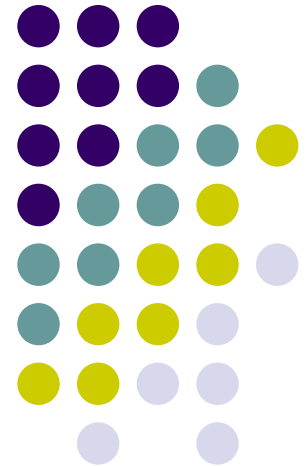
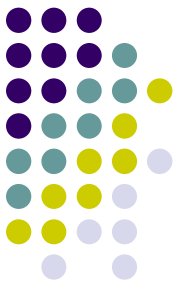


Παλμοκωδική Διαμόρφωση

Pulse Code Modulation (PCM)



Pulse-code modulation (PCM)

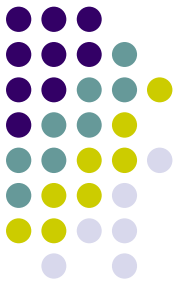


- Η PCM είναι ένας στοιχειώδης τρόπος διαμόρφωσης που **δεν** χρησιμοποιεί φέρον!
- Το μεταδιδόμενο (διαμορφωμένο) σήμα PCM είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση του αναλογικού σήματος όπου το πλάτος του σήματος δειγματοληπτείται, κβαντίζεται και μεταδίδεται ως σειρά συμβόλων, συνήθως, δυαδικών (bit)
- Ο δέκτης από τους λαμβανόμενους παλμούς ανακτά τη ψηφιακή ακολουθία συμβόλων και ανακατασκευάζει το αναλογικό σήμα μέσω μετατροπέα D/A

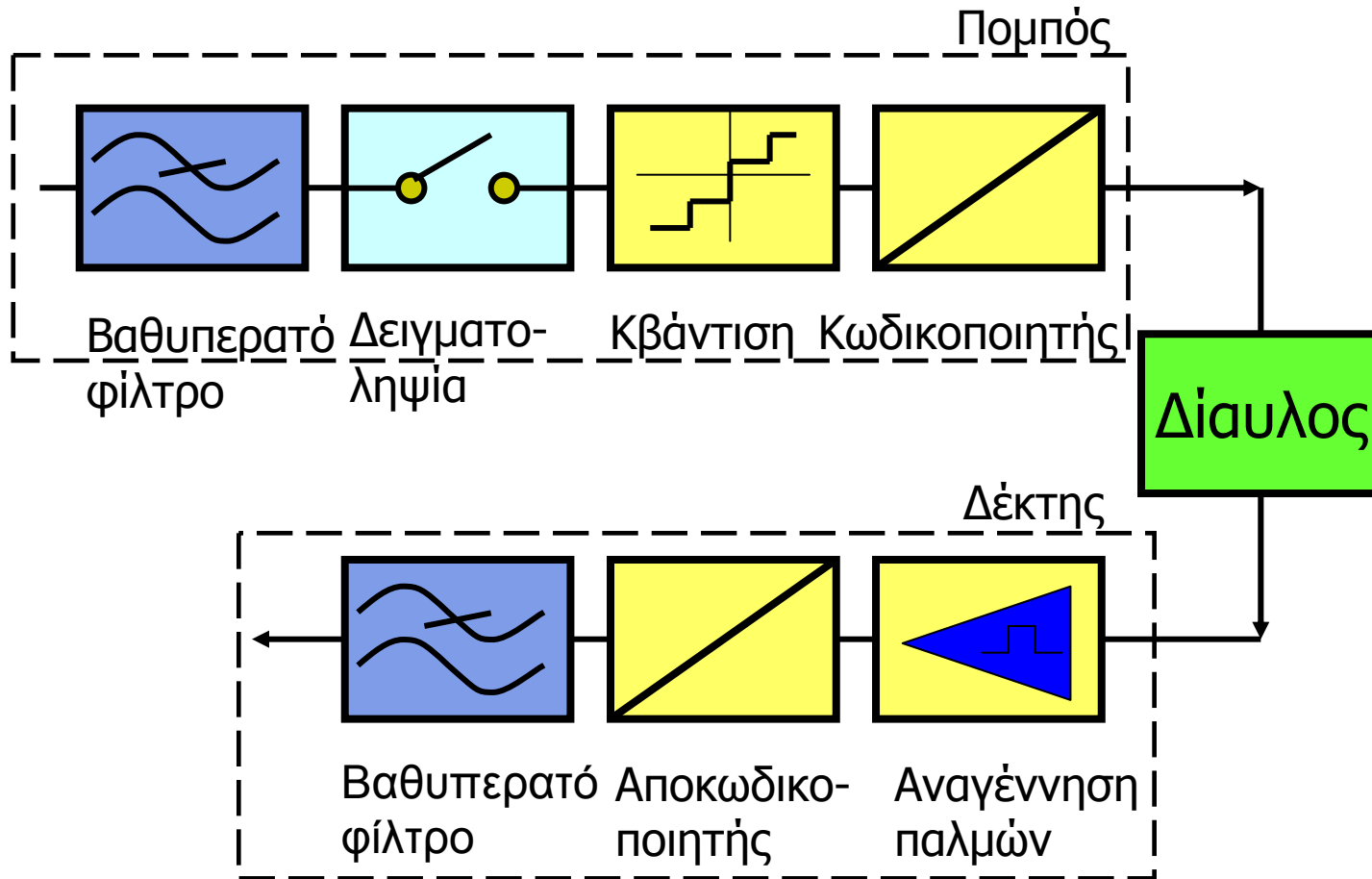
Ιστορικό

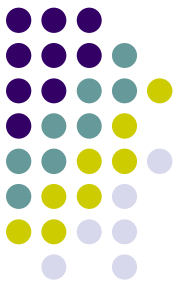


- Δοκιμάσθηκε για πρώτη φορά το 1948 στα Bell Labs για τη μετάδοση αναλογικού σήματος φωνής 4 kHz ως ψηφιακού σήματος 64 kbps
- Σε συνδυασμό με TDM, η PCM άρχισε να χρησιμοποιείται στο τηλεφωνικό σύστημα
 - 1962 στις ΗΠΑ: 24 κανάλια φωνής σε φορέα 1,5 Mbps
 - 1969 στην Ευρώπη, 30 κανάλια φωνής σε φορέα 2 Mbps
- Η PCM διευκολύνει τη ψηφιακή μετάδοση από σημείο σε σημείο (σε σειρά ζεύξεων)
- Εκτός από την τηλεφωνία, η PCM χρησιμοποιείται στον ψηφιακό ήχο σε προσωπικούς υπολογιστές και στα CD (δεν συνηθίζεται στα DVD)



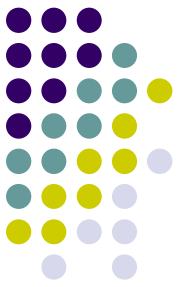
Δομικό διάγραμμα PCM



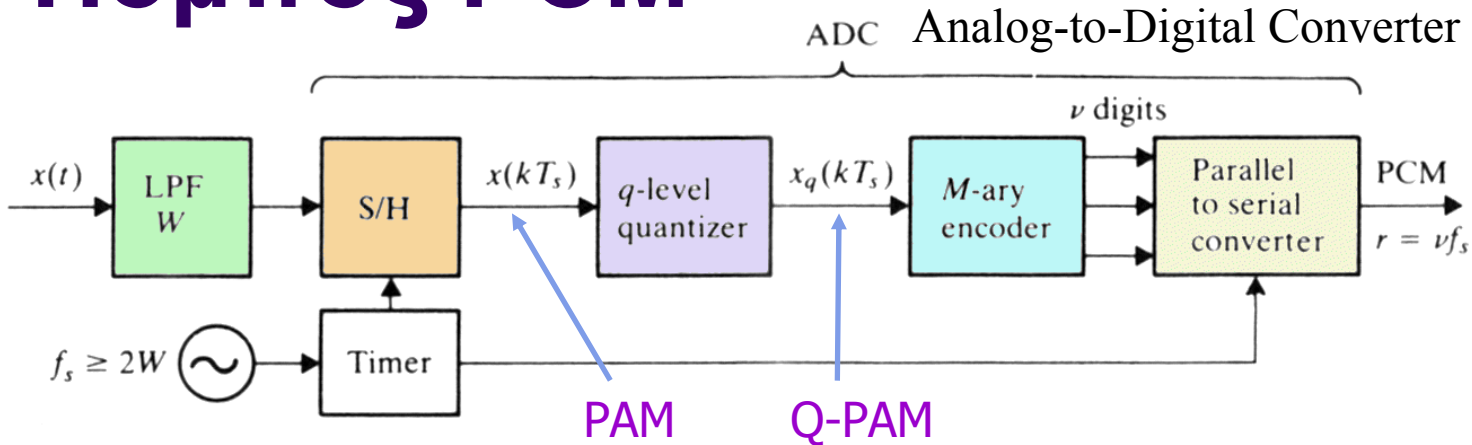


Λειτουργία πομπού PCM

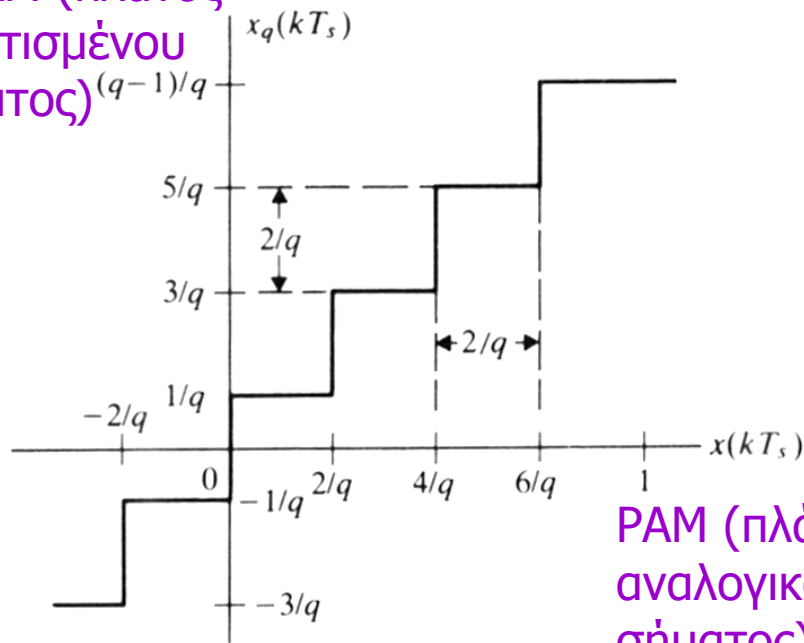
- Το αναλογικό σήμα $x(t)$ διέρχεται από βαθυπερατό φίλτρο και λαμβάνονται τα δείγματα $x(kT_s)$
- Ο κβαντιστής στρογγυλεύει το δείγμα $x(kT_s)$ στην πλησιέστερη διακριτή τιμή από ένα σύνολο q τιμών
 - Τα προκύπτοντα δείγματα $x_q(kT_s)$ είναι διακριτά στο χρόνο και στο πλάτος
- Ο κωδικοποιητής μετατρέπει τα κβαντισμένα δείγματα σε ψηφιακές κωδικές λέξεις των ν bit χρησιμοποιώντας M -κη σηματοδότηση



Πομπός PCM



Q-PAM (πλάτος κβαντισμένου σήματος)



M : σύμβολα

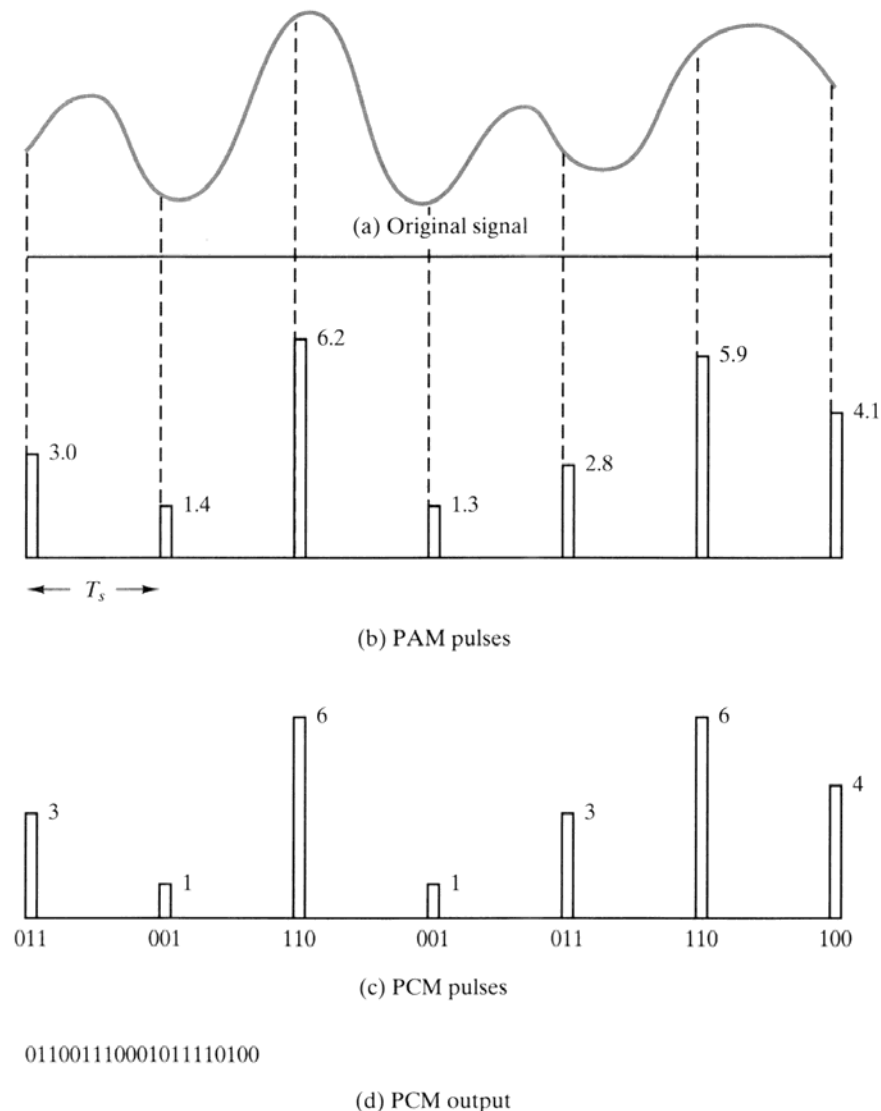
q : στάθμες κβαντισμού

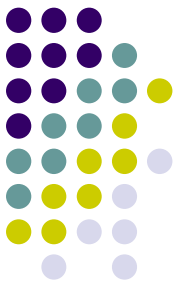
ν : αριθμός bit

r : ρυθμός εξόδου

Κβάντιση

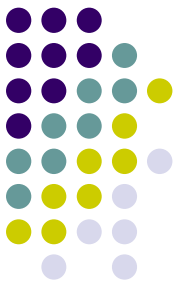
- Το σήμα έχει συνεχείς τιμές εντός της δυναμικής του περιοχής
- Το σήμα PAM έχει συνεχείς τιμές σε διακριτές χρονικές στιγμές
- Το κβαντισμένο σήμα Q-PAM έχει πεπερασμένες τιμές (εδώ οι λέξεις 3 bit)





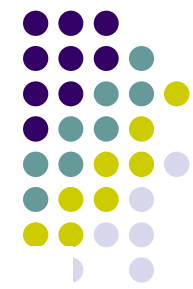
Πομπός PCM

- Οι παράμετροι M , v και q επιλέγονται ώστε να ικανοποιούν τη σχέση
$$q = M^v \Leftrightarrow v = \log_M q$$
 - Για δυαδική σηματοδότηση $M=2$ οπότε $q=2^v$
- Ο ρυθμός σηματοδότησης είναι $r=vf_s$ με $f_s \geq 2W$

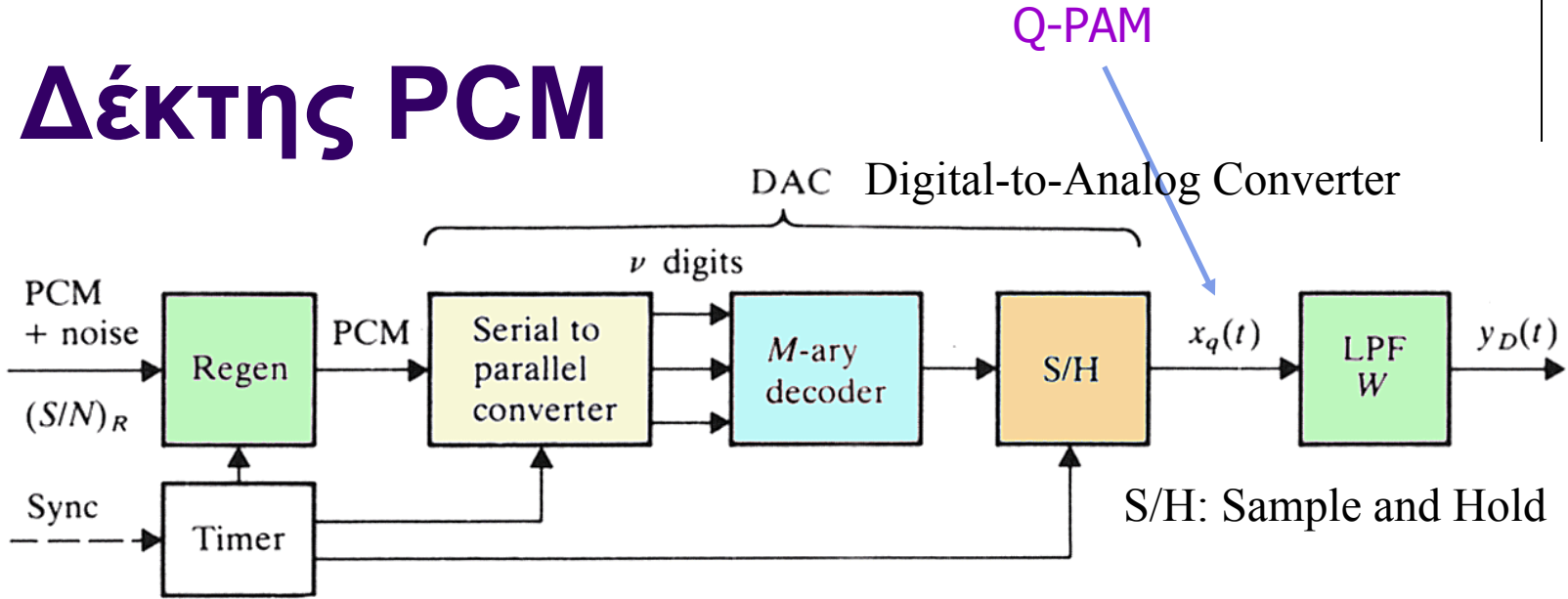


Λειτουργία δέκτη PCM

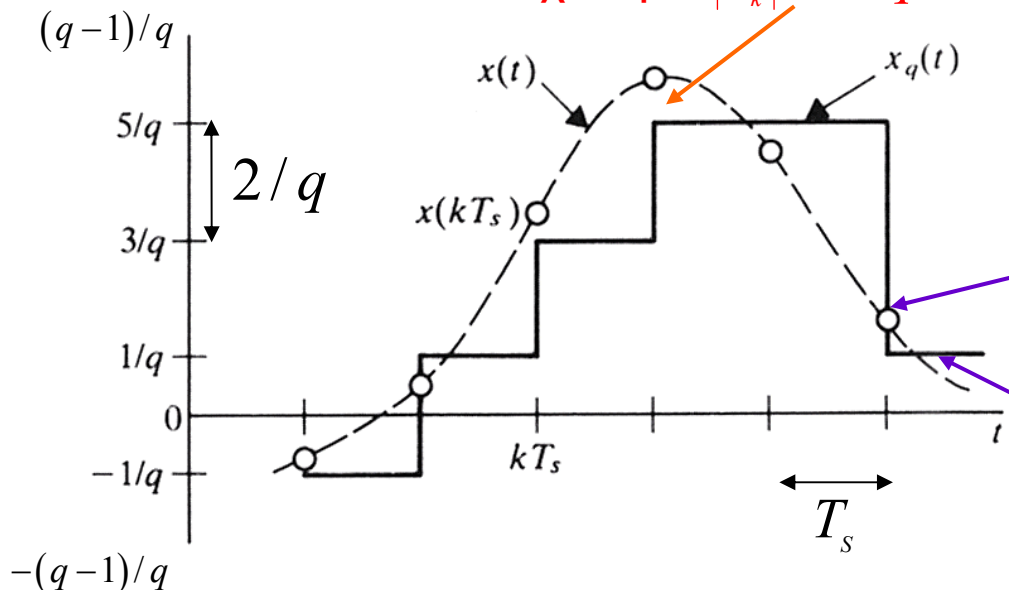
- Το λαμβανόμενο σήμα περιέχει θόρυβο, αλλά ο αναγεννητής παράγει μια καθαρή μορφή χωρίς λάθη εάν η σηματοθορυβική σχέση είναι μεγάλη
- Ο μετατροπέας ψηφιακού προς αναλογικό (DAC)
 - Μετατρέπει τα σειριακά σύμβολα σε παράλληλα
 - Αποκωδικοποιεί τα M -κα σύμβολα
 - Παράγει την αναλογική κυματομορφή $x_q(t)$ μέσω κυκλώματος S/H
- Η $x_q(t)$ είναι μια κλιμακωτή (staircase) προσέγγιση του σήματος πληροφορίας $x(t)$
- Το βαθυπερατό φίλτρο την εξομαλύνει παράγοντας το σήμα $y_D(t)$
 - Που διαφέρει από το σήμα πληροφορίας στο ποσοστό που τα κβαντισμένα δείγματα διαφέρουν από τα πραγματικά



Δέκτης PCM



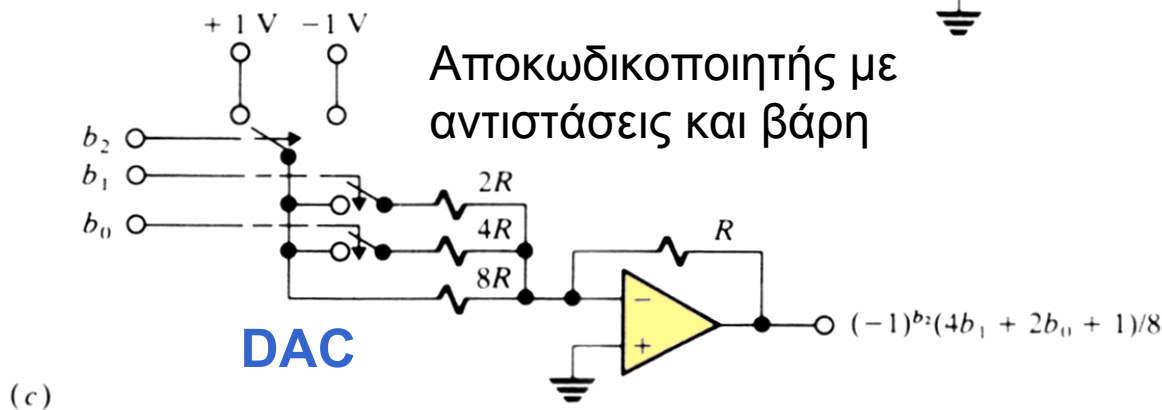
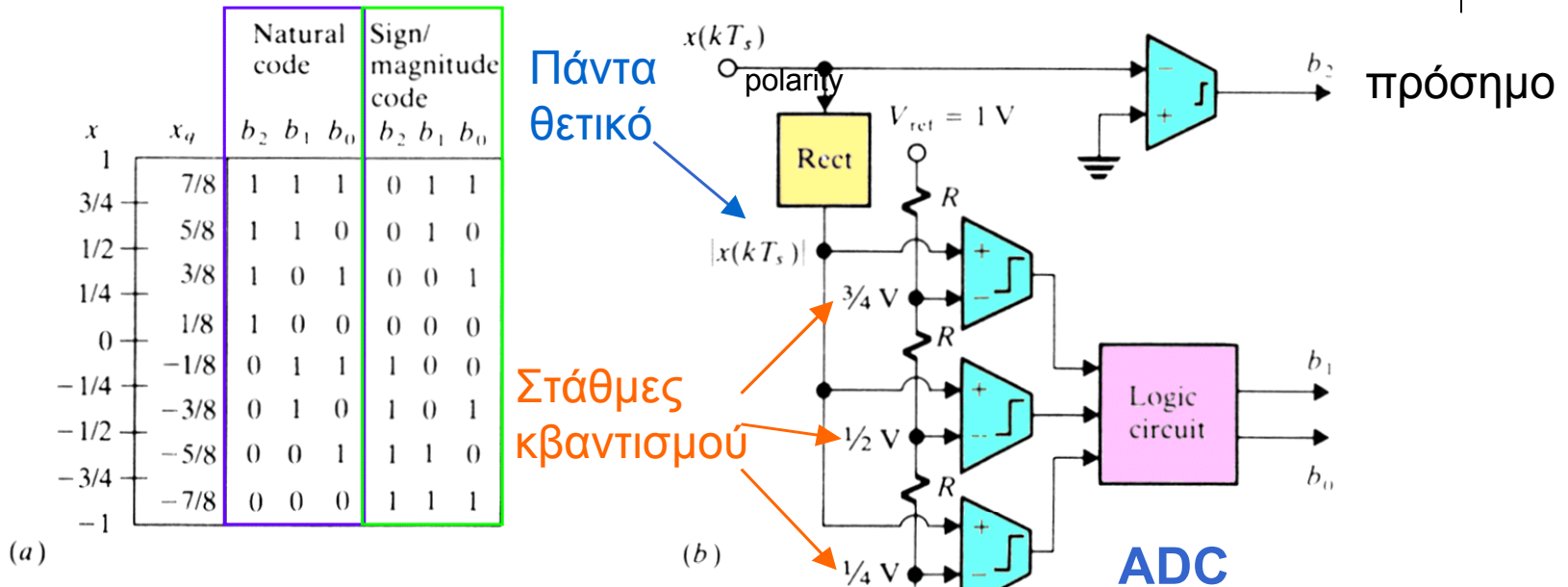
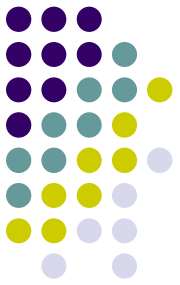
Το σφάλμα κβαντισμού έχει όριο $|\epsilon_k| \leq 1/q$



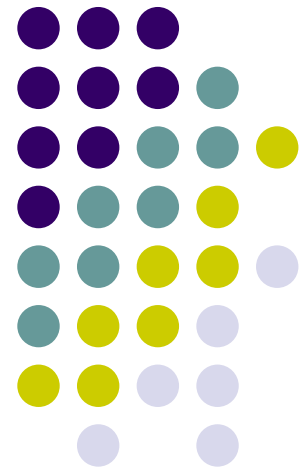
PAM (πλάτος αναλογικού σήματος)

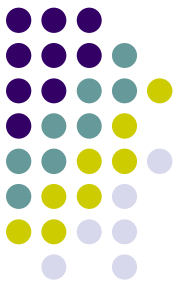
Q-PAM (πλάτος κβαντισμένου σήματος)

Κωδικοποίηση, αποκωδικοποίηση PCM ($\nu=3$)



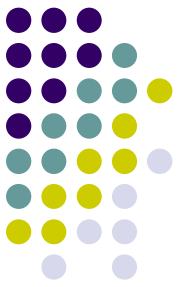
Μετάδοση σήματος PCM





Συγχρονισμός

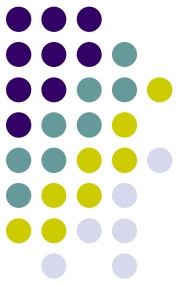
- Όπως σε όλα τα συστήματα TDM, απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη
- Εάν τα ρολόγια στον πομπό και τον δέκτη διαφέρουν, αυτό θα οδηγήσει σε παραμορφώσεις του σήματος
- Στην PCM ο χρονισμός στον δέκτη εξάγεται από το λαμβανόμενο σήμα
 - Το φάσμα του συρμού των λαμβανόμενων παλμών περιέχει τη συχνότητα του ρολογιού



Κωδικοποίηση γραμμής

- Η κωδικοποίηση γραμμής χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των ψηφιακών συμβόλων στη βασική ζώνη (baseband)
- Διευκολύνει την ανάκτηση του ρολογιού και τον συγχρονισμό του δέκτη
- Η κωδικοποίηση γραμμής πρέπει
 - να μην οδηγεί σε μακριές σειρές από μηδενικά, που θα αποσυγχρονίσουν τον δέκτη
 - να μη δημιουργεί συνιστώσα DC
 - να απαιτεί μικρό εύρος ζώνης

Κωδικοποίηση γραμμής στην PCM

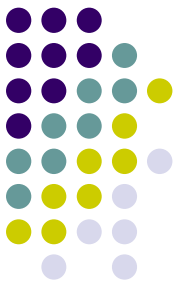


- Η PCM χρησιμοποιεί κάποια παραλλαγή της AMI ως κωδικοποίηση γραμμής
 - B8ZS, B6ZS ή B3ZS στη Β. Αμερική
 - HDB3 (High Density Bipolar) στην Ευρώπη

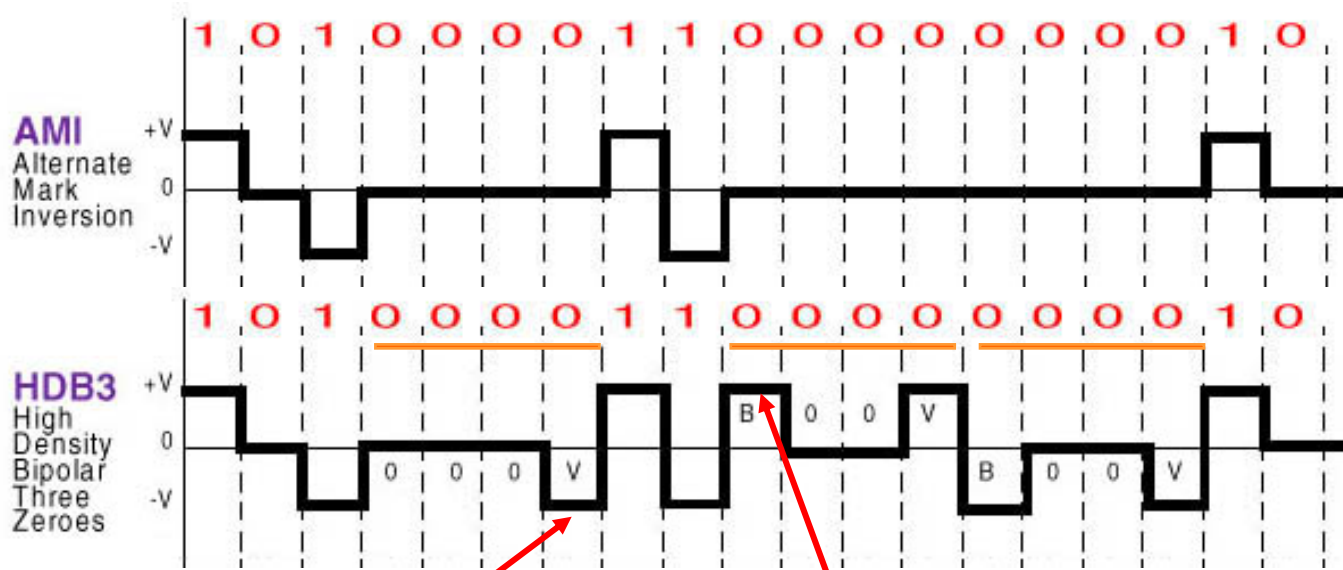
High Density Bipolar (HDB3)



- Παραλλαγή της AMI που μειώνει το μέγιστο αριθμό συνεχόμενων 0 στο τρία
- Η βασική ιδέα είναι η αντικατάσταση τεσσάρων μηδενικών 0000 με τις κωδικές λέξεις "000V" ή "B00V" όπου
 - "V" (violation) παλμός που παραβιάζει την κωδικοποίηση AMI
 - "B" (balancing) παλμός σύμφωνος με την AMI που ώστε διαδοχικοί παλμοί V να έχουν αντίθετη πολικότητα
- Η κωδική λέξη "000V" χρησιμοποιείται όταν η συνιστώσα DC μέχρι τον προηγούμενο παλμό είναι 0
- Η κωδική λέξη "B00V" χρησιμοποιείται όταν υπάρχει συνιστώσα DC

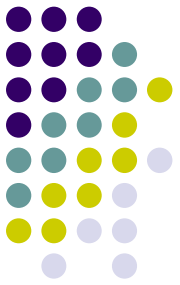


High Density Bipolar (HDB3)

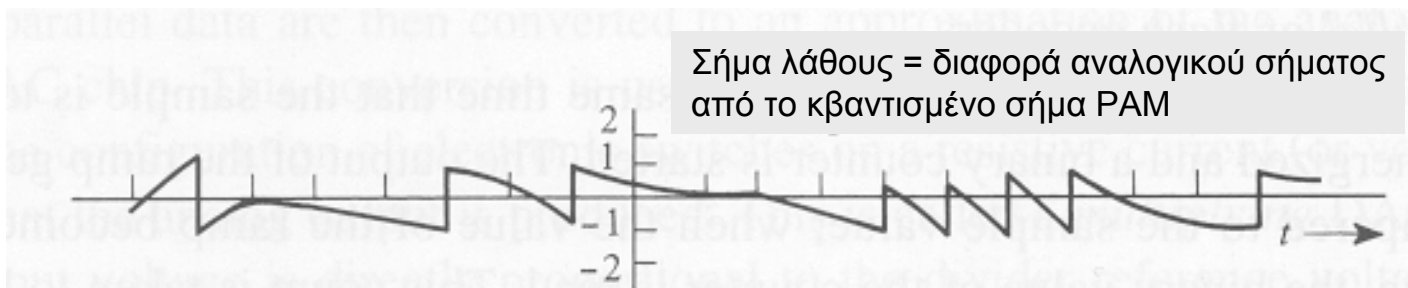
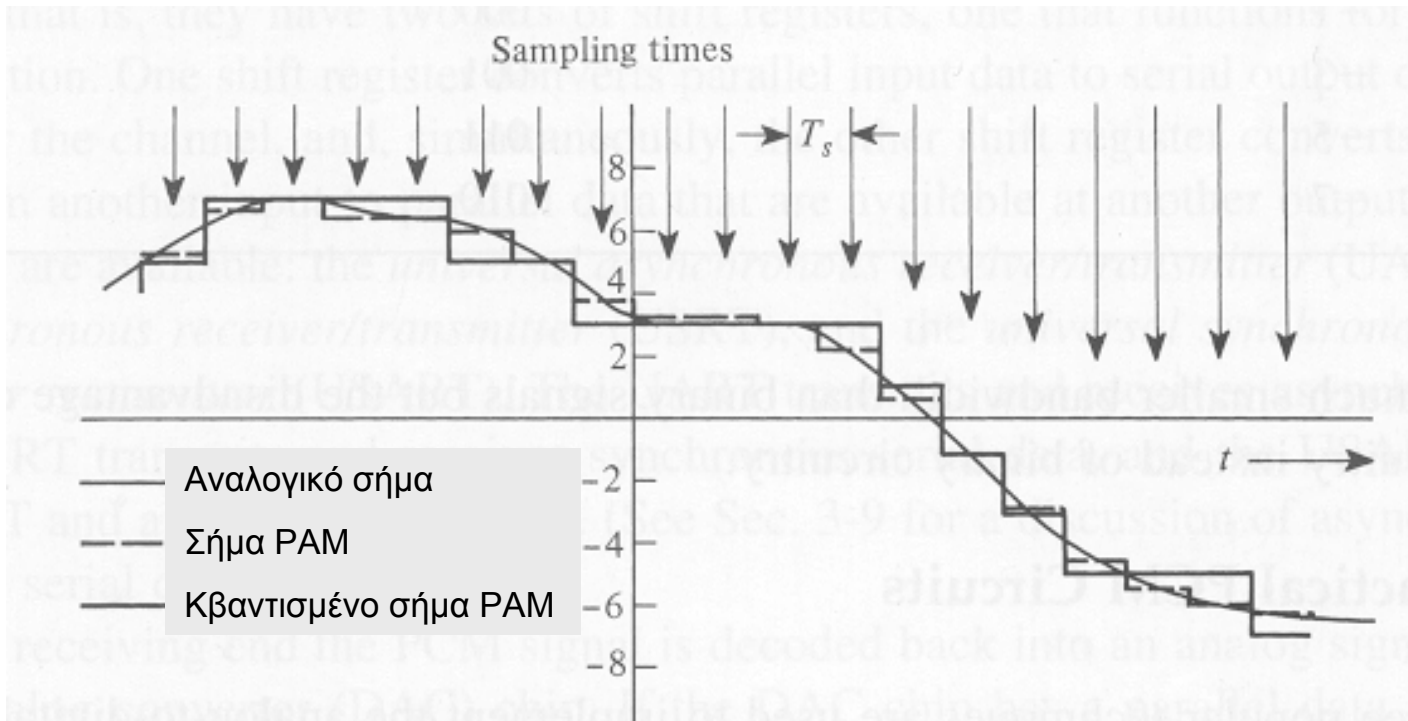


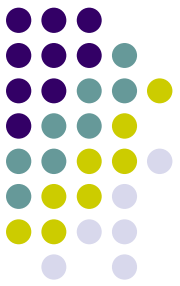
Παραβίαση
κώδικα

Παλμός
αντιστάθμισης



Κυματομορφές PCM



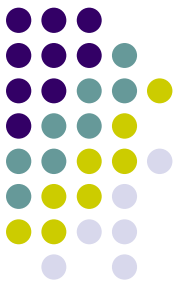


Εύρος ζώνης μετάδοσης

- Το (διαμορφωμένο) σήμα PCM όταν μεταδίδεται μέσω του διαύλου είναι ένα σήμα συνεχούς χρόνου και έχει το δικό του εύρος ζώνης
- Το εύρος ζώνης μετάδοσης ικανοποιεί τη σχέση

$$B_T \geq \frac{r}{2} = \frac{\nu f_s}{2}$$
$$\geq \nu W$$

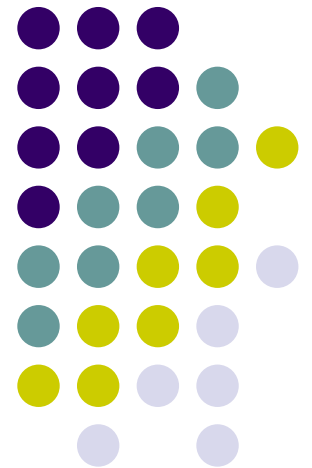
- Το εύρος ζώνης μετάδοσης είναι **τουλάχιστον $\nu = \log_M q$ φορές μεγαλύτερο** του εύρους ζώνης του σήματος!

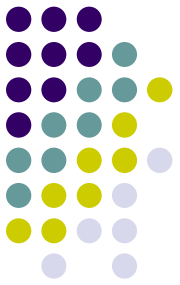


Εύρος ζώνης μετάδοσης

- Το εύρος ζώνης εξαρτάται τόσο από το ρυθμό μετάδοσης r όσο και από την κωδικοποίηση γραμμής
 - Εάν χρησιμοποιηθούν παλμοί sinc, τότε $B_T = r/2$
 - Εάν χρησιμοποιηθούν τετραγωνικοί παλμοί, τότε $B_T = r$
- Για δειγματοληψία στο ρυθμό Nyquist $f_s = 2W$
 - Κατώτερο όριο εύρος ζώνης $B_T = vW$
 - Για τετραγωνικούς παλμούς $B_T = 2vW$
- Στην πράξη $vW < B_T < 2vW$

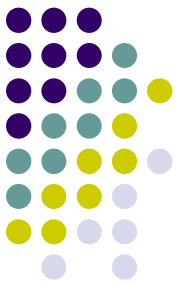
Κβάντιση





Θόρυβος κβαντισμού

- Ακόμη και χωρίς θόρυβο η τέλεια αναπαραγωγή του σήματος πληροφορίας είναι αδύνατη λόγω του κβαντισμού που υφίστανται τα δείγματα
 - Ο μετατροπέας ADC εισάγει μόνιμα λάθη που εμφανίζονται ως **θόρυβος κβαντισμού** κατά την αποδιαμόρφωση



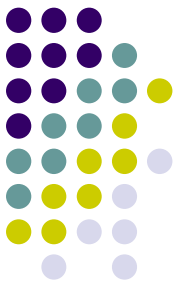
Σφάλμα κβαντισμού

- Για την ανάλυση είναι βολικότερο να αναπαρασταθεί το σήμα PCM ως τραίνο παλμών (συναρτήσεις δέλτα) αντί ως κλιμακωτή προσέγγιση (ορθογωνικοί παλμοί)

$$x_{\delta}(t) = \sum_k [x(kT_s) + \varepsilon_k] \delta(t - kT_s)$$

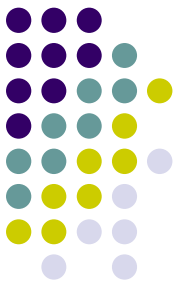
- Το σφάλμα κβαντισμού είναι η διαφορά μεταξύ των κυματομορφών Q-PAM και PAM

$$\varepsilon_k = x_q(kT_s) - x(kT_s)$$



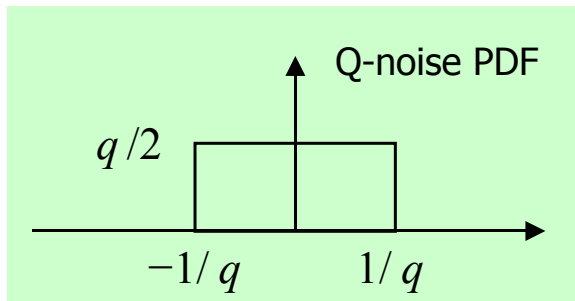
Θόρυβος κβαντισμού

- Η έξοδος του βαθυπερατού φίλτρου είναι
$$y_D(t) = x(t) + \sum_k \varepsilon_k \text{sinc}(f_s t - k)$$
και έχει τη μορφή σήματος με προσθετικό θόρυβο
- Για μεγάλο πλήθος σταθμών q τα σφάλματα κβαντισμού είναι ασυσχέτιστα και ανεξάρτητα του σήματος πληροφορίας $x(t)$
- Το σφάλμα κβαντισμού μπορεί να ειδωθεί ως θόρυβος με ισχύ τη μέση τετραγωνική τιμή
$$\overline{\varepsilon_k^2}$$



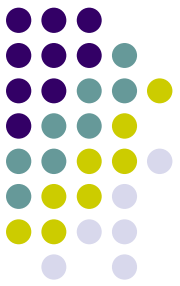
Ισχύς θορύβου κβαντισμού

- Με ισαπέχοντα βήματα, το σφάλμα κβαντισμού μπορεί να θεωρηθεί ως ομοιόμορφα κατανομημένη τυχαία μεταβλητή στο διάστημα $|\varepsilon_k| \leq 1/q$



- οπότε η ισχύς του θορύβου κβαντισμού είναι

$$\overline{\sigma_q^2} = \overline{\varepsilon_k^2} = \frac{q}{2} \int_{-1/q}^{1/q} \varepsilon^2 d\varepsilon = \frac{1}{3q^2}$$



Σηματοθρομβική σχέση εξόδου

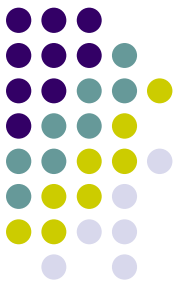
- Η ισχύς του σήματος πληροφορίας στην έξοδο του δέκτη PCM είναι

$$S_D = \overline{x^2} = S_x \leq 1$$

- Η σηματοθρομβική σχέση στην έξοδο ορίζεται ως η ισχύς του σήματος προς την ισχύ του θορύβου κβαντισμού

$$SNR_o = \frac{S_x}{\sigma_q^2} = 3q^2 S_x$$

Σηματοθορυβική σχέση εξόδου



- Επειδή $q=2^v$, εκφράζοντας τη σηματοθορυβική σχέση σε db

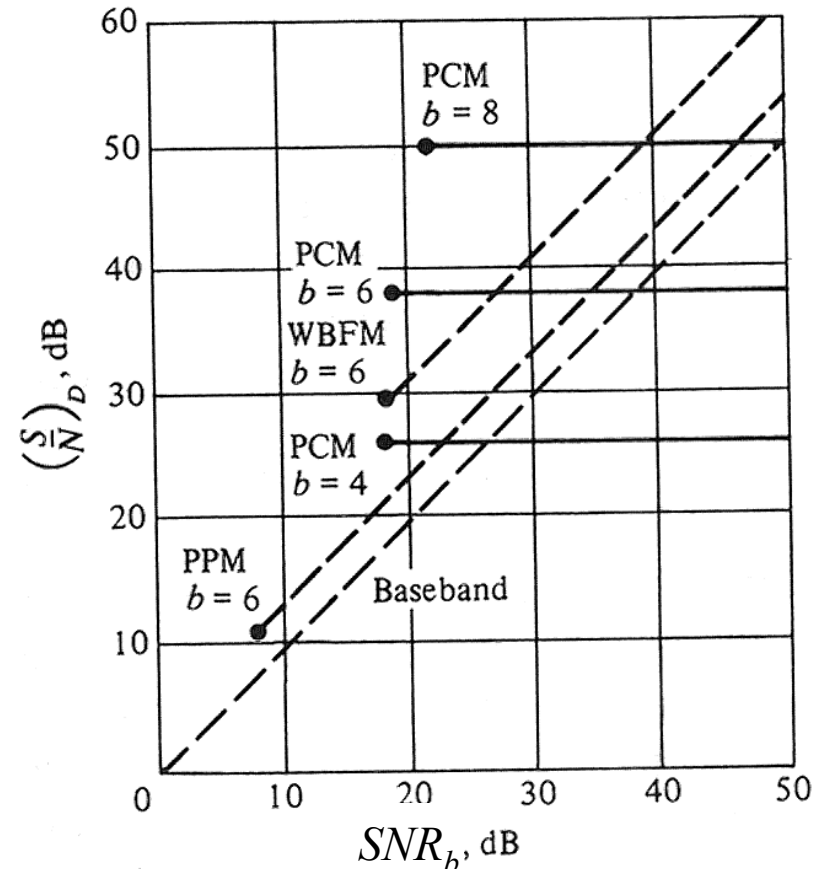
$$\begin{aligned} SNR_o &= 10\log_{10}(3 \cdot 2^{2v} S_x) \\ &= 4.8 + 6.0v + 10\log_{10}(S_x) \\ &\leq 4.8 + 6.0v \quad \text{dB} \end{aligned}$$

με την ισότητα να ισχύει για $S_x=1$

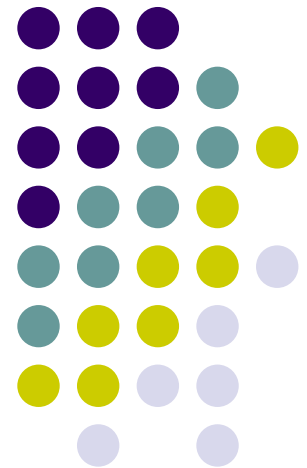
Σηματοθορυβική σχέση εξόδου



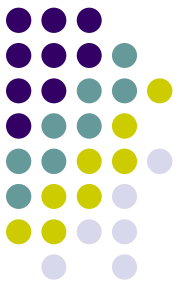
- Η σηματοθορυβική σχέση είναι σταθερή ανεξάρτητη της SNR_b
 - Όσο δεν υπάρχουν λάθη μετάδοσης
 - Φαινόμενο κατωφλίου
- Βελτιώνεται όσο αυξάνει το ν
- Είναι καλύτερη της FM και PPM για χαμηλές ισχύεις (μικρές SNR_b)



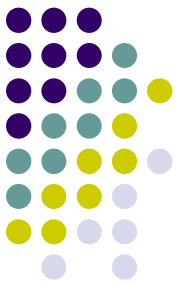
Μη ομοιόμοφη κβάντιση



Σηματοθρομβική σχέση εξόδου

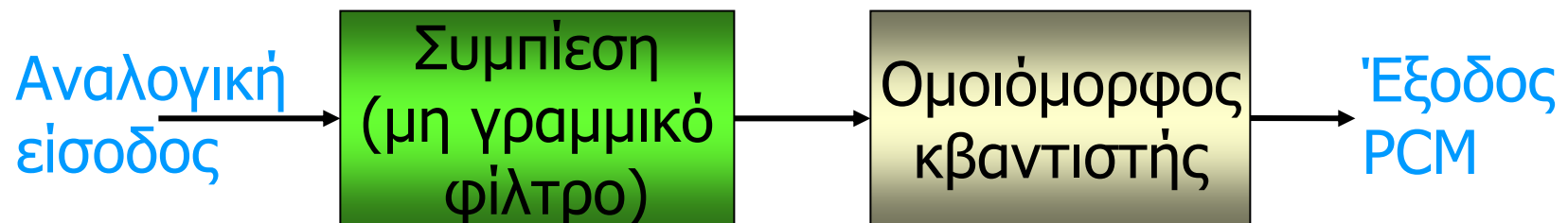


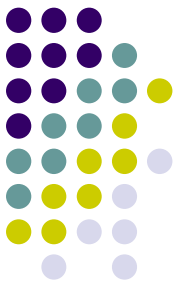
- Για συστήματα PCM φωνής έχουμε $v=8$, και $SNR_o \leq 52,8 \text{ db}$
- Για μουσική ο λόγος $|x(t)|_{\max} / \sigma_x$ είναι μεγάλος επομένως $S_x = \sigma_x^2 \ll 1$
 - Σε συστήματα ήχου HiFi $v=14$, αλλά $SNR_o \approx 60 \text{ db}$ αντί του ορίου $88,8 \text{ db}$
 - Τα ισχυρά σήματα κβαντίζονται με περιττή περίσσεια
 - Τα ασθενή σήματα κβαντίζονται ανεπαρκώς
- Αντί αύξησης των σταθμών κβαντισμού → **μη ομοιόμορφη** κβάντιση



Μη γραμμικοί κβαντιστές

- Αντιμετώπιση του δυναμικού εύρους σημάτων
- Διατήρηση του εύρους ζώνης
- Υλοποίηση με συμπίεση του σήματος ακολουθούμενη από ομοιόμορφη κβάντιση
- compander = compressor – expander
 - Συμπιέζει το σήμα πριν την κβάντιση, αποσυμπιέζει μετά την αποκωδικοποίηση





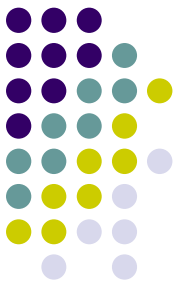
Συμπίεση-Αποσυμπίεση

- Για σήματα φωνής σε συστήματα τηλεφωνίας στην PCM χρησιμοποιούνται συμπίεστές
 - Νόμου μ (μ -law) στις ΗΠΑ και Ιαπωνία

$$y = \frac{\ln(1 + \mu|x|)}{\ln(1 + \mu)} \operatorname{sgn}(x), \quad |x| \leq 1$$

- Νόμου A (A-law) στην Ευρώπη

$$y = \begin{cases} \frac{A|x|}{1 + \ln A} \operatorname{sgn}(x), & |x| < 1/A \\ \frac{1 + \ln(A|x|)}{1 + \ln A} \operatorname{sgn}(x), & 1/A \leq |x| \leq 1 \end{cases}$$



Συμπίεση-Αποσυμπίεση

- Η αποσυμπίεση είναι η αντίστροφη πράξη της συμπίεσης
 - Νόμου μ (μ -law)

$$x = \frac{(1 + \mu)^{|y|} - 1}{\mu} \operatorname{sgn}(y), \quad |y| \leq 1$$

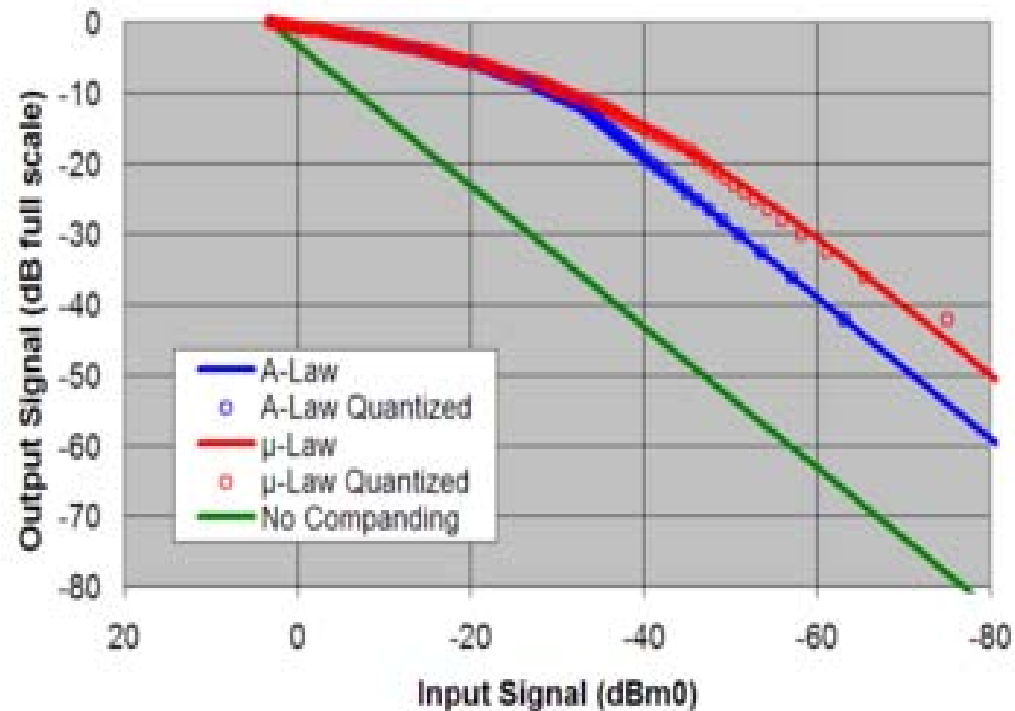
- Νόμου A (A -law)

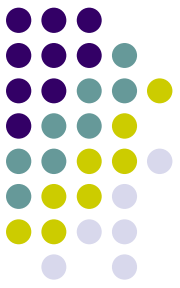
$$x = \operatorname{sgn}(x) \begin{cases} |y| \frac{1 + \ln A}{A}, & |y| < \frac{1}{1 + \ln A} \\ \frac{\exp(|y|(1 + \ln A - 1))}{A} & \frac{1}{1 + \ln A} \leq |y| < 1 \end{cases}$$

Επίδοση PCM με συμπίεση/αποσυμπίεση



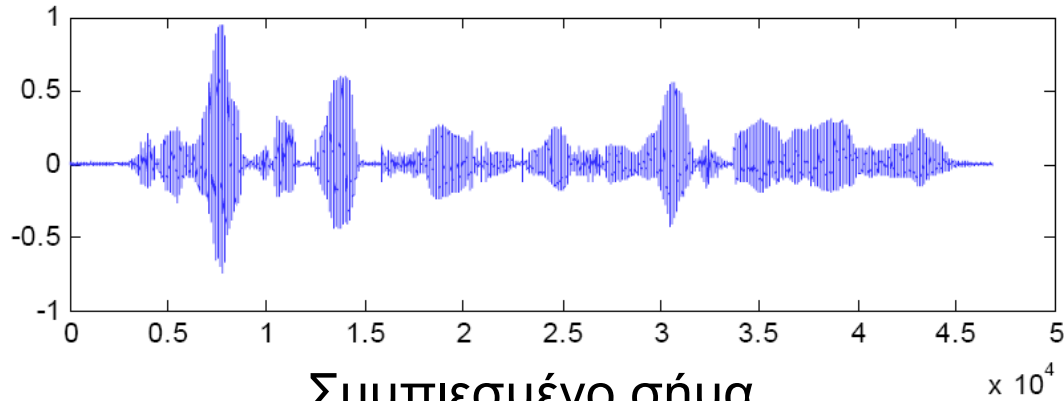
- Με τη συμπίεση μειώνεται το δυναμικό εύρος του σήματος και έτσι αυξάνεται η αποδοτικότητα της κωδικοποίησης
- Το αποτέλεσμα είναι καλύτερος λόγος σήματος προς παραμόρφωση σε σχέση με ομοιόμορφη κβάντιση για δεδομένο αριθμό bit



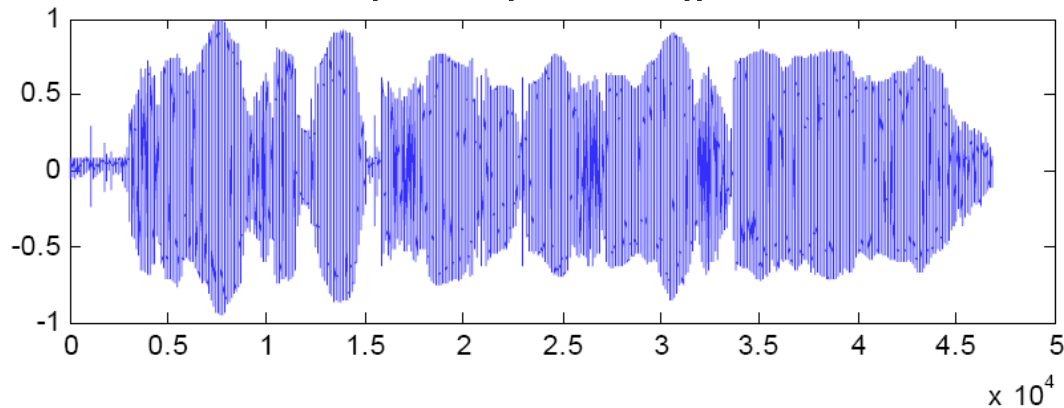


Παράδειγμα συμπίεσης

Αρχικό σήμα ήχου

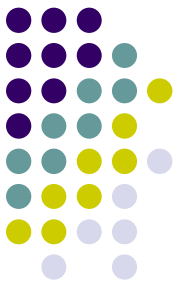


Συμπιεσμένο σήμα

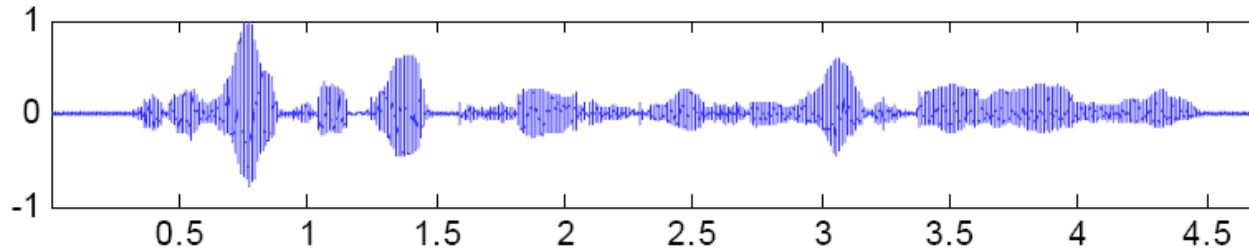


- Το μέγιστο πλάτος του σήματος παραμένει το ίδιο!
- Ποιο από τα δύο είναι πιο ανθεκτικό στο θόρυβο;

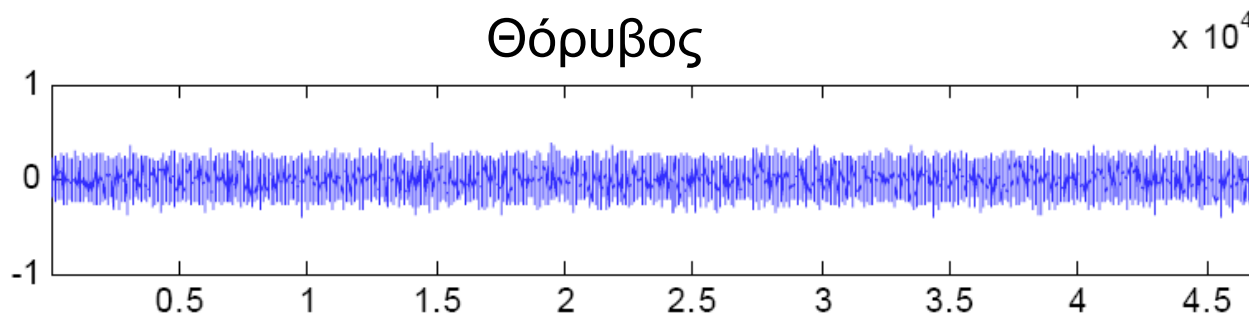
Μετάδοση χωρίς συμπίεση



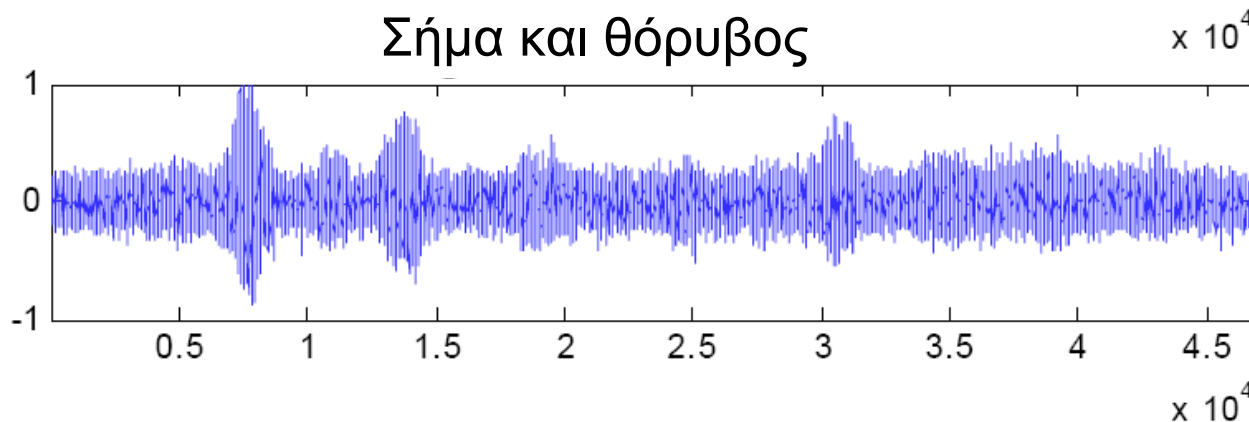
Αρχικό σήμα ήχου



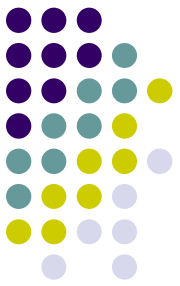
Θόρυβος



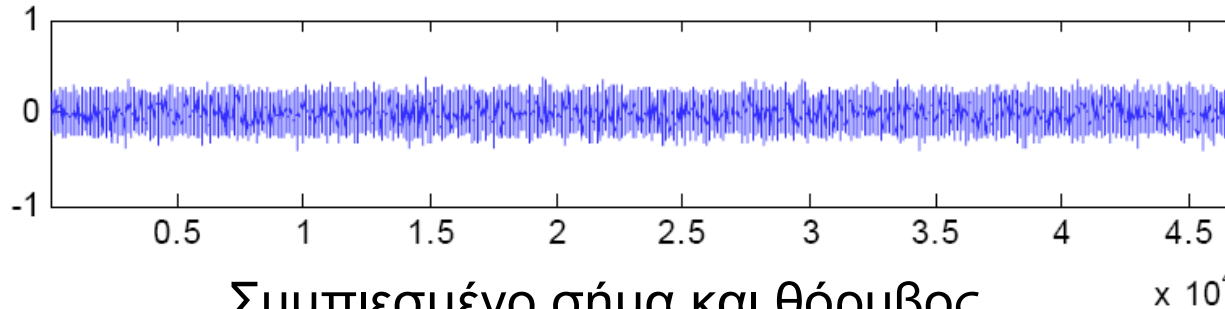
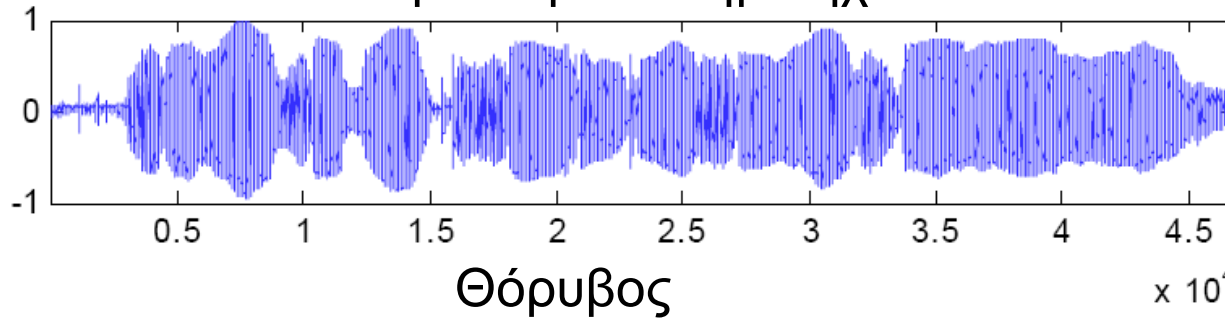
Σήμα και θόρυβος



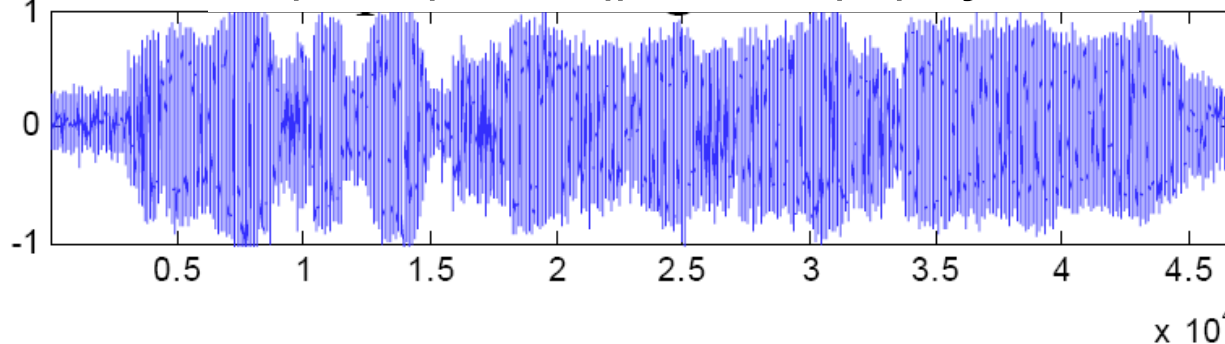
Μετάδοση με συμπίεση



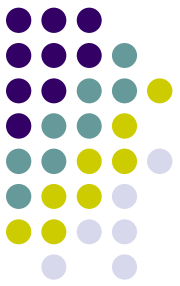
Συμπιεσμένο σήμα ήχου



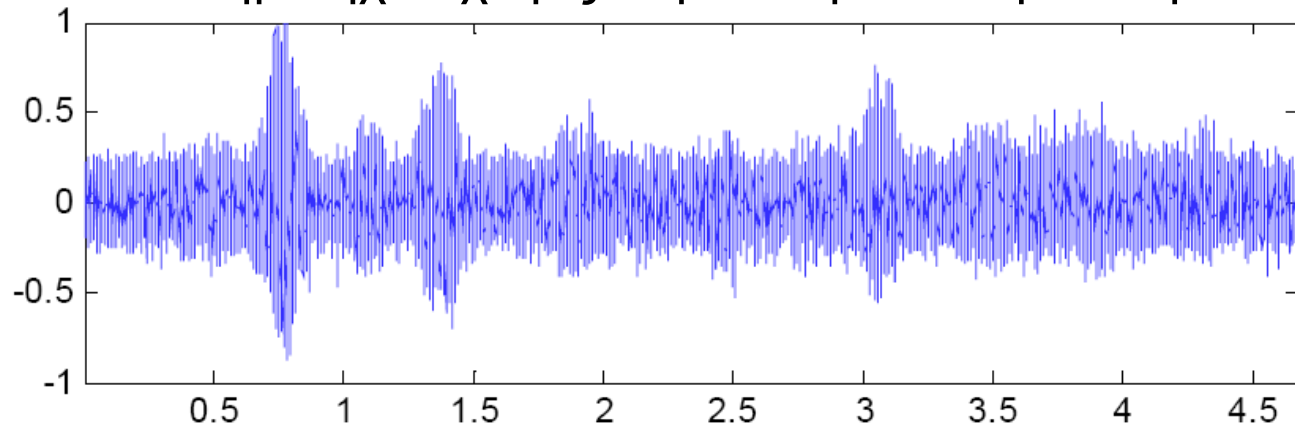
Συμπιεσμένο σήμα και θόρυβος



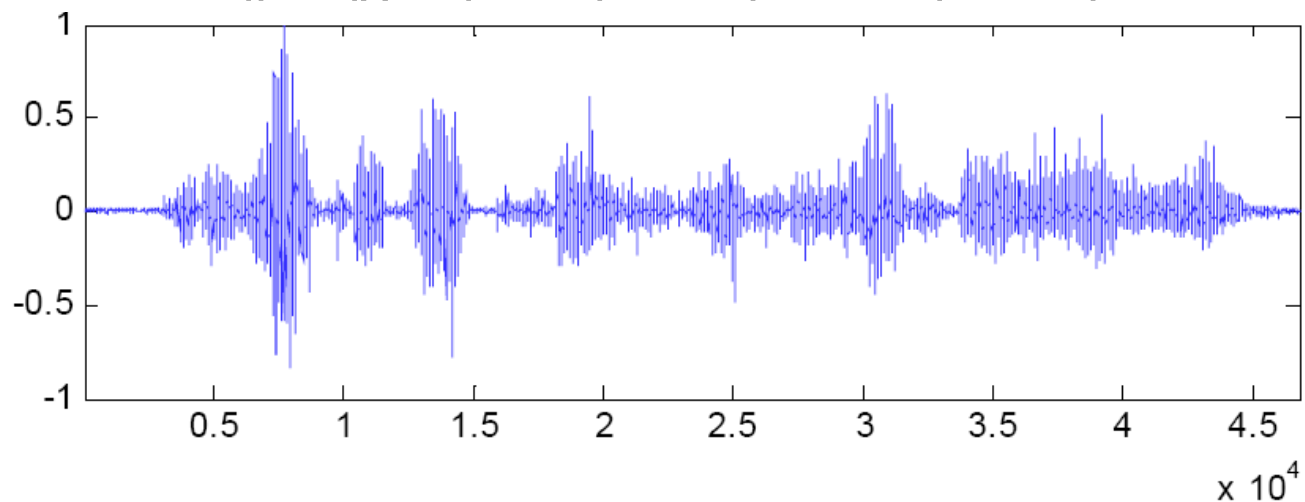
Μετά την αποσυμπίεση



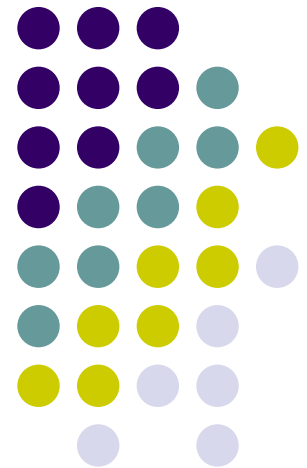
Σήμα ήχου χωρίς συμπίεση/αποσυμπίεση

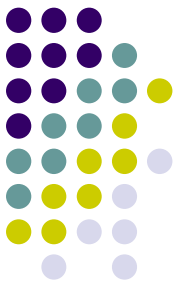


Σήμα ήχου με συμπίεση/αποσυμπίεση



Θόρυβος κατά τη μετάδοση





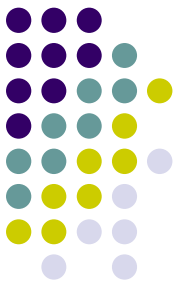
PCM και θόρυβος διαύλου

- Ο θόρυβος στον δίαυλο αλλοιώνει τις τιμές των κωδικών λέξεων
 - Λάθη σε bit
- Η επίδραση του θορύβου είναι μεγαλύτερη στα πιο σημαντικά bit
- Για το bit τάξης m έχουμε αλλαγή 2^m σταθμών κβαντισμού ύψους $2/q$, άρα λάθος

$$\varepsilon_m = \pm(2/q)2^m$$

- Το μέσο τετραγωνικό λάθος είναι

$$\overline{\varepsilon_m^2} = \frac{4}{3\nu} \frac{q^2 - 1}{q^2} \approx \frac{4}{3\nu}$$



PCM και θόρυβος διαύλου

- Ο θόρυβος αποκωδικοποίησης είναι επομένως

$$\sigma_d^2 = \nu P_e \overline{\varepsilon_m^2} \approx \frac{4}{3} P_e$$

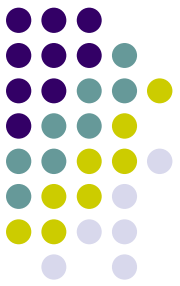
όπου P_e η πιθανότητα σφάλματος bit

- Η ισχύς θορύβου στην έξοδο είναι

$$N_D = \sigma_q^2 + \sigma_d^2 = \frac{1 + 4q^2 P_e}{3q^2}$$

- και η σηματοθορυβική σχέση γίνεται

$$SNR_o = \frac{3q^2}{1 + 4q^2 P_e} S_x$$

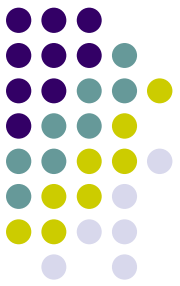


Κατώφλι

- Η επίδραση των σφαλμάτων bit εξαρτάται από την ποσότητα $4q^2 P_e$
- Έχουμε δύο ακραίες καταστάσεις

$$SNR_o \approx \begin{cases} 3q^2 S_x & P_e \ll 1/4q^2 \\ \frac{3S_x}{4P_e} & P_e \gg 1/4q^2 \end{cases}$$

- Εάν $P_e \leq 10^{-5}$ τα σφάλματα μετάδοσης είναι αμελητέα και η PCM λειτουργεί πάνω από το κατώφλι



Κατώφλι λαθών

- Λύνοντας την

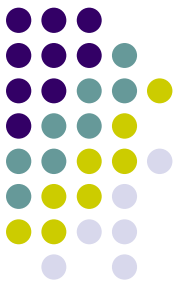
$$P_e = 2 \left(1 - \frac{1}{M} \right) Q \left[\sqrt{\frac{3}{M^2 - 1}} SNR_c \right] \leq 10^{-5}$$

λαμβάνουμε την ελάχιστη σηματοθορυβική σχέση διαύλου για λειτουργία χωρίς λάθη

$$SNR_{c,th} \approx 6(M^2 - 1)$$

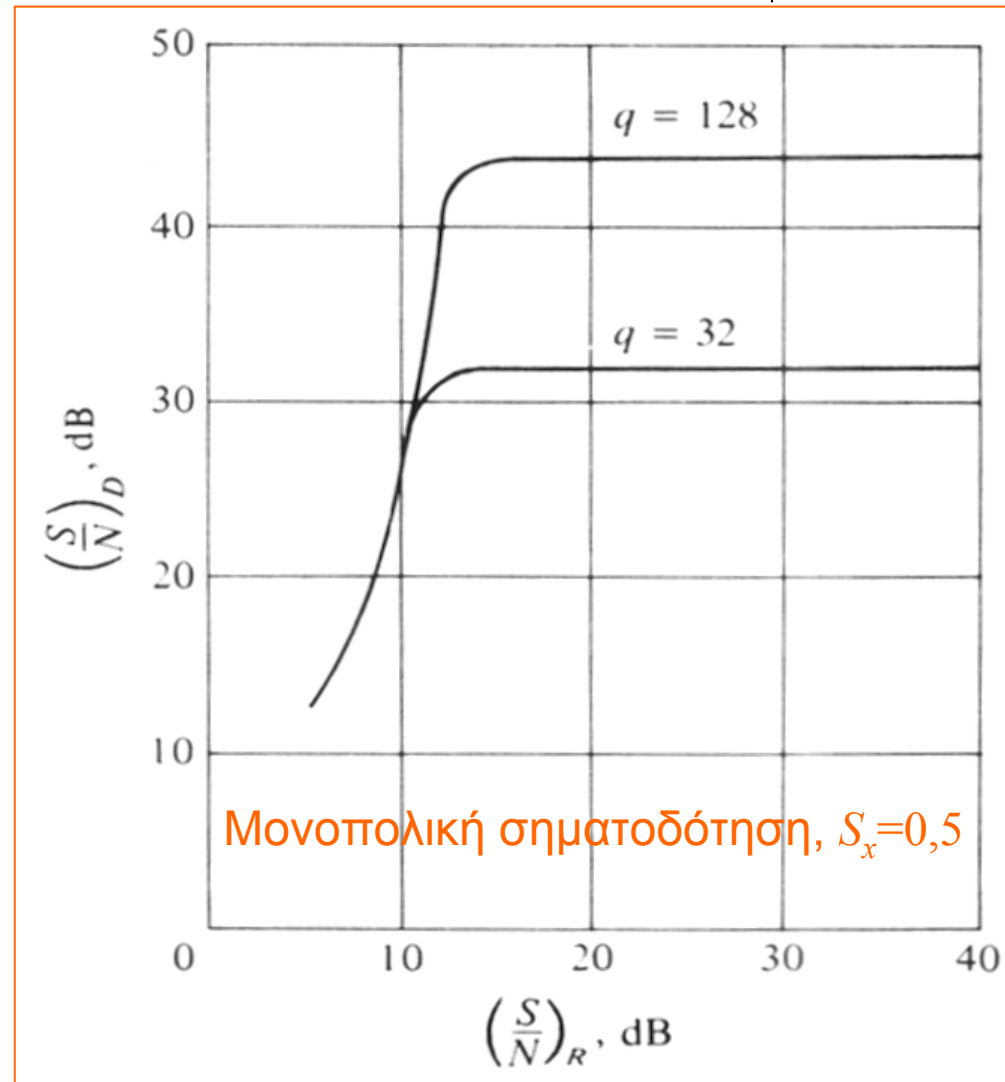
- και λαμβάνοντας υπόψη το εύρος ζώνης μετάδοσης

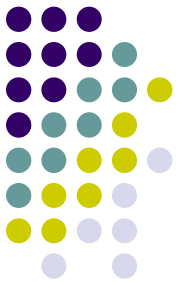
$$\begin{aligned} SNR_{b,th} &= (B_T / W) SNR_{o,th} \\ &\geq 6\nu(M^2 - 1) \end{aligned}$$



Φαινόμενο κατωφλίου PCM

- Η επίδοση της PCM παραμένει σταθερή μέχρις ότου η πιθανότητα σφάλματος μεγαλώσει
- Μετά έχουμε δραματική πτώση
 - Φαινόμενο κατωφλίου





Φαινόμενο κατώφλιου PCM

- Τα συστήματα PCM λειτουργούν κοντά στο κατώφλι με την **ελάχιστη** δυνατή ισχύ
 - Δεν υπάρχει κέρδος με αύξηση της SNR_c !
 - Η επίδοση καλυτερεύει μόνο με την αύξηση των σταθμών κβάντισης

Σύγκριση με αναλογικές διαμορφώσεις



- Η διαμόρφωση PCM, όταν λειτουργεί πάνω από το κατώφλι, έχει ιδιότητες καταστολής του θορύβου παρόμοιες με αυτές της FM και PPM
- Έστω ρυθμός Nyquist $r=B_T/2$, οπότε

$$B_T \approx \nu W \Rightarrow q = M^{\nu} \approx M^b$$

$$SNR_o = 3q^2 S_x \approx 3M^{2b} S_x$$

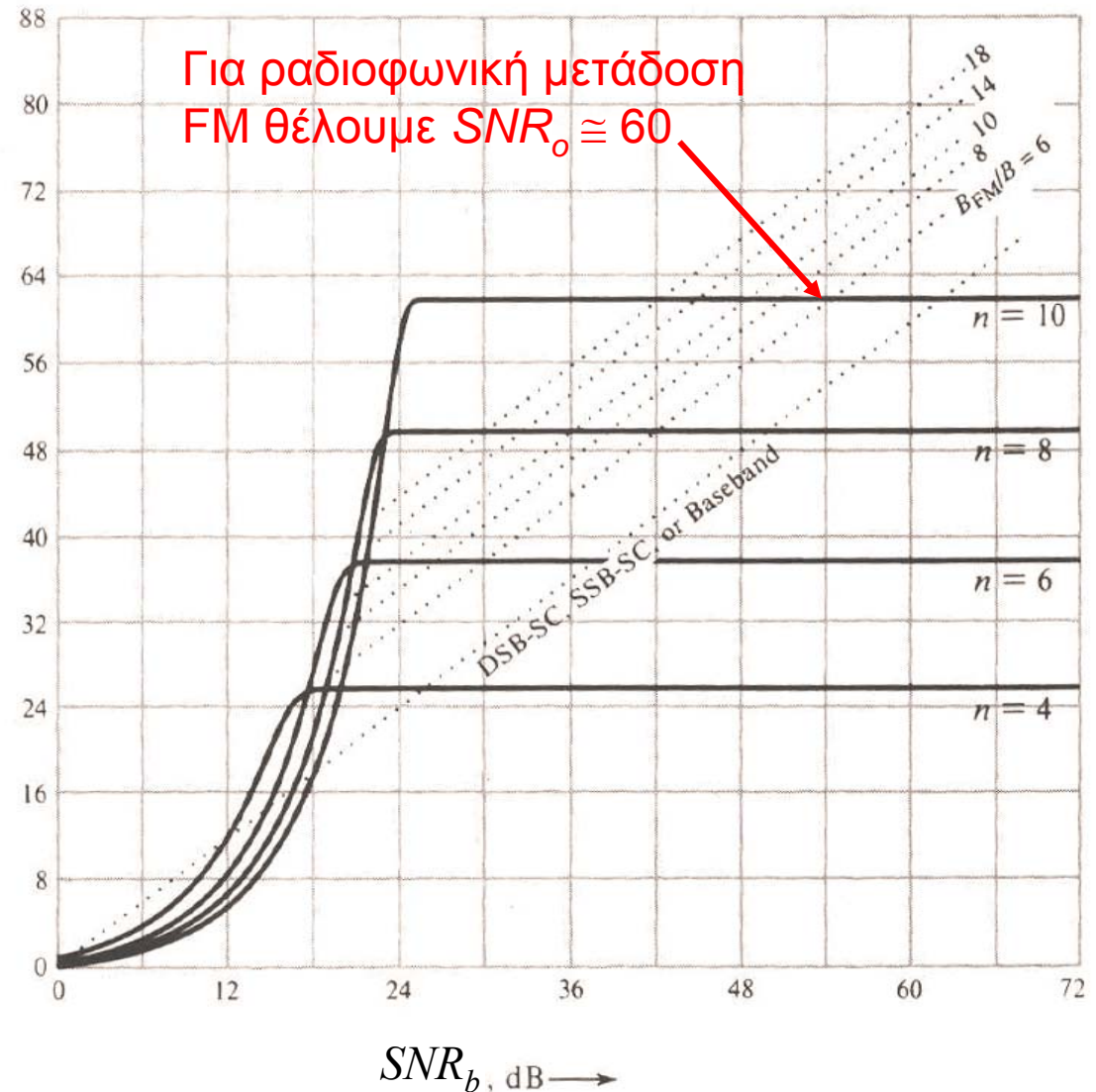
όπου $b=B_T/W$, δηλαδή, έχουμε **εκθετική** ανταλλαγή σηματοθορυβικής σχέσης προς εύρος ζώνης

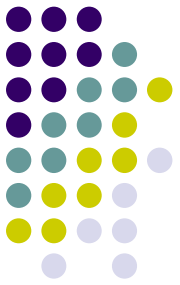
- προφανώς μειώνεται ο θόρυβος κβαντισμού
- ο θόρυβος μετάδοσης δεν επηρεάζει τη λειτουργία πάνω από το κατώφλι
- Στην FM, η ανταλλαγή αυτή είναι ανάλογη του b^2

Σύγκριση με αναλογικές διαμορφώσεις



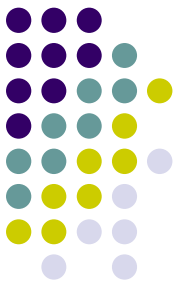
- Με PCM θέλουμε 10 bit και εύρος ζώνης $> 10 \times 15$ kHz
- Με FM έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα με $\beta=6$ και εύρος ζώνης 7×15 kHz
- **Γιατί η PCM είναι καλύτερη;**





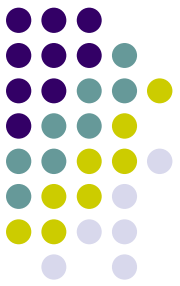
Πλεονεκτήματα PCM

- Ψηφιακή μετάδοση αναλογικών σημάτων
 - Πολυπλεξία
- Μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις
 - Αναγεννητικοί επαναλήπτες



Επαναλήπτες

- Στα συστήματα μετάδοσης PCM χρησιμοποιούνται **αναγεννητικοί επαναλήπτες (regenerative repeaters)**
- Ο αναγεννητικός επαναλήπτης ανιχνεύει τα bit στην είσοδο και αναγεννά το ψηφιακό σήμα στην έξοδο
- Εάν η πιθανότητα σφάλματος είναι αμελητέα, τότε το σήμα στην έξοδο είναι ακριβές αντίγραφο του αρχικού σήματος



Επαναλήπτες

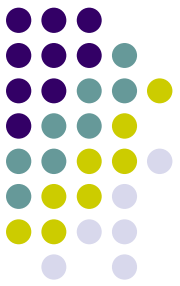
- Για μικρές πιθανότητες σφάλματος, η παρεμβολή m αναγεννητικών επαναληπτών σε μια ζεύξη απλώς **ΤΙΣ ΠΡΟΣΘΕΤΕΙ**

$$P_e = mQ\left(\sqrt{SNR_c}\right)$$

όπου SNR_c η σηματοθορυβική σχέση σε ένα βήμα

- Οι αναλογικοί, μη αναγεννητικοί επανάληπτες, απλώς ενισχύουν το λαμβανόμενο σήμα και οδηγούν σε σημαντικά μεγαλύτερη πιθανότητα λάθους

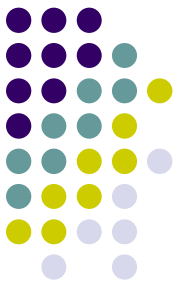
$$P_e = mQ\left(\sqrt{\frac{1}{m} SNR_c}\right)$$



Παράδειγμα PCM

- Στην τηλεφωνία το φάσμα του σήματος φωνής εκτείνεται από τα 300 Hz μέχρι τα 3400 Hz
- Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 8 kHz
- Τα δείγματα κωδικοποιούνται σε λέξεις των 8 bit
- Προκύπτει ρυθμός 64 kbps και απαιτείται εύρος ζώνης για τη μετάδοση τουλάχιστον 32 kHz (το πολύ 64 kHz)

PCM και συστήματα πολυπλεξίας

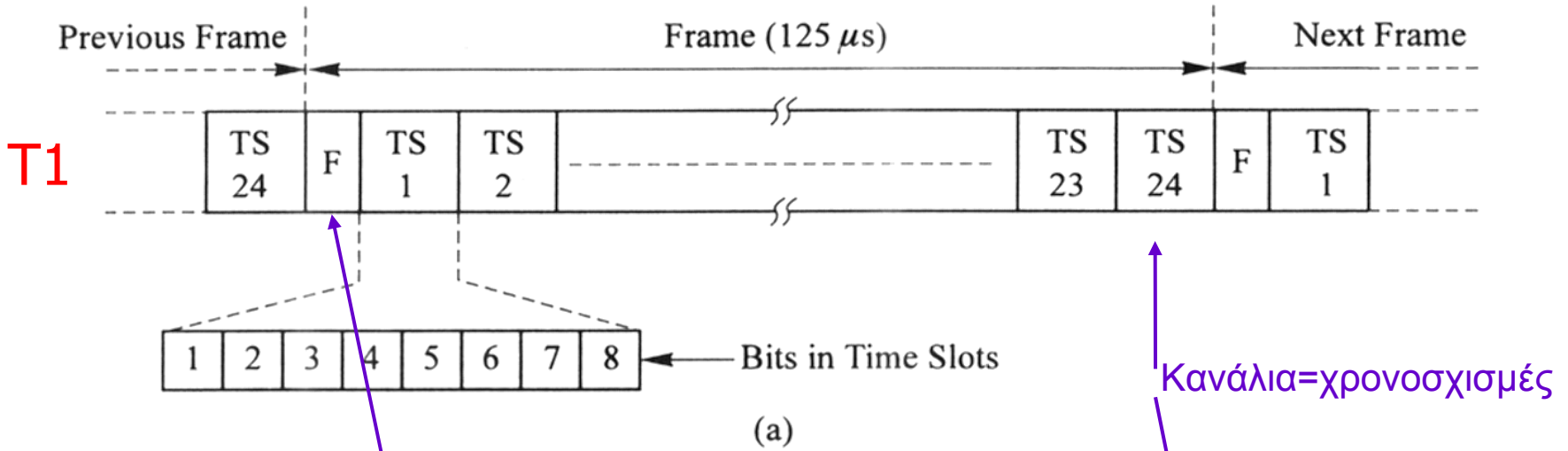


- Στην εφαρμογή της PCM στα τηλεφωνικά συστήματα μετάδοσης γίνεται πολυπλεξία πολλών καναλιών φωνής
- Στις ΗΠΑ χρησιμοποιείται το σύστημα T1 όπου 24 κανάλια φωνής πολυπλέκονται σε πλαίσιο των $125 \mu s$ ($=1/8000$) για μετάδοση πάνω από μια συνήθη τηλεφωνική γραμμή
- Στην Ευρώπη χρησιμοποιείται το σύστημα E1 όπου πολυπλέκονται 30 κανάλια φωνής και άλλα 2 για συγχρονισμό και σηματοδότηση

PCM και συστήματα πολυπλεξίας



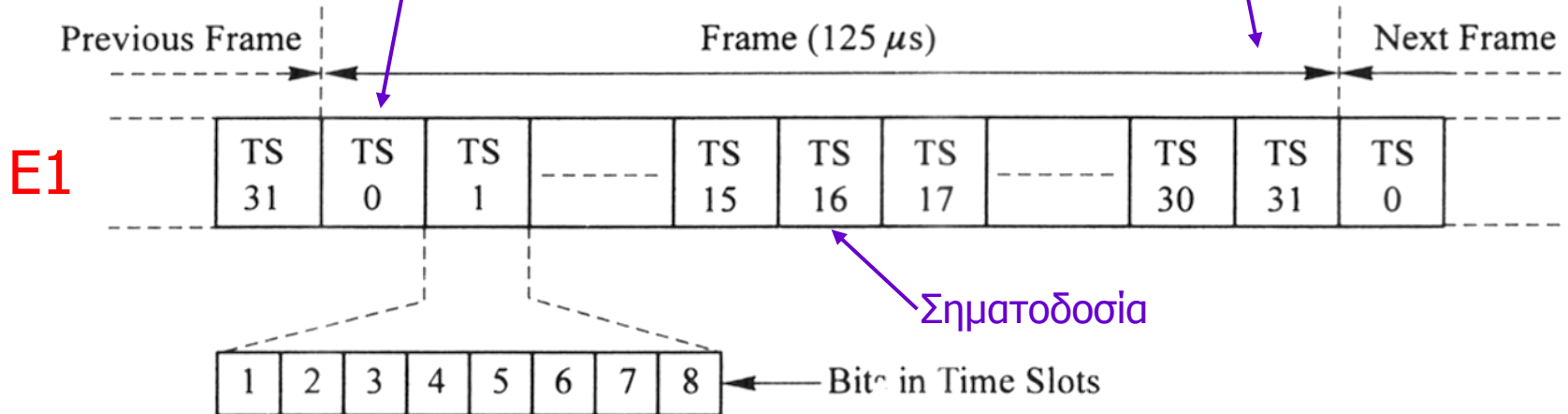
Πλαίσιο



συγχρονισμός

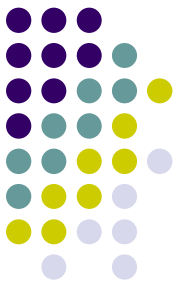
Κανάλια=χρονοσχισμές

Πλαίσιο



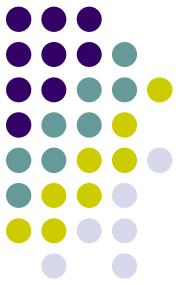
Σηματοδοσία

(b)



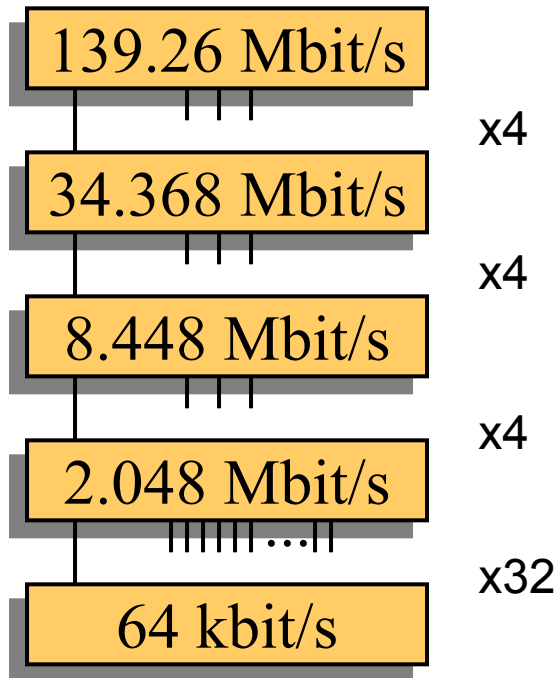
Ιεραρχίες PCM

- Οι φορείς T1 ή E1 μπορούν με τη σειρά τους να πολυπλεχθούν σε ψηφιακούς φορείς ανώτερης τάξης σε ιεραρχίες
 - PDH (plesiochronous digital hierarchy)
 - SDH (synchronous digital hierarchy)που διαφέρουν σε σχέση με τον τρόπο χειρισμού του συγχρονισμού των ψηφιακών ροών
- Στην PDH για τη λήψη μιας συγκεκριμένης συνιστώσας ροής απαιτείται από-πολυπλεξία βήμα προς βήμα μέχρι το επιθυμητό επίπεδο
- Στην SDH χρησιμοποιούνται δείκτες και η από-πολυπλεξία μιας επιμέρους ροής γίνεται άμεσα



Ιεραρχίες PCM σε PDH

Στην Ευρώπη



ΣΤΙΣ ΗΠΑ

