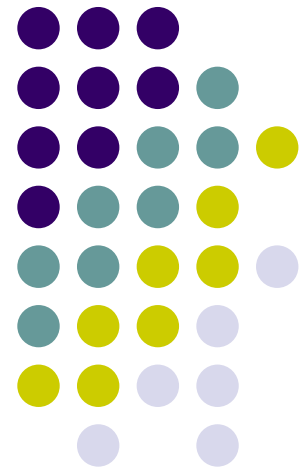


Μετάδοση σήματος PCM



Συγχρονισμός



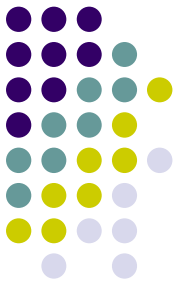
- Όπως σε όλα τα συστήματα TDM, απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη
- Εάν τα ρολόγια στον πομπό και τον δέκτη διαφέρουν, αυτό θα οδηγήσει σε παραμορφώσεις του σήματος
- Στην PCM ο χρονισμός στον δέκτη εξάγεται από το λαμβανόμενο σήμα
 - Το φάσμα του συρμού των λαμβανόμενων παλμών περιέχει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

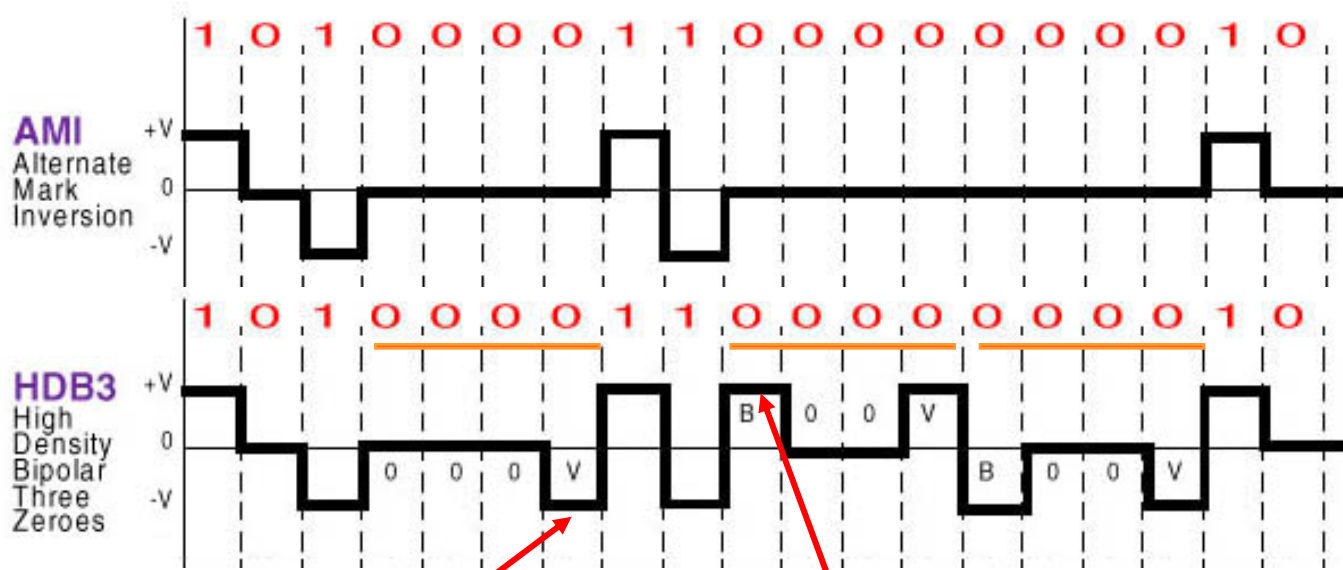


High Density Bipolar (HDB3)

- 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



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!

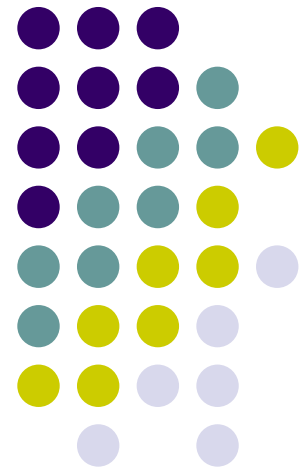


Εύρος ζώνης μετάδοσης

- 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

$$vW < B_T < 2vW$$

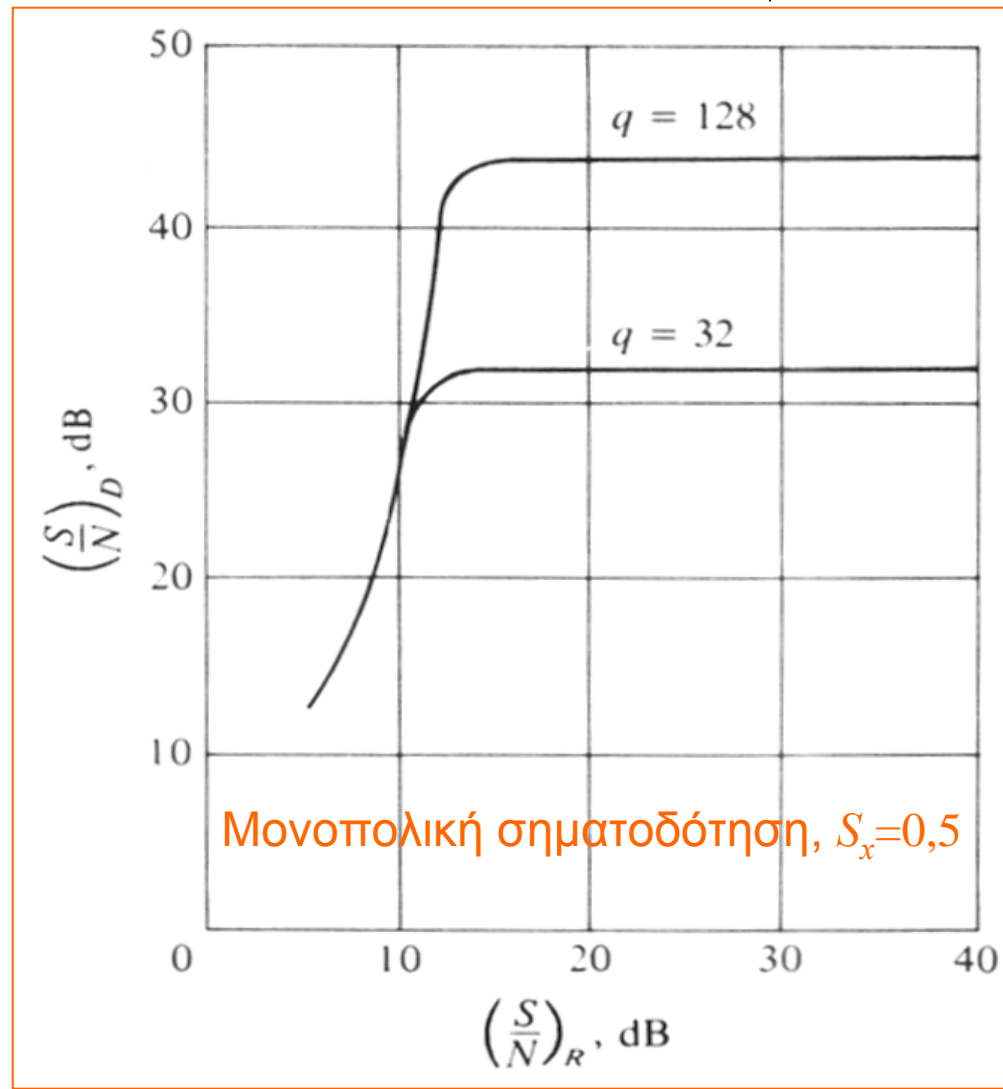
Θόρυβος κατά τη μετάδοση





Σηματοθορυβική σχέση εξόδου

- Όσο δεν υπάρχουν λάθη μετάδοσης
- Η σηματοθορυβική σχέση είναι σταθερή ανεξάρτητη της SNR_b
 - Φαινόμενο κατωφλίου
- Βελτιώνεται όσο αυξάνει το ν





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 κατώφλιου

- 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
- Η διαμόρφωση PCM, όταν λειτουργεί πάνω από το κατώφλι, έχει ιδιότητες καταστολής του θορύβου παρόμοιες με αυτές της FM και PPM

Σύγκριση με αναλογικές διαμορφώσεις



- Έστω ρυθμός Nyquist $r=B_T/2$, οπότε

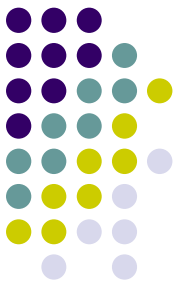
$$B_T \approx \nu W \Rightarrow q = M^\nu \approx M^b$$

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

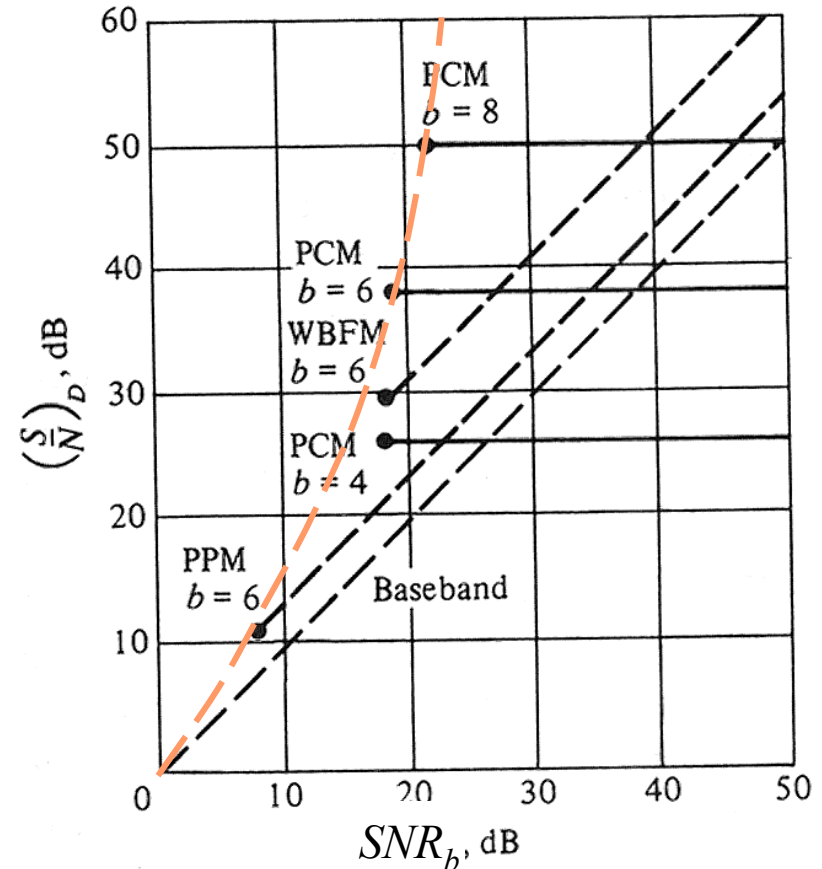
όπου $b=B_T/W$, η διεύρυνση εύρους ζώνης

- 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



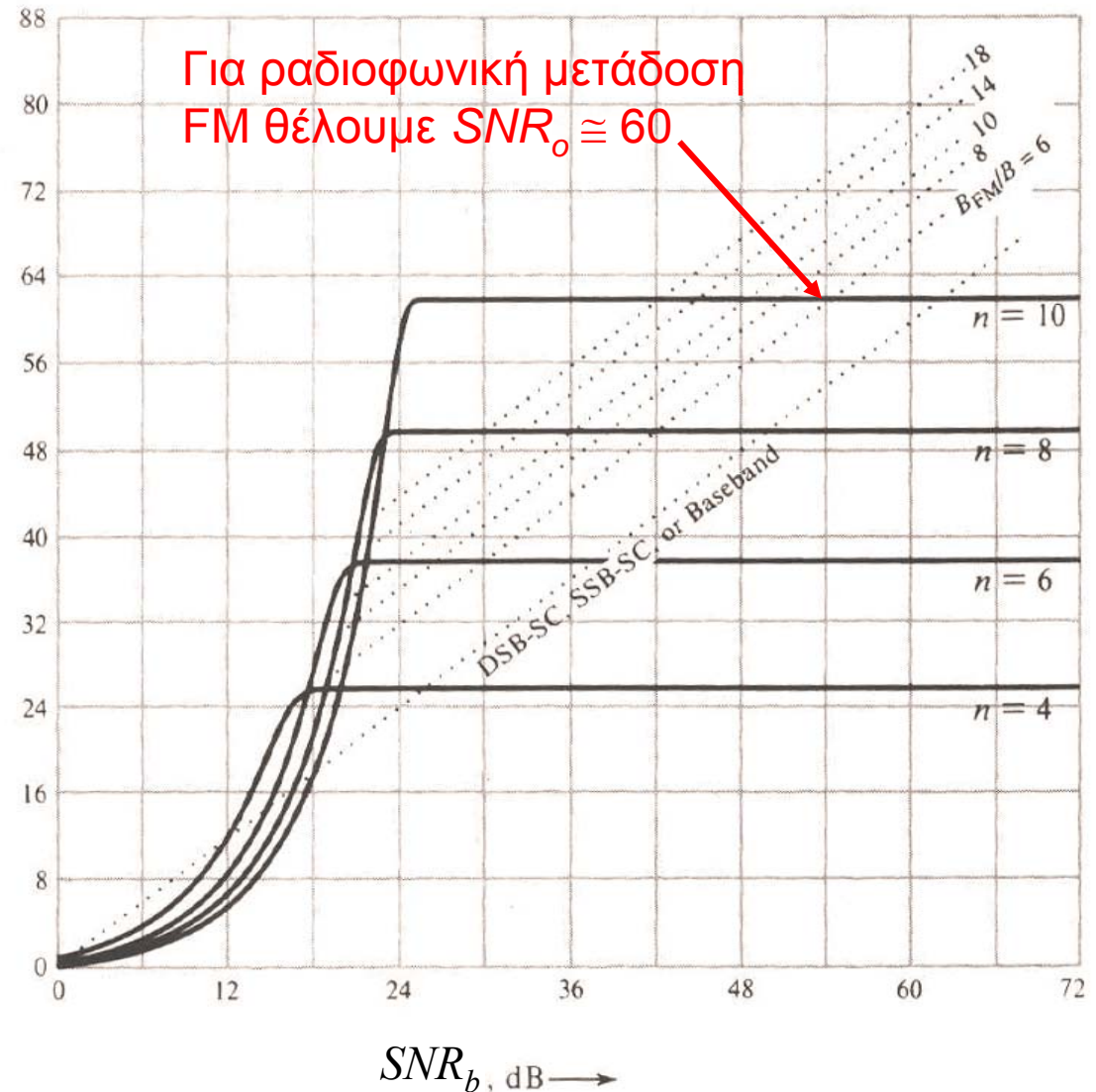
- Η επίδοση της PCM παραμένει σταθερή μέχρις ότου η πιθανότητα σφάλματος μεγαλώσει
- Μετά έχουμε δραματική πτώση
- Είναι καλύτερη της FM και PPM για χαμηλές ισχείς (μικρές SNR_b)

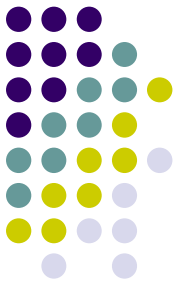


Σύγκριση με αναλογικές διαμορφώσεις



- 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;**

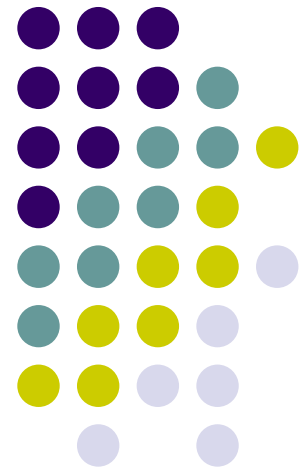




Πλεονεκτήματα PCM

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

Αναγεννητικοί επαναλήπτες



Επαναλήπτες

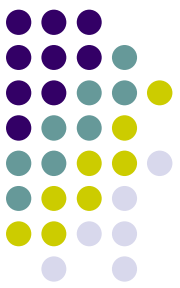


- Στα συστήματα μετάδοσης PCM χρησιμοποιούνται **αναγεννητικοί επαναλήπτες (regenerative repeaters)**
- Ο αναγεννητικός επαναλήπτης ανιχνεύει τα bit στην είσοδο και αναγεννά το ψηφιακό σήμα στην έξοδο
- Εάν η πιθανότητα σφάλματος είναι αμελητέα, τότε το σήμα στην έξοδο είναι ακριβές αντίγραφο του αρχικού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

Αναγεννητικοί επαναλήπτες



- Η μετάδοση (αναλογική ή ψηφιακή) σε μακρινές αποστάσεις απαιτεί χρήση επαναληπτών
- Σε αντίθεση με την αναλογική περίπτωση, στις ψηφιακές επικοινωνίες το σήμα αναγεννιέται
- Εάν η πιθανότητα λάθους είναι μικρή, ακόμη και για μεγάλο πλήθος m αναγεννητικών επαναληπτών το κέρδος από την αναγέννηση είναι σημαντικό



Επαναλήπτες

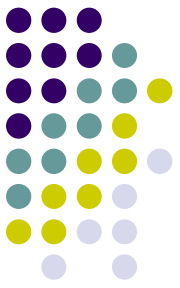
- Οι αναλογικοί, μη αναγεννητικοί επανάληπτες, απλώς ενισχύουν το λαμβανόμενο σήμα και οδηγούν σε σημαντικά μεγαλύτερη πιθανότητα λάθους

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

όπου SNR_c η σηματοθορυβική σχέση σε ένα βήμα

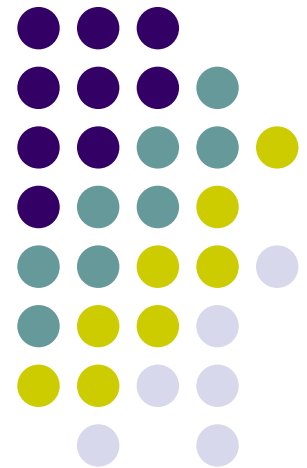
- Ο όρος $1/m$ προκύπτει από το γεγονός ότι ο θόρυβος συσσωρεύεται κατά μήκος της διαδρομής
- Η ισχύς ανά αναγεννητή αυξάνει γραμμικά ως προς το m
 - Για μεγάλες αποστάσεις απαιτούνται πάνω από 100 βήματα

Αναγεννητικοί επαναλήπτες



- Στους αναγεννητικούς επαναλήπτες η πιθανότητα λάθους είναι
$$P_e \approx mQ\left(\sqrt{SNR_c}\right)$$
όπου SNR_c η σηματοθορυβική σχέση σε ένα βήμα
 - Για να γίνει τελικά λάθος σε ένα bit πρέπει να έχουμε περιττό αριθμό λαθών
 - Ο άρτιος αριθμός οδηγεί σε διόρθωση!
- Η πιθανότητα λάθους αυξάνει γραμμικά με το m και απαιτεί πολύ λιγότερη ισχύ σε σχέση με την αναλογική περίπτωση

Ψηφιακή πολυπλεξία

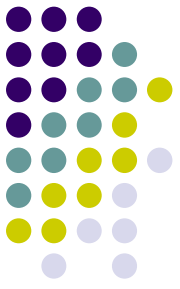




Παράδειγμα PCM

- 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

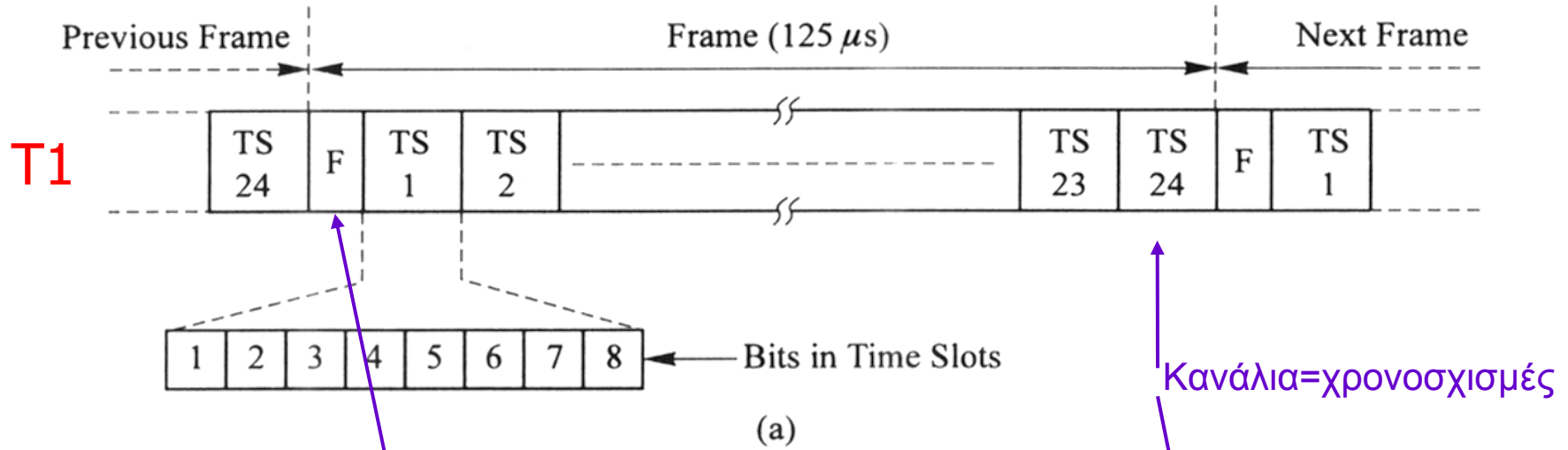


- Στην εφαρμογή της PCM στα τηλεφωνικά συστήματα μετάδοσης γίνεται πολυπλεξία πολλών καναλιών φωνής
- Στις ΗΠΑ χρησιμοποιείται το σύστημα T1 όπου 24 κανάλια φωνής πολυπλέκονται σε πλαίσιο των 125 μ s ($=1/8000$) για μετάδοση πάνω από μια συνήθη τηλεφωνική γραμμή
- Στην Ευρώπη χρησιμοποιείται το σύστημα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

PCM και συστήματα πολυπλεξίας

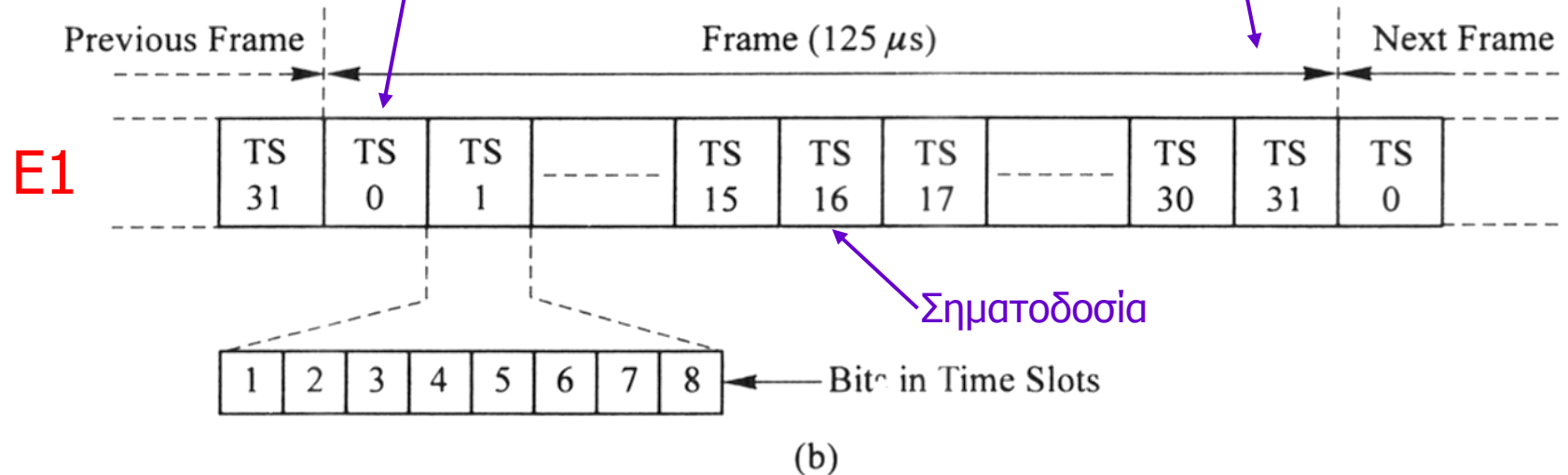


Πλαίσιο



συγχρονισμός

Πλαίσιο

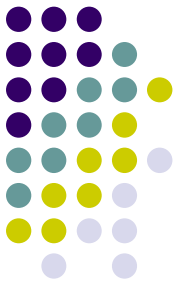


σηματοδοσία



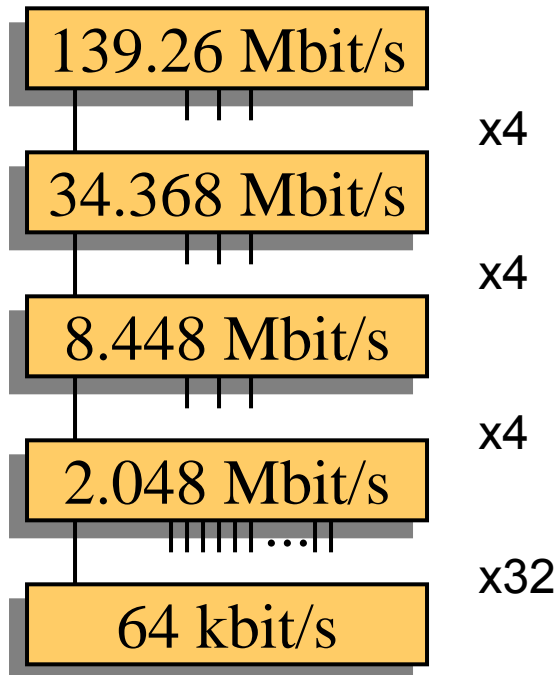
Ιεραρχίες PCM

- 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

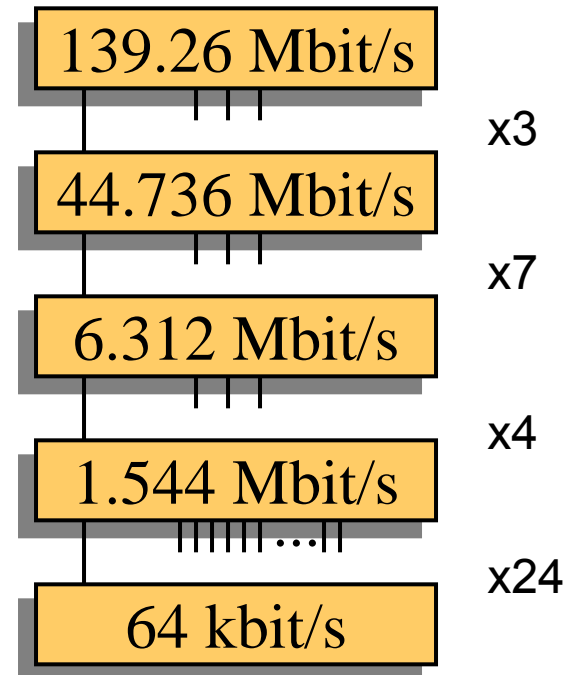


Ιεραρχίες PCM σε PDH

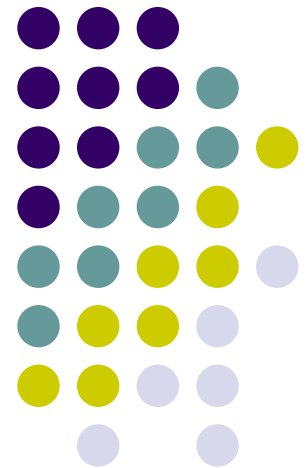
Στην Ευρώπη



ΣΤΙΣ ΗΠΑ



Διαμόρφωση δέλτα





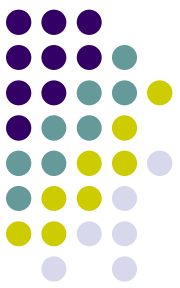
Προβλεπτική κωδικοποίηση

- Οι τιμές αναλογικών δειγμάτων συχνά είναι προβλέψιμες
 - Η μεταβολή από την προηγούμενη τιμή είναι κατά μέσο όρο μικρή
 - Μπορεί κανείς να κάνει πρόβλεψη για την τιμή του επόμενου δείγματος βάσει των προηγούμενων τιμών
- Η πρόβλεψη περιέχει κάποιο λάθος, αλλά το εύρος του είναι κατά πολύ μικρότερο της διακύμανσης των τιμών του σήματος
- Μπορεί κανείς να μεταδώσει το **λάθος πρόβλεψης (prediction error)**
 - Στη λήψη το σήμα προκύπτει από την αντίστοιχη πρόβλεψη και τις τιμές λάθους πρόβλεψης

Προβλεπτική κωδικοποίηση



- Διαμόρφωση δέλτα (DM – Delta Modulation)
 - Αυξάνεται ο ρυθμός της δειγματοληψίας σε σχέση με την PCM
 - Απλοϊκή πρόβλεψη
- Διαφορική PCM (DPCM – Differential PCM)
 - Μειώνει τον ρυθμό δειγματοληψίας
 - Πιο πολύπλοκοι αλγόριθμοι πρόβλεψης



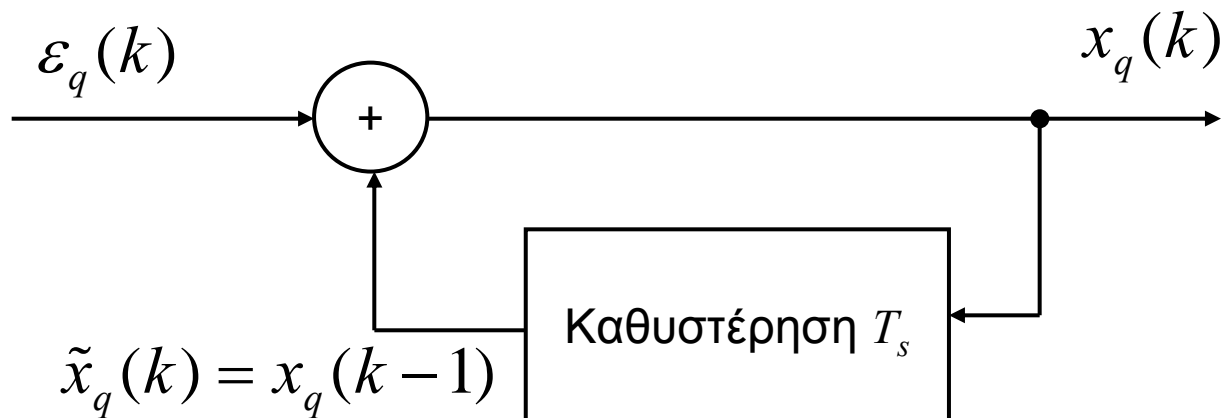
Διαμόρφωση δέλτα

- Δειγματοληψία με ρυθμό μεγαλύτερο του Nyquist
- Η πρόβλεψη για την επόμενη τιμή είναι απλά η τιμή του προηγούμενου δείγματος
$$\tilde{x}_q(k) = x_q(k-1)$$
όπου $\tilde{x}_q(k)$ η πρόβλεψη για την τιμή του κβαντισμένου δείγματος $x_q(k)$
- Η τιμή του κβαντισμένου δείγματος ως συνάρτηση του λάθους πρόβλεψης $\varepsilon_q(k)$ είναι
$$x_q(k) = \tilde{x}_q(k) + \varepsilon_q(k)$$
- Στη διαμόρφωση δέλτα μεταδίδουμε τα $\varepsilon_q(k)$!



Συσσωρευτής

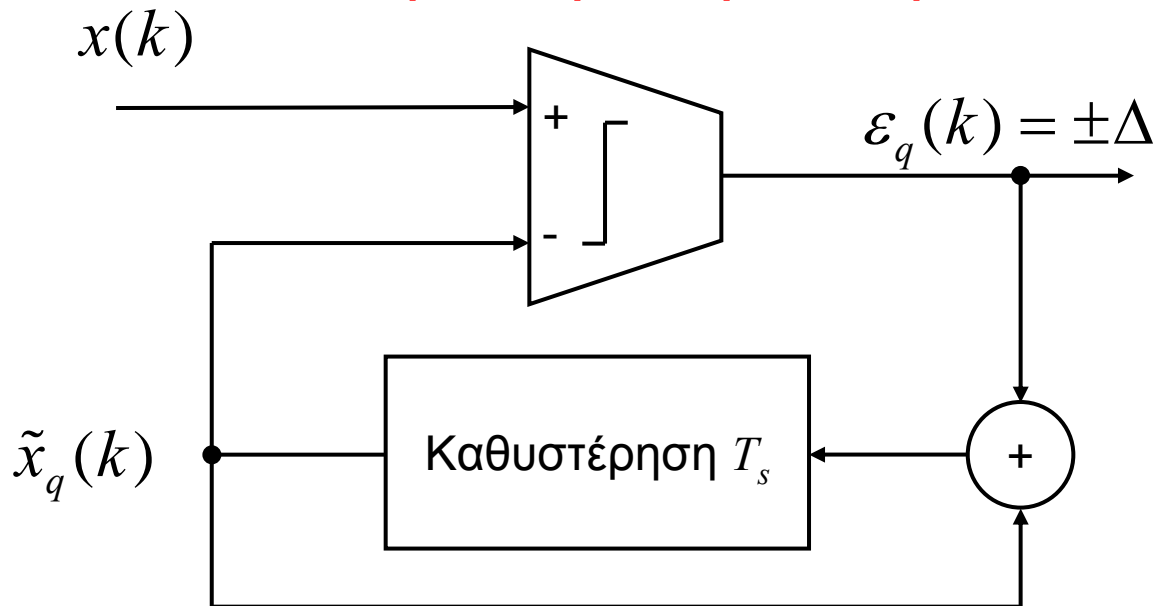
- Εάν μεταδίδουμε τα λάθη πρόβλεψης
$$x_q(k) = \varepsilon_q(k) + x_q(k-1)$$
$$= \varepsilon_q(k) + \varepsilon_q(k-1) + x_q(k-2)$$
$$= \varepsilon_q(k) + \varepsilon_q(k-1) + \varepsilon_q(k-2) + \dots$$
- Στη λήψη το κύκλωμα του σχήματος (συσσωρευτής) παράγει τις τιμές των δειγμάτων





Πομπός DM

- Στην πλευρά του πομπού ο υπολογισμός του λάθους πρόβλεψης γίνεται μέσω της σύγκρισης της εξόδου του συσσωρευτή και τις τιμές του σήματος (**binary quantizer**)
- **Δεν απαιτεί μετατροπή A/D, μόνο σύγκριση**



$$\varepsilon_q(k) = [\text{sgn } \varepsilon(k)]\Delta$$

$$\varepsilon(k) = x(k) - \tilde{x}_q(k)$$



Απαιτήσεις μετάδοσης

- Αρκεί η μετάδοση ενός παλμού ύψους $\pm\Delta$
 - Μετάδοση δυαδικής κυματομορφής ρυθμού $r_b = f_s$
 - **1 bit ανά δείγμα!**
 - 1 bit PCM
- Το εύρος ζώνης μετάδοσης είναι
$$B_T \geq r_b / 2 = f_s / 2$$
- Για επιτυχή λειτουργία ο ρυθμός δειγματοληψίας πρέπει να είναι πολύ υψηλός



Απαιτήσεις μετάδοσης

- Εισάγονται δύο είδη λαθών
 - Κοκκώδης (granular) θόρυβος
 - Η έξοδος ταλαντώνεται μεταξύ των τιμών $\pm\Delta$ ακόμη και για σταθερή τιμή του σήματος
 - Υπερφόρτιση κλίσης (slope overload)
 - Η πρόβλεψη υστερεί ή υπερτερεί της πραγματικής τιμής όταν αυτή αλλάζει απότομα
 - Το κύριο μειονέκτημα της DM
 - Πρέπει

$$f_s \Delta \geq \left| \frac{dx}{dt} \right|_{\max}$$



Σηματοθορυβική σχέση

- Εάν η μόνη υποβάθμιση οφείλεται στον κοκκώδη θόρυβο, το σφάλμα $\varepsilon(k) = x(k) - \tilde{x}_q(k)$ έχει ομοιόμορφη κατανομή και

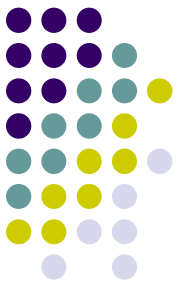
$$\overline{\varepsilon^2} = \Delta^2 / 3$$

- η πυκνότητα φάσματος ισχύος του θορύβου είναι

$$G_\varepsilon(f) = \overline{\varepsilon^2} / 2f_s$$

- με αποτέλεσμα η ισχύς θορύβου στην έξοδο να είναι

$$N_g = \int_{-W}^W G_\varepsilon(f) df = \frac{W}{f_s} \frac{\Delta^2}{3}$$



Σηματοθορυβική σχέση

- Η σηματοθορυβική σχέση είναι επομένως

$$SNR_o = \frac{3f_s}{\Delta^2 W} S_x$$

- Τα Δ και f_s πρέπει να ικανοποιούν τη συνθήκη για μη εμφάνιση υπερφόρτωσης κλίσης

- Ο συντελεστή υπερφόρτισης ορίζεται ως $s \triangleq \frac{f_s}{2\pi\sigma} \frac{\Delta}{W_{rms}}$

- όπου σ η rms τιμή του σήματος και W_{rms} η μέση τετραγωνική τιμή του εύρους ζώνης

$$W_{rms} = \frac{1}{\sigma_s} \sqrt{\int_{-W}^W f^2 G_\varepsilon(f) df}$$



Σηματοθορυβική σχέση

- Τελικά η σηματοθορυβική σχέση είναι

$$SNR_o = \frac{6}{\pi^2} \left(\frac{W}{W_{rms}} \right)^2 \frac{b^3}{s^2}$$

- με $b = f_s/2W$ τον συντελεστή αύξησης του εύρους ζώνης

