φτάνουν με την ίδια πιθανότητα.

- **Bipolar ή Alternate Mark Inversion, AMI.** Στην περίπτωση του κώδικα AMI χρησιμοποιούνται εναλλάξ θετικοί και αρνητικοί παλμοί για το 1 (με την αλλαγή να πραγματοποιείται σε κάθε εμφάνιση του bit 1) ενώ δεν υπάρχει παλμός για το 0. Με τον τρόπο αυτό υπάρχουν τρία επίπεδα: $+1$, 0 , -1 .

- **Manchester.** Το 1 κωδικοποιείται με τη μετάδοση ενός θετικού παλμού για το μισό της περιόδου του συμβόλου και με ένα αρνητικό παλμό για το υπόλοιπο μισό. Για το ψηφίο 0 οι δύο παλμοί μεταδίδονται σε αντίστροφη σειρά.

Φασματική πυκνότητα ισχύος πολικού σήματος και σύγκριση με Unipolar, AMI, Manchester



Σύγκριση μετά από κανονικοποίηση έτσι ώστε όλα τα σήματα να έχουν την ίδια μέση ισχύ.

Polar με παλμό $p(t) = \Pi[t/(T_b/2)]$

$$S(f) = |P(f)|^2 / T_b = (T_b/4) \text{sinc}^2(\pi f T_b/2)$$

Line coding (M-ary)

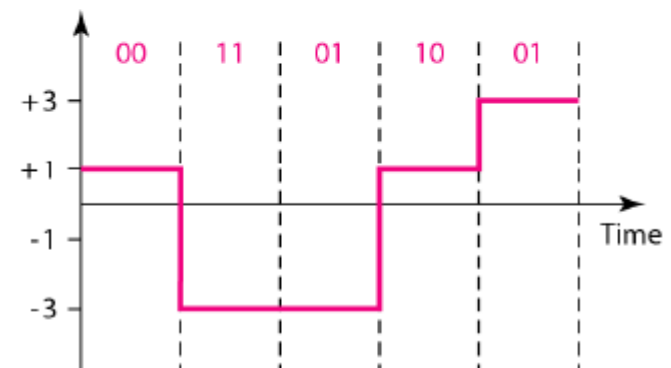
- **2B1Q** (two binary, one quaternary)
Χρησιμοποιείται στο ISDN του ΟΤΕ.
- **8b/10b** σε κάθε byte δεδομένων εκχωρείται κωδική λέξη των 10 bits. Το byte χωρίζεται σε 3 MSB (πιο σημαντικά bits) που κωδικοποιούνται σε 4 bits και σε 5 LSB που κωδικοποιούνται σε 6 bits. Το σύνολο των 10 bits πρέπει να περιέχουν ή πέντε «1» και πέντε «0», ή τέσσερα «1» και έξι «0», ή έξι «1» και τέσσερα «0». Αυτό αποτρέπει μια ακολουθία πάρα πολλών διαδοχικών «1» και «0», βοηθώντας τον συγχρονισμό του ρολογιού. (DC balance)
Χρησιμοποιείται σε δίκτυα υψηλής ταχύτητας.

Dibit (using Gray)	Signal Level
00	-450 mV
01	-150 mV
11	+150 mV
10	+450 mV

Previous level: positive Previous level: negative

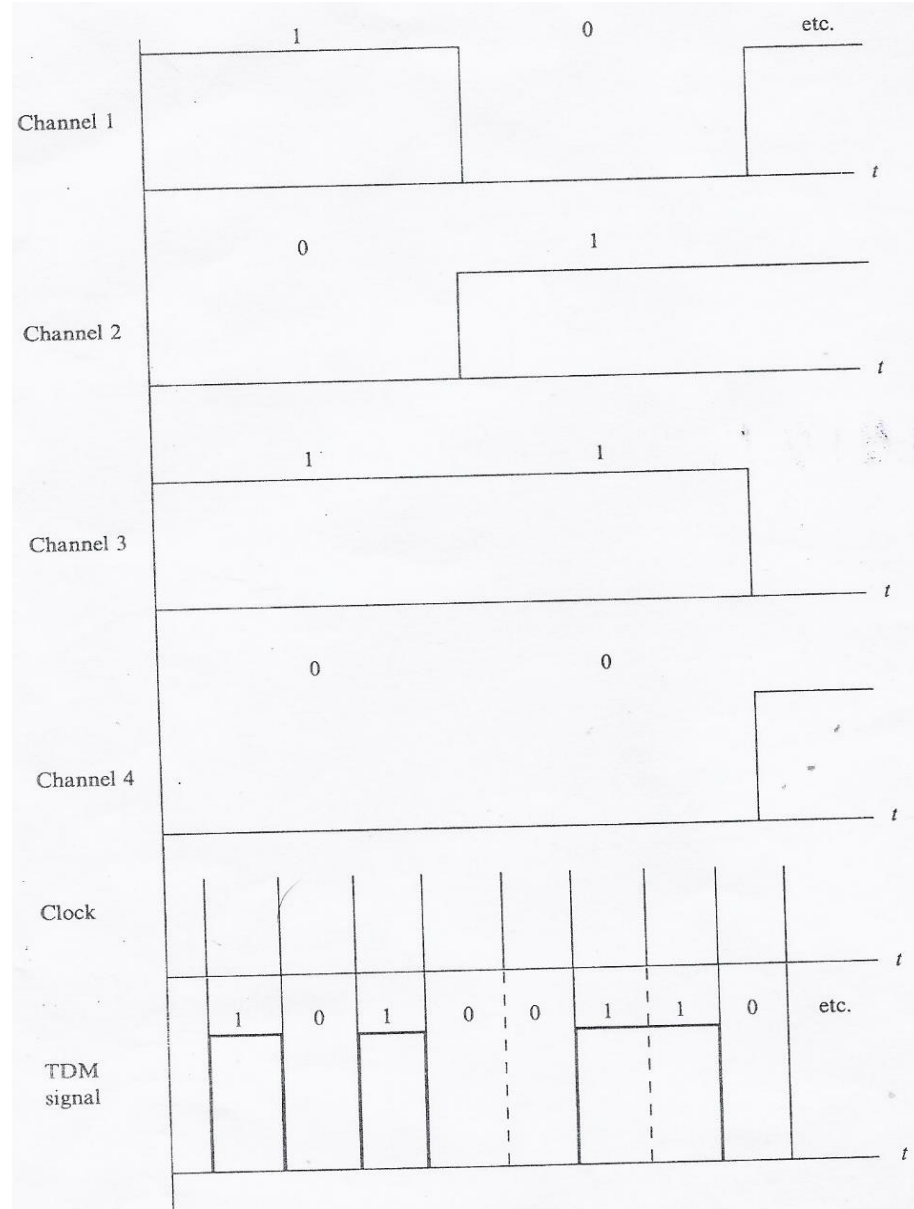
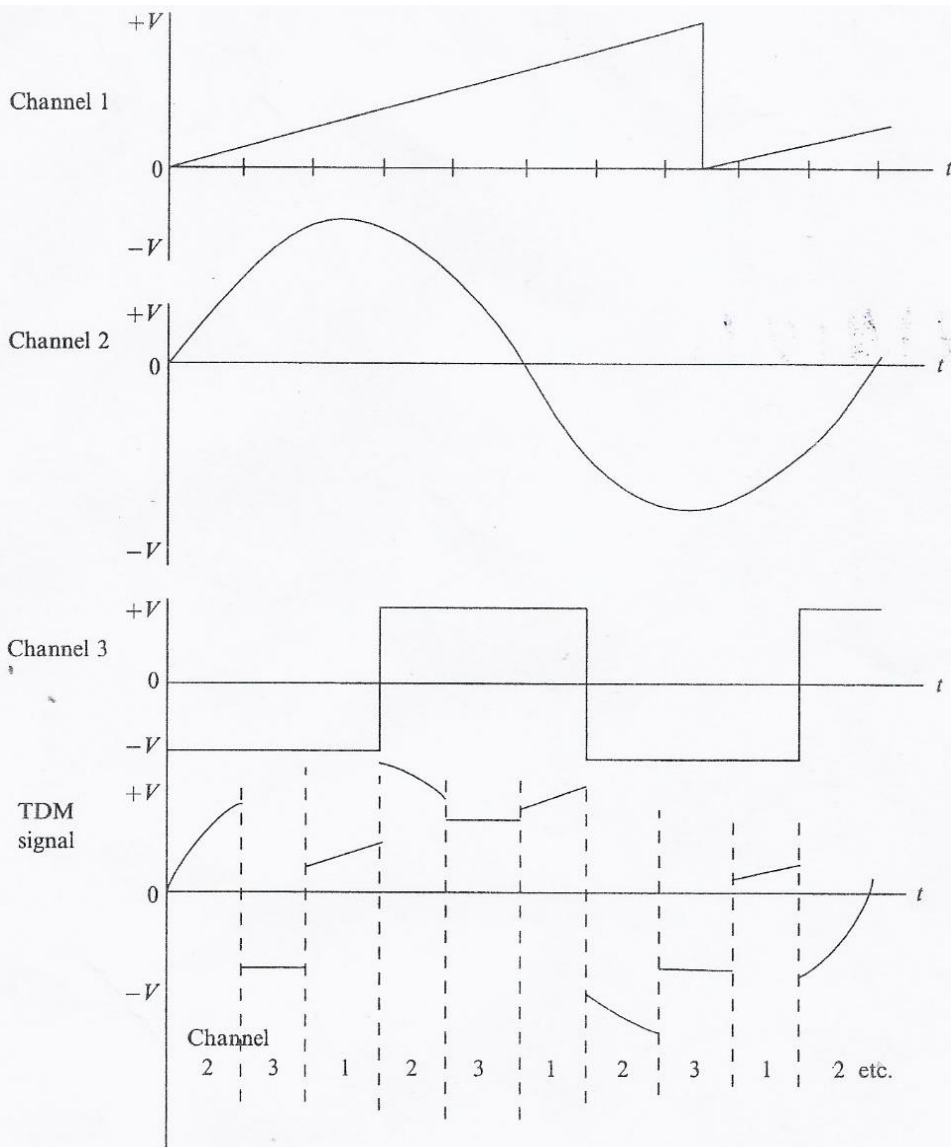
Next bits	Next level	Next level
00	+1	-1
01	+3	-3
10	-1	+1
11	-3	+3

Transition table

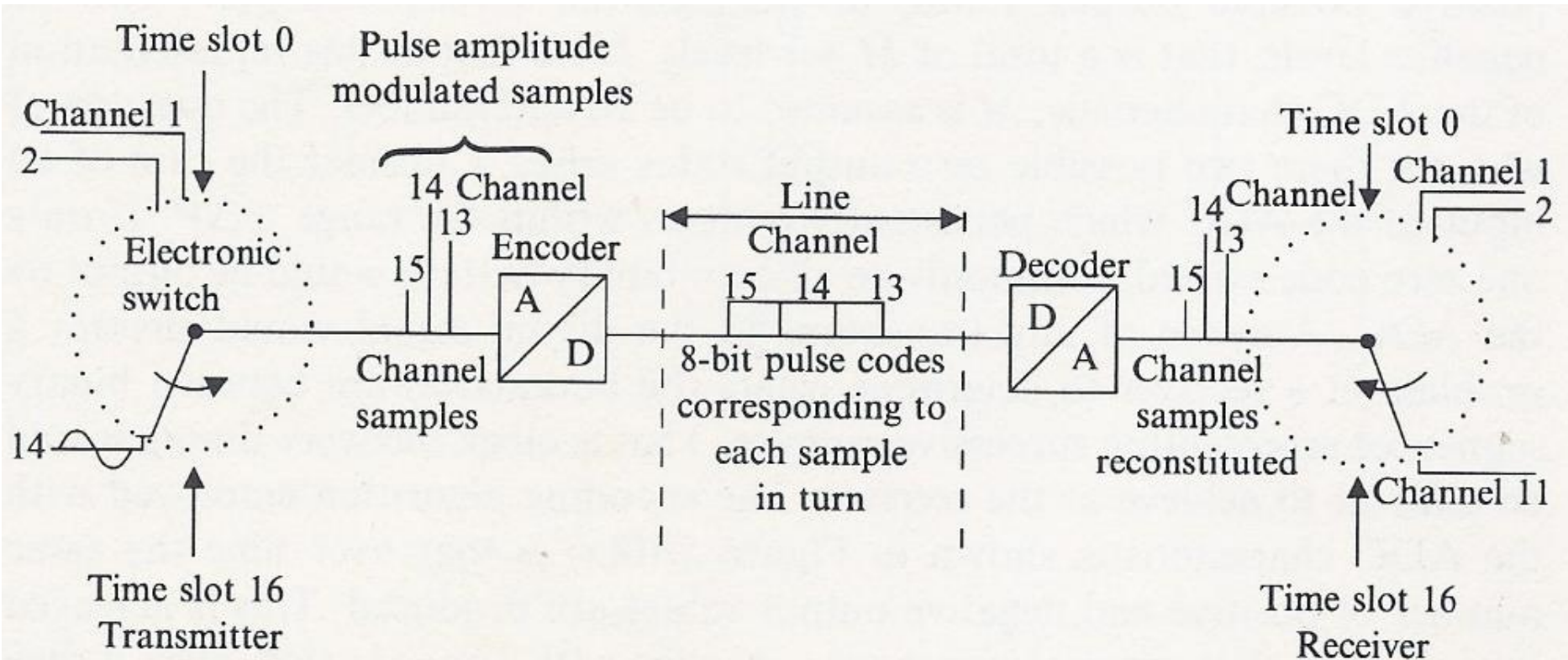


Assuming positive original level

Time Division Multiplexing



30-Channel PCM System



Voice channel: 300–3400 Hz $\Rightarrow$ $W=3100$ Hz $\Rightarrow$ $W=4$ KHz με περιθώριο ασφαλείας
 Sampling rate (per channel) = 8 KHz (δείγματα/sec) $\Rightarrow$ PCM channel = $8 \times 8 =$ **64 Kbps**
 30 Voice PCM channels + 2 overhead channels (το «0» και το «16») = 32 channels $\Rightarrow$
 $32 \times 8 \times 8 = 32 \times 64$ Kbps = **2048 Kbps $\approx$ 2 Mbps $\Rightarrow$ ~ 1 MHz minimum bandwidth**