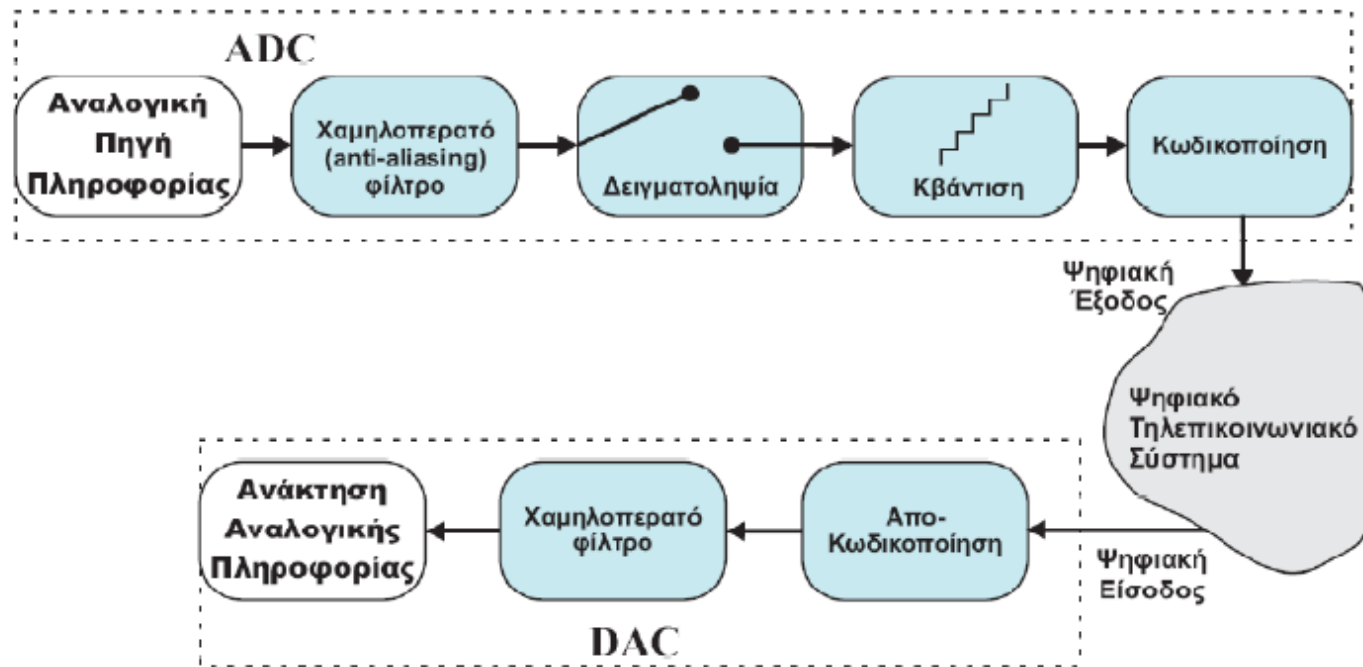


Σύστημα ADC και DAC



- 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*).

Δειγματοληψία-Θεώρημα ή Συνθήκη Nyquist

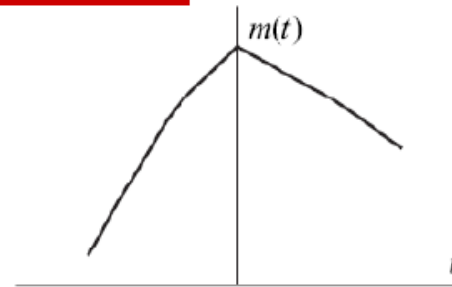
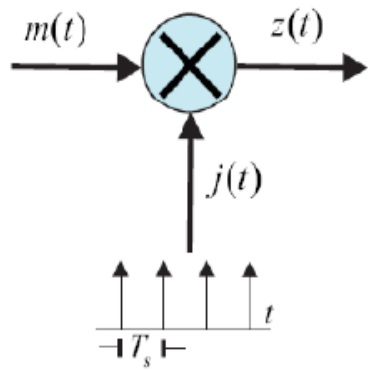
Θεώρημα 5.2.1. Έστω σήμα βασικής ζώνης $m(t)$ με φάσμα $M(f)$ για το οποίο ισχύει

$$M(f) = 0, |f| > W. \quad (5.3)$$

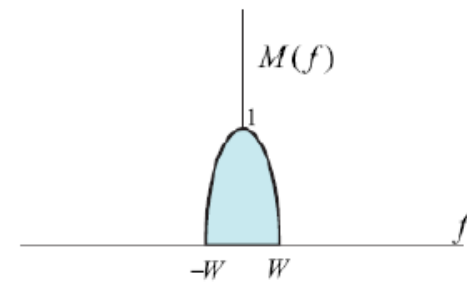
Αν $m(kT_s)$ είναι τα δείγματα του $m(t)$ τα οποία λαμβάνονται με συχνότητα $f_s = \frac{1}{T_s}$ (δηλαδή σε ισαπέχοντα χρονικά διαστήματα T_s), τότε είναι δυνατή η ακριβής ανάκτηση του $m(t)$ από τα δείγματα $m(kT_s)$ αν ισχύει

$$T_s = \frac{1}{f_s} \leq \frac{1}{2W} \quad (5.4)$$

Ιδανική Δειγματοληψία (Ideal Sampling)



(α)



(β)

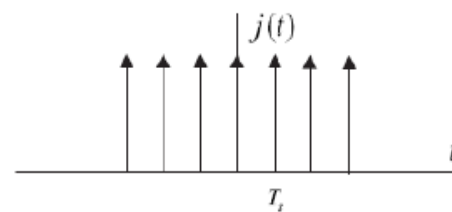
$$j(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s)$$

$$\mathcal{F}[j(t)] = J(f) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{k}{T_s})$$

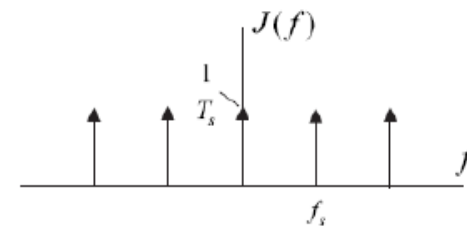
$$z(t) = m(t) \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s) \right] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} m(kT_s) \delta(t - kT_s)$$

$$Z(f) = M(f) * \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{k}{T_s})$$

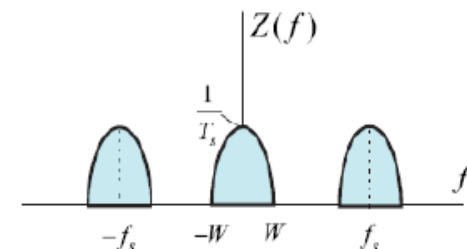
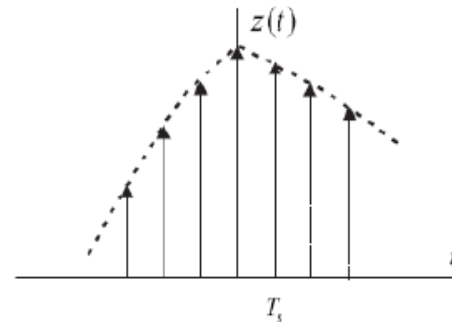
$$= \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} M(f - \frac{k}{T_s}) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} M(f - kf_s)$$



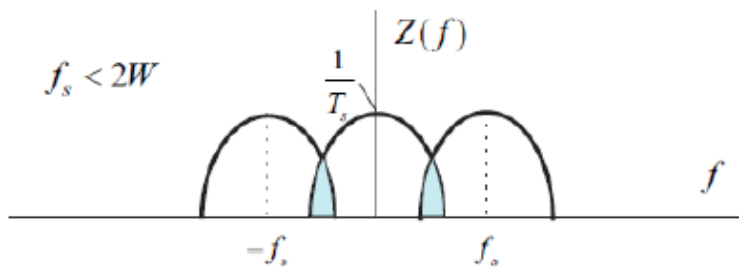
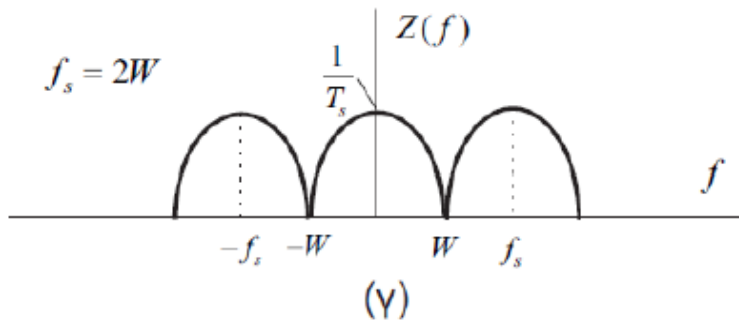
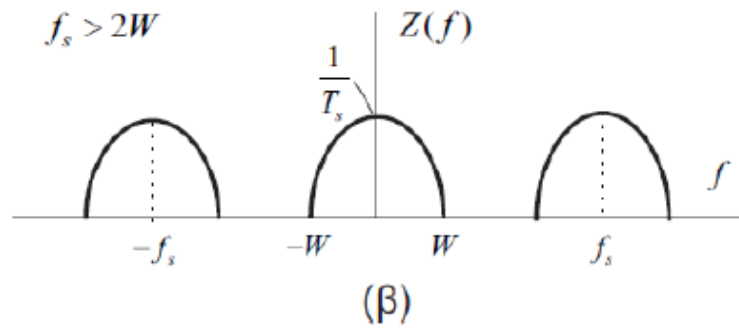
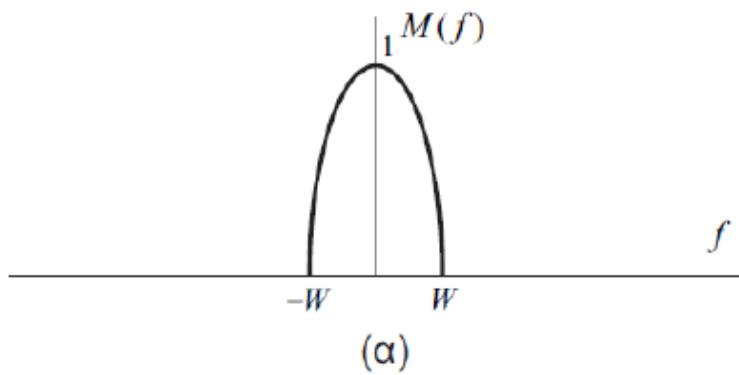
(γ)



(δ)



Ρυθμός Δειγματοληψίας Περίπτωσης



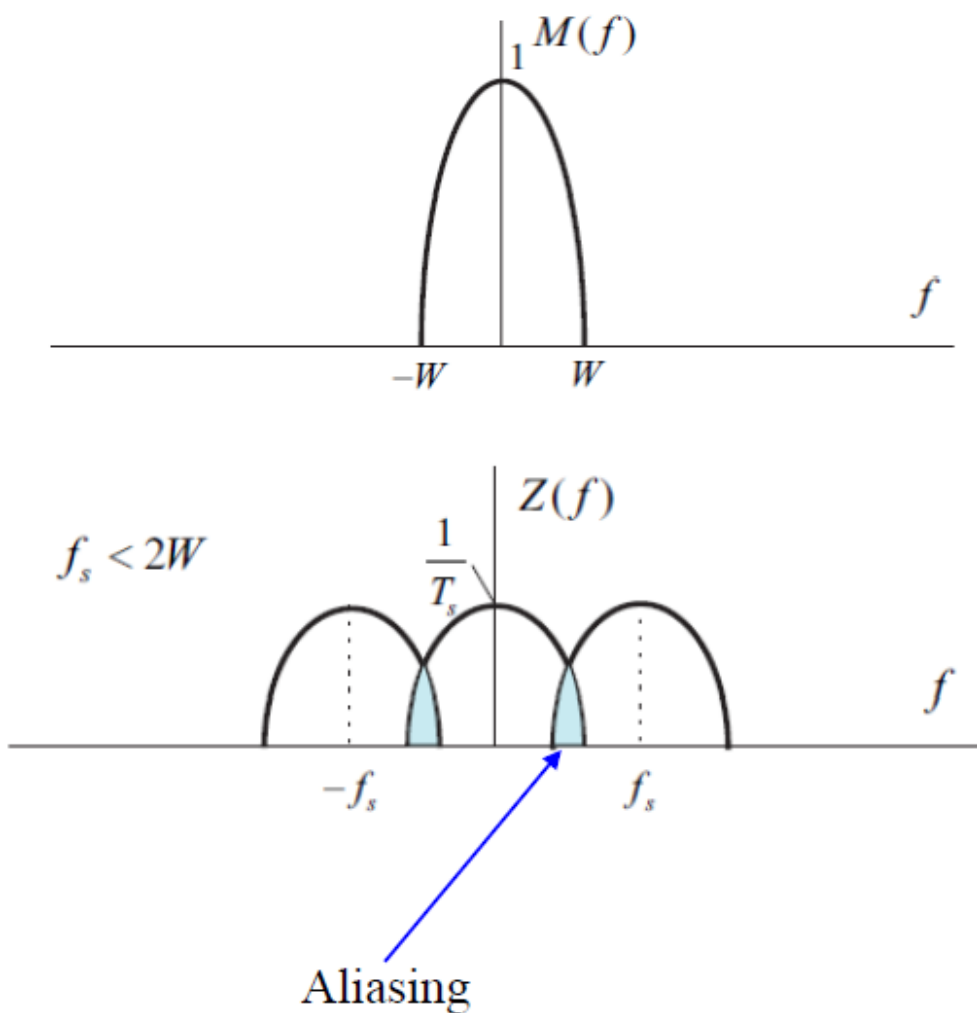
Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας
Ρυθμός Nyquist

$$f_s = \frac{1}{T_s} = 2W,$$

Ανάκτηση στο δέκτη
με χαμηλοπερατό φίλτρο

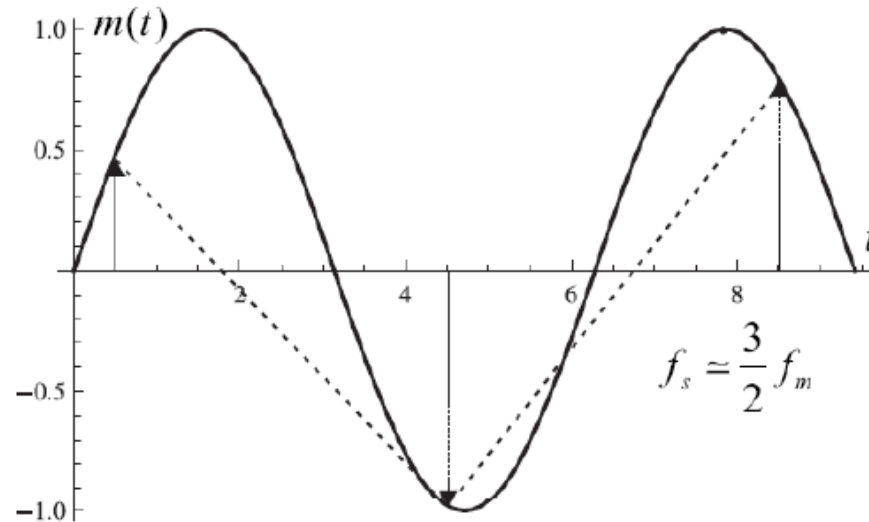
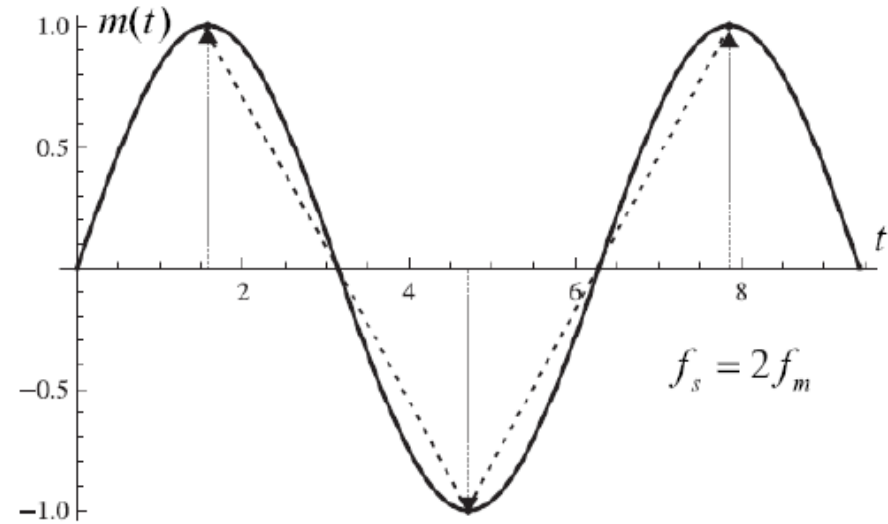
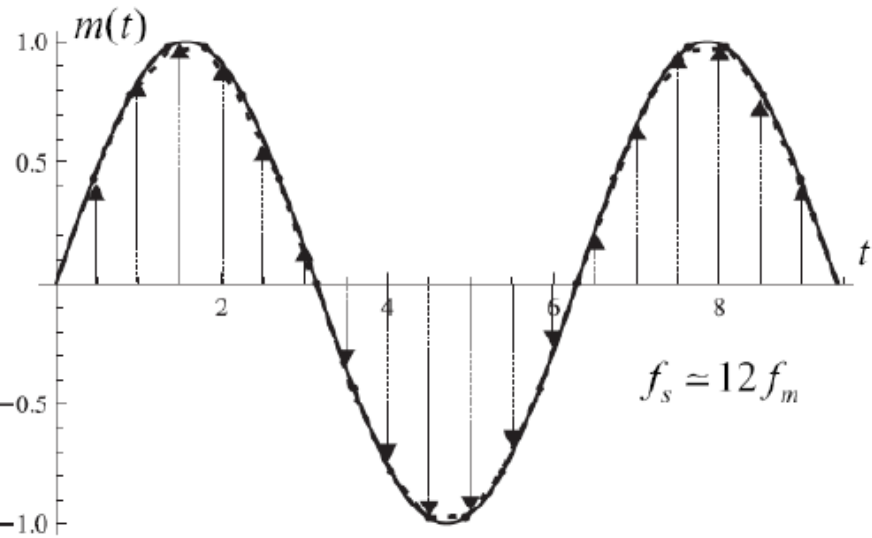
$$H(f) = \begin{cases} T_s, & f \in [-W, W] \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

Ρυθμός Δειγματοληψίας



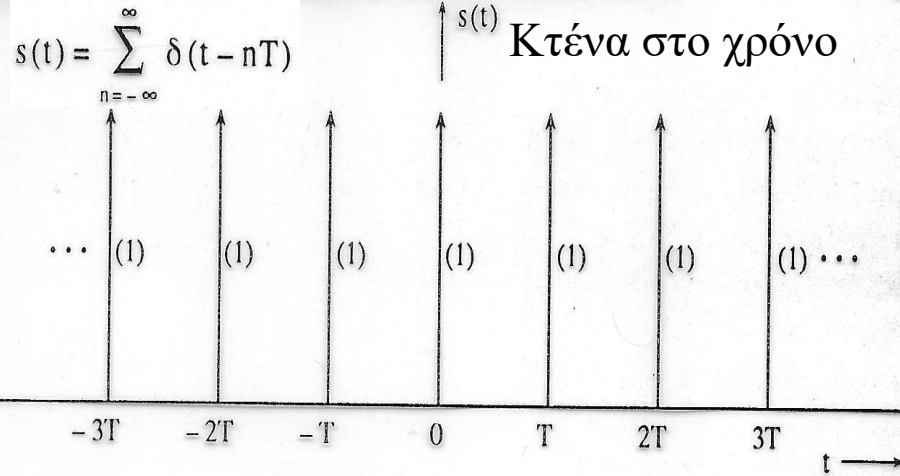
Το σήμα φιλτράρεται πριν την δειγματοληψία με ένα χαμηλοπερατό ή ζωνοπερατό φίλτρο (anti-aliasing), ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη του Nyquist.

Ρυθμός Δειγματοληψίας



ΙΔΑΝΙΚΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ (ξανά!!!)

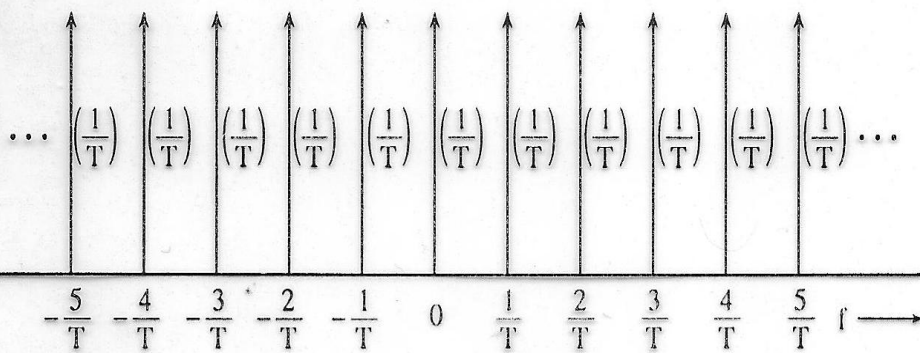
Λήψη ενός δείγματος από το $f(t)$: $f(t)\delta(t-T)=f(T)\delta(t-T)$



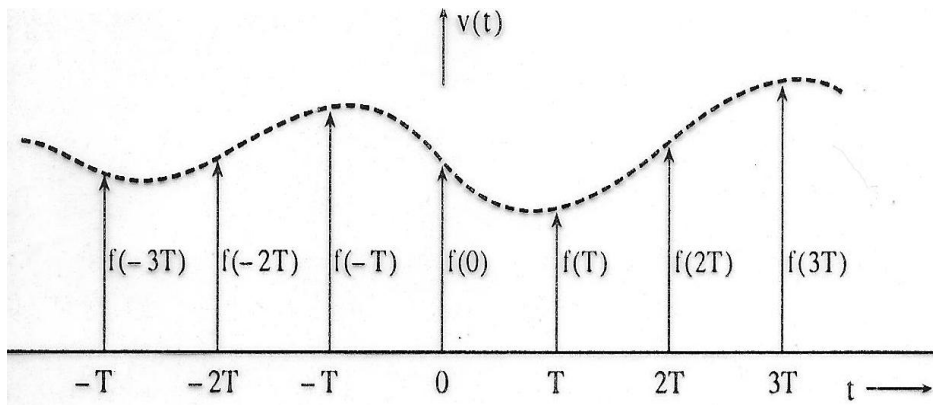
Ακολουθία περιοδικών παλμών δέλτα.

$$s(t) \leftrightarrow S(f) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{n}{T}\right)$$

Κτένα στη συχνότητα



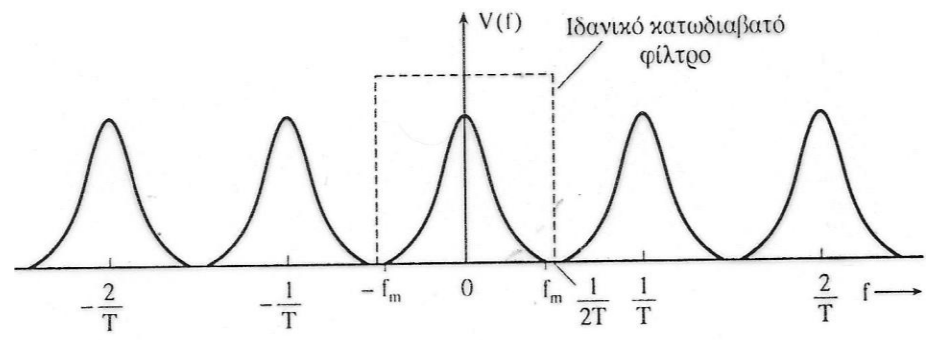
Δειγματοληψία: $v(t) = f(t)s(t)$



Φάσμα συχνοτήτων:

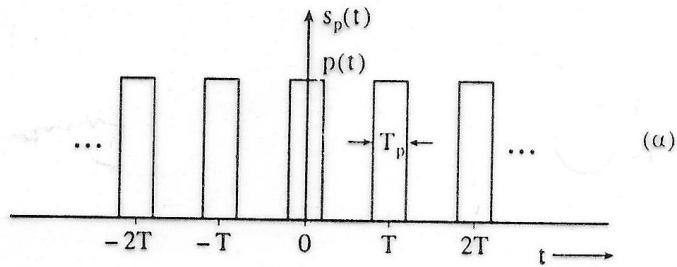
$$V(f) = F(f) * S(f) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F\left(f - \frac{n}{T}\right)$$

όπου $f(t) \leftrightarrow F(f)$

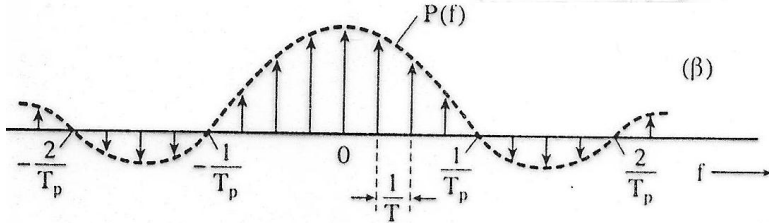


Φάσμα σήματος μετά τη δειγματοληψία με περιοδικούς παλμούς δέλτα.

ΦΥΣΙΚΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ - ΡΑΜ

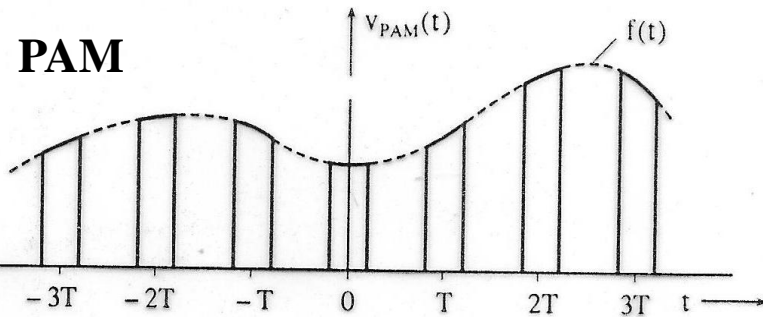


$$S_p(f) = P(f) = T_p \frac{\sin \pi f T_p}{\pi f T_p}$$



Περιοδική ακολουθία ορθογώνιων παλμών (α) και αντίστοιχο φάσμα (β).

ΡΑΜ



Διαμόρφωση παλμών κατά πλάτος.

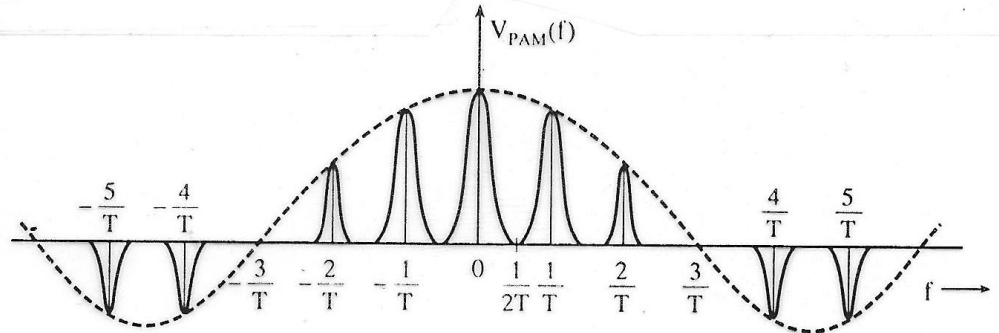
$$s_p(t) = p(t) * s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p(t - nT) \leftrightarrow S_p(f)$$

$$\text{όπου } p(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \frac{T_p}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T_p}{2} \end{cases} \leftrightarrow P(f)$$

$$S_p(f) = P(f) S(f) = \frac{T_p}{T} \frac{\sin(\pi f T_p)}{\pi f T_p} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{n}{T}\right) = \frac{T_p}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi n T_p / T)}{\pi n T_p / T} \delta\left(f - \frac{n}{T}\right)$$

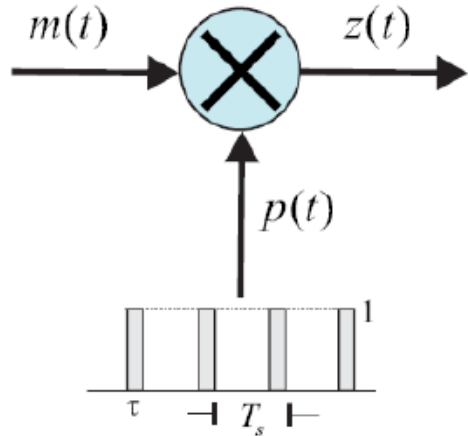
$$V_{PAM}(t) = f(t) s_p(t) = f(t) |p(t) * s(t)| \leftrightarrow V_{PAM}(f)$$

Το φάσμα $V_{PAM}(f)$ προσδιορίζεται εύκολα από τη συνέλιξη των φασμάτων $F(f)$ και $S_p(f)$ (σχ. 17-7).



Φάσμα παλμοσειράς διαμορφωμένης κατά πλάτος.

Δειγματοληψία παλμού (Pulse Sampling) ή Πρακτική Δειγματοληψία

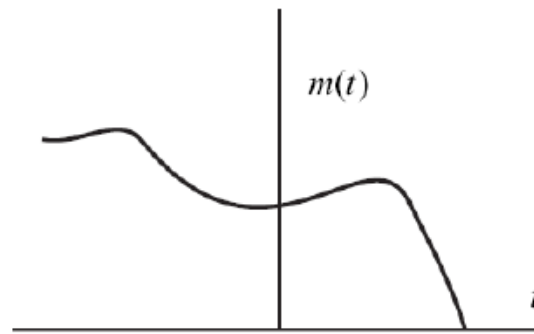


$$p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_p(t - kT_s)$$

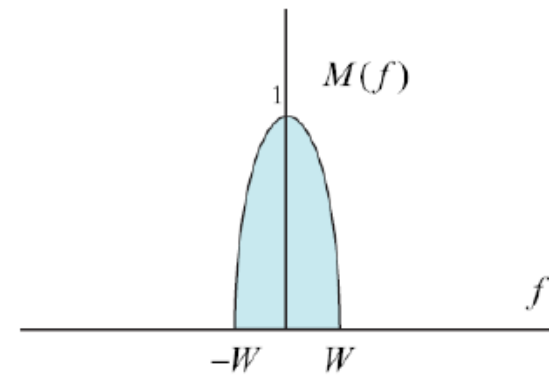
$$y_p(t) = \begin{cases} 1, & t \in [-\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2}] \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

$$P(f) = \frac{\tau}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(kf_s\tau) \delta(f - kf_s)$$

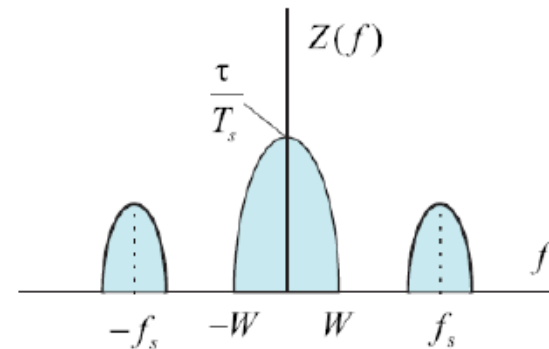
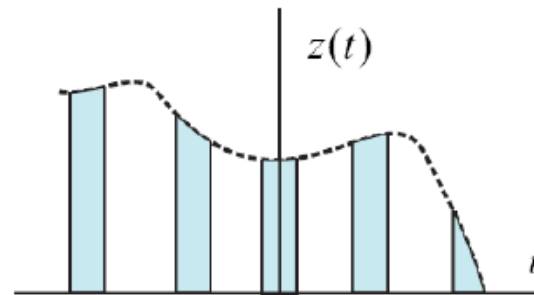
$$Z(f) = M(f) * P(f) = \frac{\tau}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(kf_s\tau) M(f - kf_s)$$



(α)

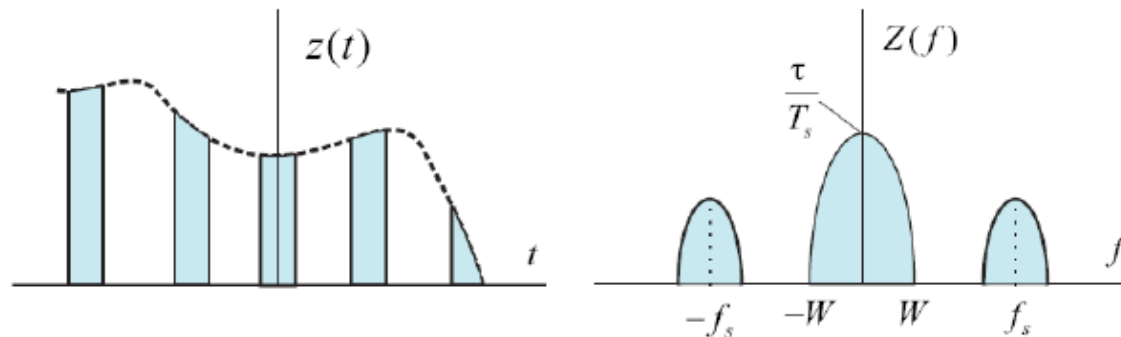


(β)



Δειγματοληψία παλμού (Pulse Sampling)

Συμπεράσματα

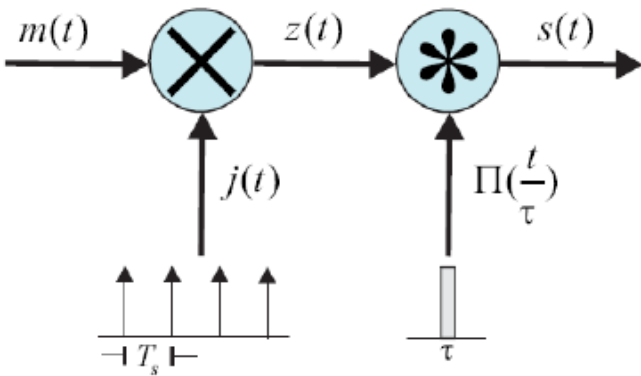


- Το φάσμα της εξόδου του δειγματολήπτη παλμού έχει παρόμοια μορφή με αυτό του ιδανικού δειγματολήπτη. Η διαφορά είναι ότι τα αντίγραφα του φάσματος του σήματος εισόδου πολλαπλασιάζονται με ένα παράγοντα $\text{sinc}(kf_s\tau)$, ο οποίος δεν είναι σταθερός (στην ιδανική δειγματοληψία είναι μονάδα) αλλά μειώνεται με αύξηση του k .

Όμως επειδή ο παράγοντας αυτός δε μεταβάλλεται με τη συχνότητα δεν προκαλείται παραμόρφωση στα αντίγραφα του $M(f)$ που αποτελούν το $Z(f)$

- Όταν ικανοποιείται η συνθήκη του Nyquist, δηλαδή $f_s \geq 2W$, είναι δυνατή η ανάκτηση του αναλογικού σήματος $m(t)$ στον DAC μέσω ενός χαμηλοπερατού φίλτρου όπως και στην περίπτωση της ιδανικής δειγματοληψίας.

Δειγματοληψία επίπεδης κορυφής (Flat-top sampling)



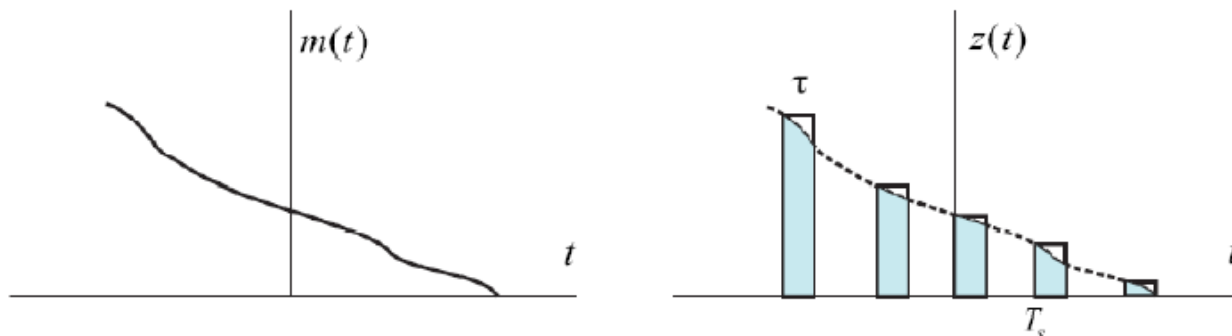
$$j(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s)$$

$$z(t) = x(t) \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s) \right] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT_s) \delta(t - kT_s)$$

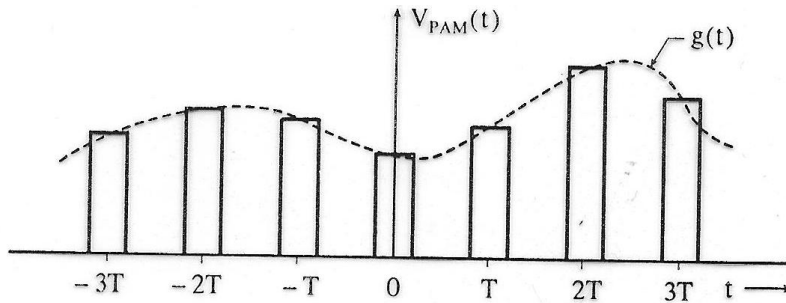
$$p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_p(t - kT_s)$$

$$s(t) = [m(t) j(t)] * \Pi\left(\frac{t}{\tau}\right)$$

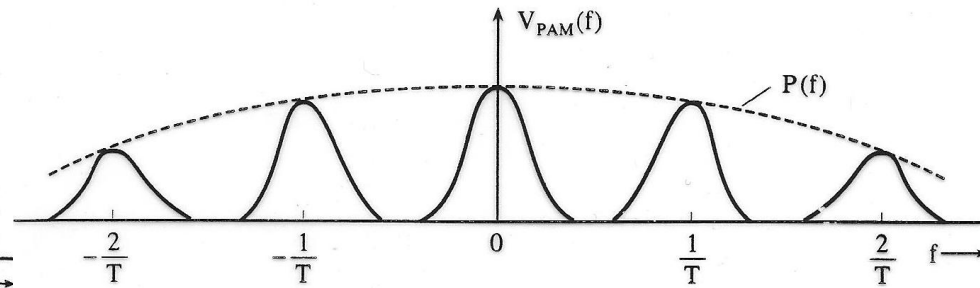
$$S(f) = \frac{\tau \operatorname{sinc}(f\tau)}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} M(f - kf_s)$$



ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ (Top Sampling) ξανά!!!



Στιγμαία δειγματοληψία.



Φάσμα παλμοσειράς διαμορφωμένης με στιγμιαία δειγματοληψία σήματος.

Σήμα της ανωτέρω μορφής μπορεί να ληφθεί με δειγματοληψία του σήματος Χ.Σ. με πολύ στενούς παλμούς (θεωρητικά παλμούς δέλτα) και επέκταση κατόπιν των παλμών στο χρόνο με ένα κύκλωμα συγκράτησης (Holding circuit)

Για τον υπολογισμό του φάσματος παλμοσειράς διαμορφωμένης με στιγμιαία δειγματοληψία προχωρούμε ως εξής: Πρώτα εφαρμόζεται δειγματοληψία του σήματος Χ.Σ. με ακολουθία περιοδικών παλμών δέλτα $s(t)$ (συνάρτηση δειγματοληψίας) με αποτέλεσμα τη δημιουργία σήματος δειγμάτων $v(t)$

$$v(t) = f(t) s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT) \delta(t - nT)$$

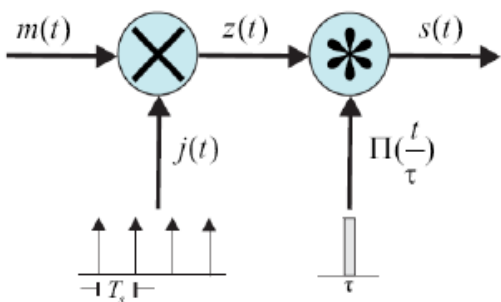
Κατόπιν, η συνάρτηση $v(t)$ συνελίσσεται με τον ορθογώνιο παλμό $p(t)$, διαδικασία που δίνει σήμα PAM με παλμούς επίπεδης κορυφής.

$$V_{PAM}(t) = v(t) * p(t) = [f(t) s(t)] * p(t)$$

$$V_{PAM}(f) = V(f)P(f) = [F(f) * S(f)] P(f)$$

Δειγματοληψία επίπεδης κορυφής (Flat-top sampling)

Πεδίο συχνότητας



$$S(f) = \frac{\tau \operatorname{sinc}(f\tau)}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} M(f - kf_s)$$



- Το φάσμα του $s(t)$ αποτελείται από παραμορφωμένα αντίγραφα του φάσματος του αναλογικού σήματος, επαναλαμβανόμενα στις συχνότητες $\pm f_s$.
- Η παραμόρφωση οφείλεται στον πολλαπλασιασμό στο πεδίο συχνοτήτων με τον παράγοντα $\tau \operatorname{sinc} f\tau$, ο οποίος προκαλεί παραμόρφωση του $s(t)$.
- Για την ανάκτηση του αναλογικού σήματος στον DAC χωρίς παραμόρφωση απαιτείται επιπλέον του χαμηλοπερατού φίλτρου και ένα φίλτρο με απόκριση συχνότητας,

$$H(f) = \frac{1}{\tau \operatorname{sinc} f\tau}, \quad (1.25)$$

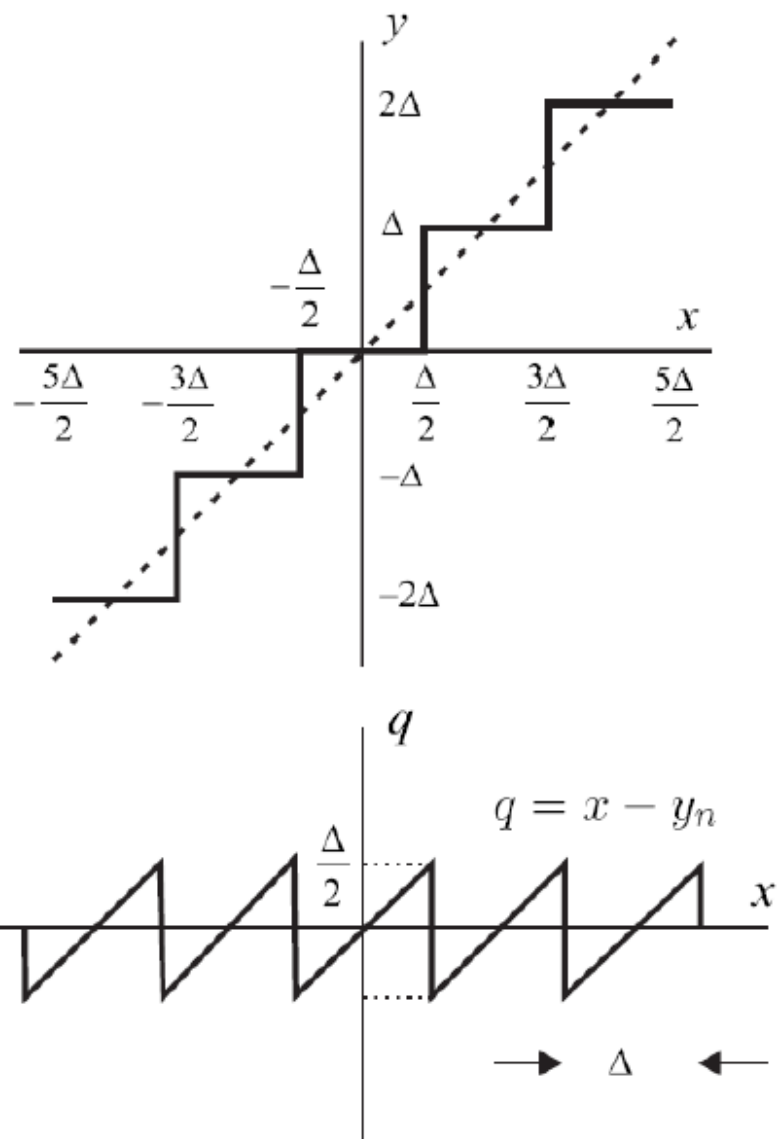
προκειμένου να αντισταθμιστεί ο όρος $\tau \operatorname{sinc} f\tau$ στην (1.24). Η χρησιμοποίηση αυτού του φίλτρου ονομάζεται *ισοστάθμιση (equalising)*.

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)



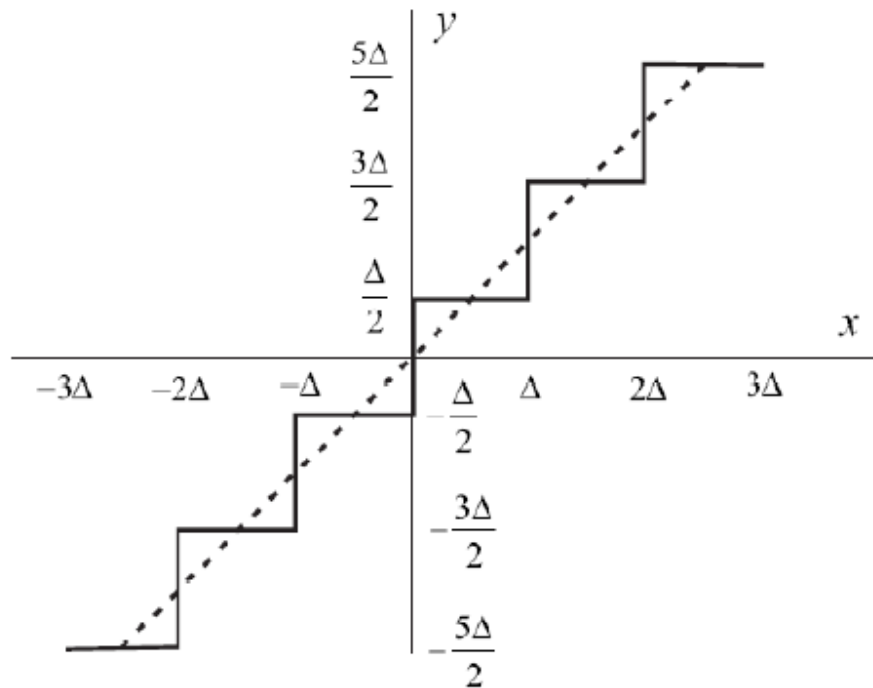
$$L = 2^R \quad \Rightarrow \quad \Delta = \frac{V_{pp}}{2^R}$$

Βήμα

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

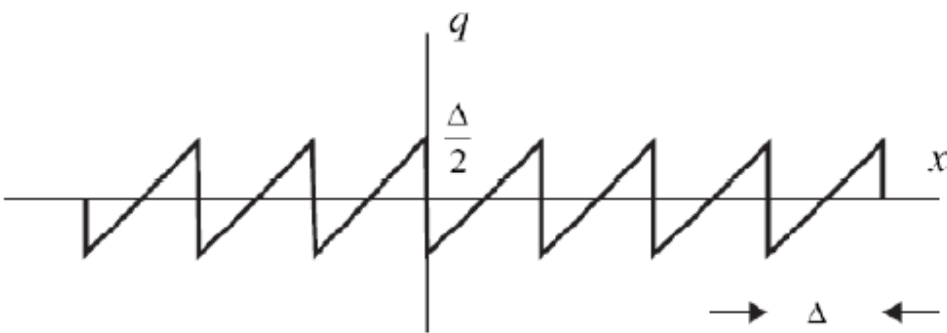
$$n = -\frac{L}{2}, -\frac{L}{2} + 1, \dots, \frac{L}{2} - 2, \frac{L}{2} - 1$$

Ομοιόμορφη Κβάντιση (mid-rise)

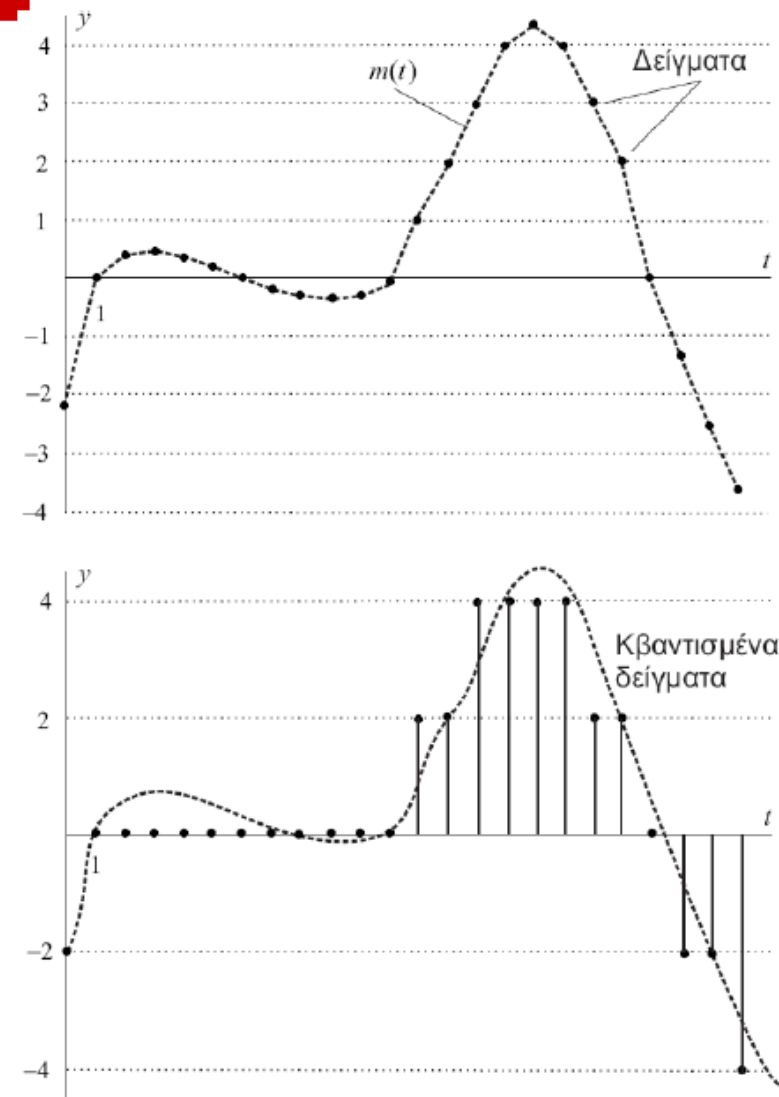
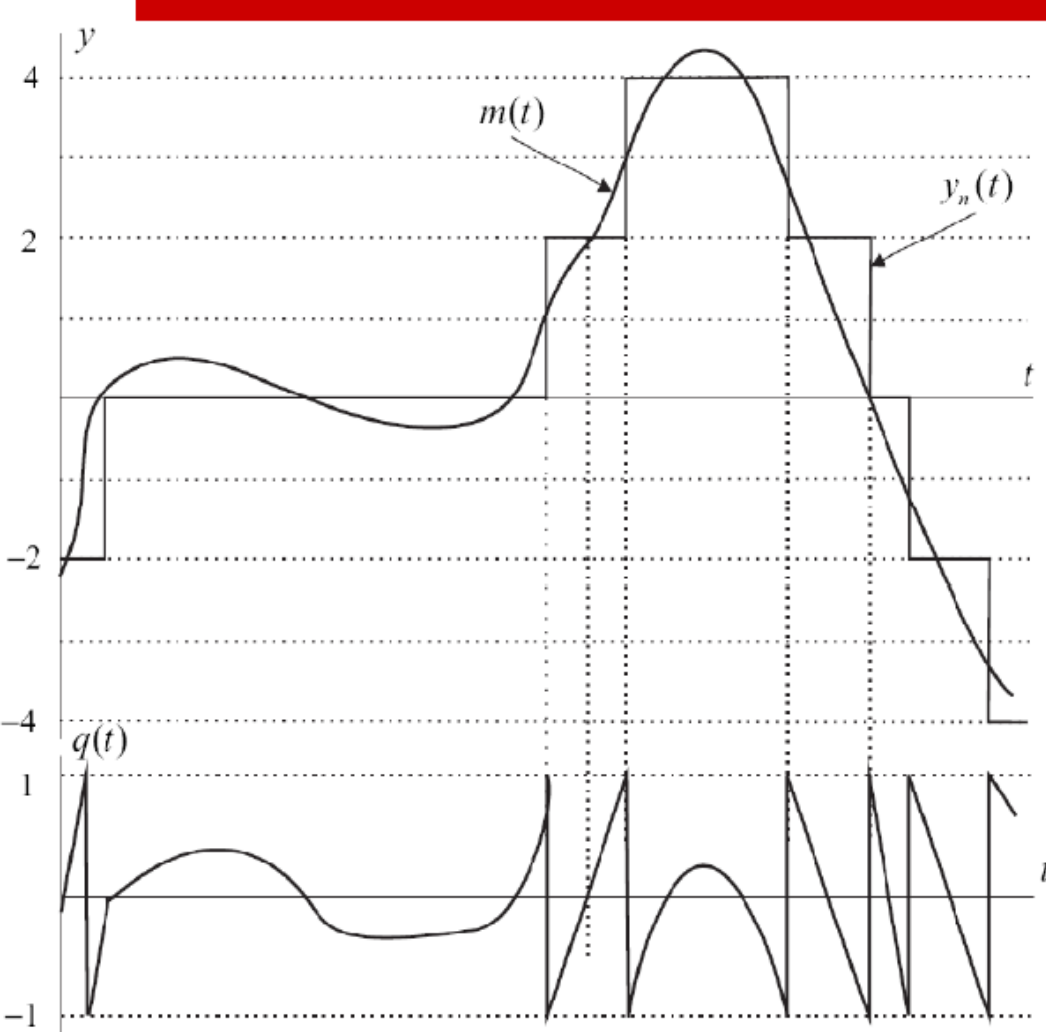


$$x \in \{(n-1)\Delta, n\Delta\} \Rightarrow y = (n - \frac{1}{2})\Delta.$$

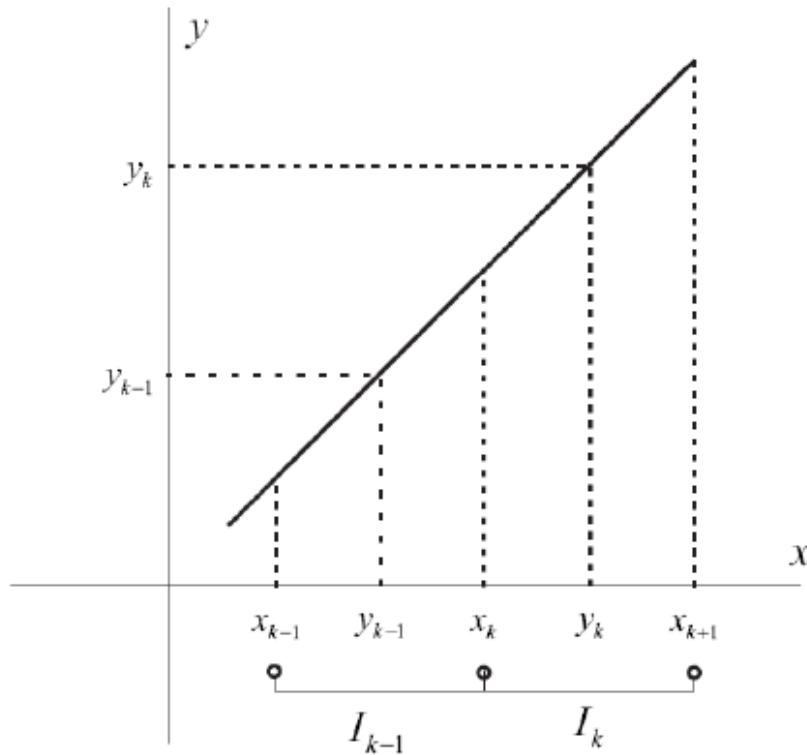
$$n = -\frac{L}{2} + 1, -\frac{L}{2} + 2, \dots, \frac{L}{2} - 1, \frac{L}{2}$$



Ομοιόμορφη Κβάντιση-Παράδειγμα



Θόρυβος Κβάντισης



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

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

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



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

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

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

$$\text{Σφάλμα} \quad |q| \leq \frac{\Delta}{2}$$

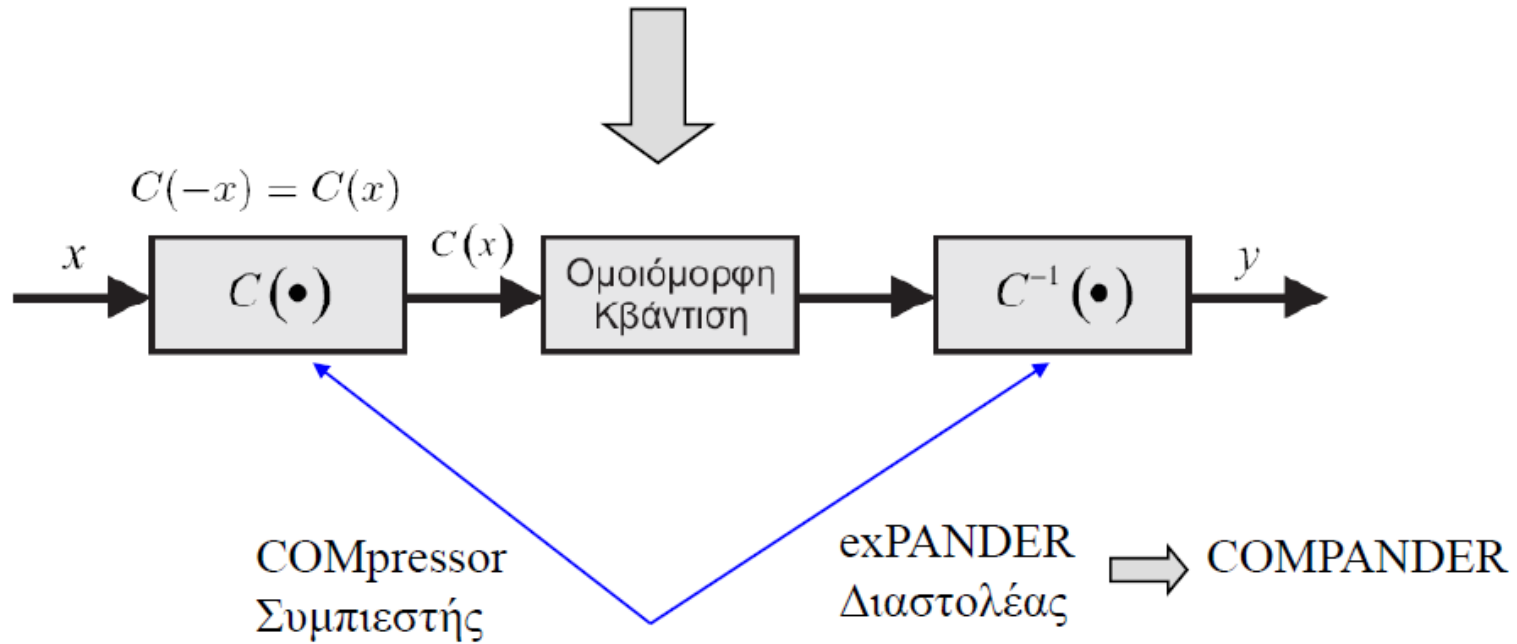
Μη-ομοιόμορφη Κβάντιση

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

Πρόβλημα με αυξομείωση της έντασης

Ομοιόμορφη Κβάντιση

Μη-ομοιόμορφη Κβάντιση

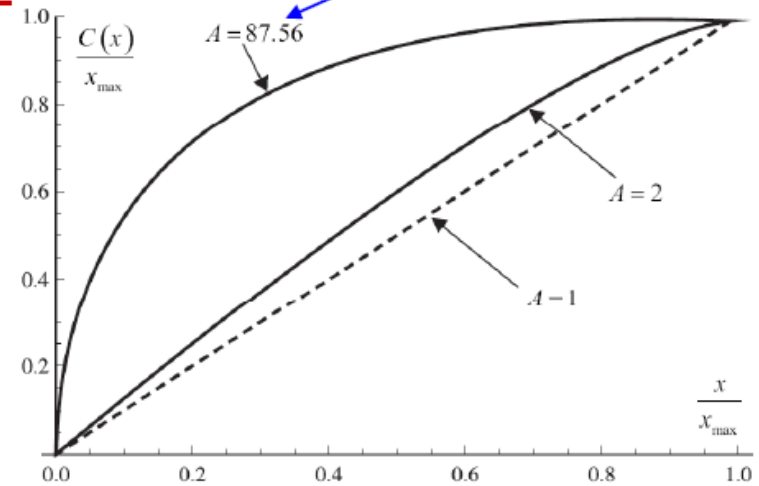


Μη-ομοιόμορφη Κβάντιση

Ευρωπαϊκό PCM

A-law COMPANDER:

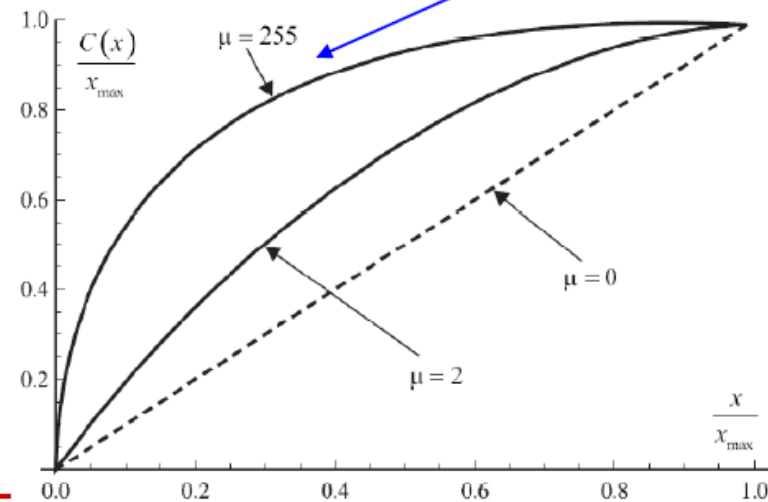
$$C(x) = \begin{cases} \frac{A|x|}{1+\log A} \operatorname{sgn}(x), & 0 \leq \frac{|x|}{x_{\max}} \leq \frac{1}{A} \\ x_{\max} \left[\frac{1+\log\left(\frac{A|x|}{x_{\max}}\right)}{1+\log A} \right] \operatorname{sgn}(x), & \frac{1}{A} \leq \frac{|x|}{x_{\max}} \leq 1 \end{cases}$$



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



Μη ομοιόμορφη κβάντιση

A-Law: Europe $A = 87.56$

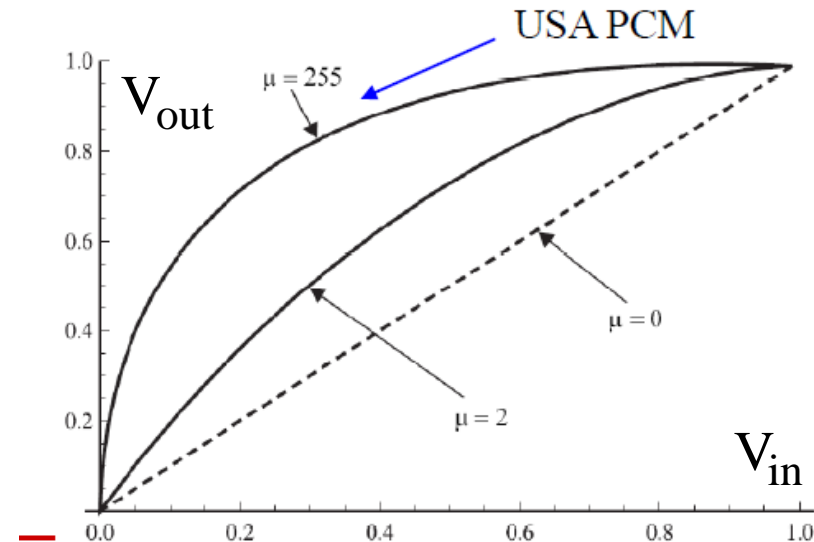
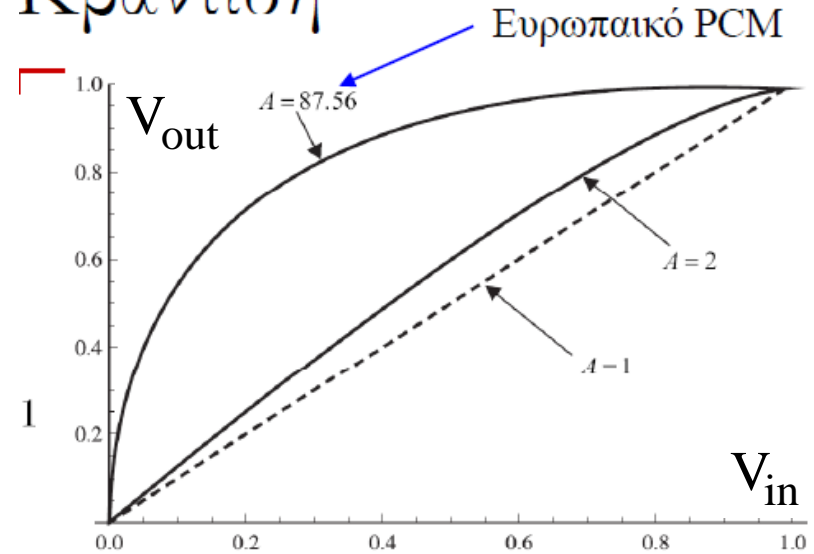
$$V_{\text{out}} = \frac{1 + V_{\text{in}} \log A}{1 + \log A}, \quad \frac{1}{A} \leq V_{\text{in}} \leq 1$$

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}} A}{1 + \log A}, \quad 0 \leq V_{\text{in}} \leq \frac{1}{A}$$

μ -Law: USA, Japan $\mu = 255$

$$V_{\text{out}} = \frac{\log(1 + \mu V_{\text{in}})}{\log(1 + \mu)}, \quad 0 \leq V_{\text{in}} \leq 1$$

Κβάντιση



ITU-T RECOMMENDATION

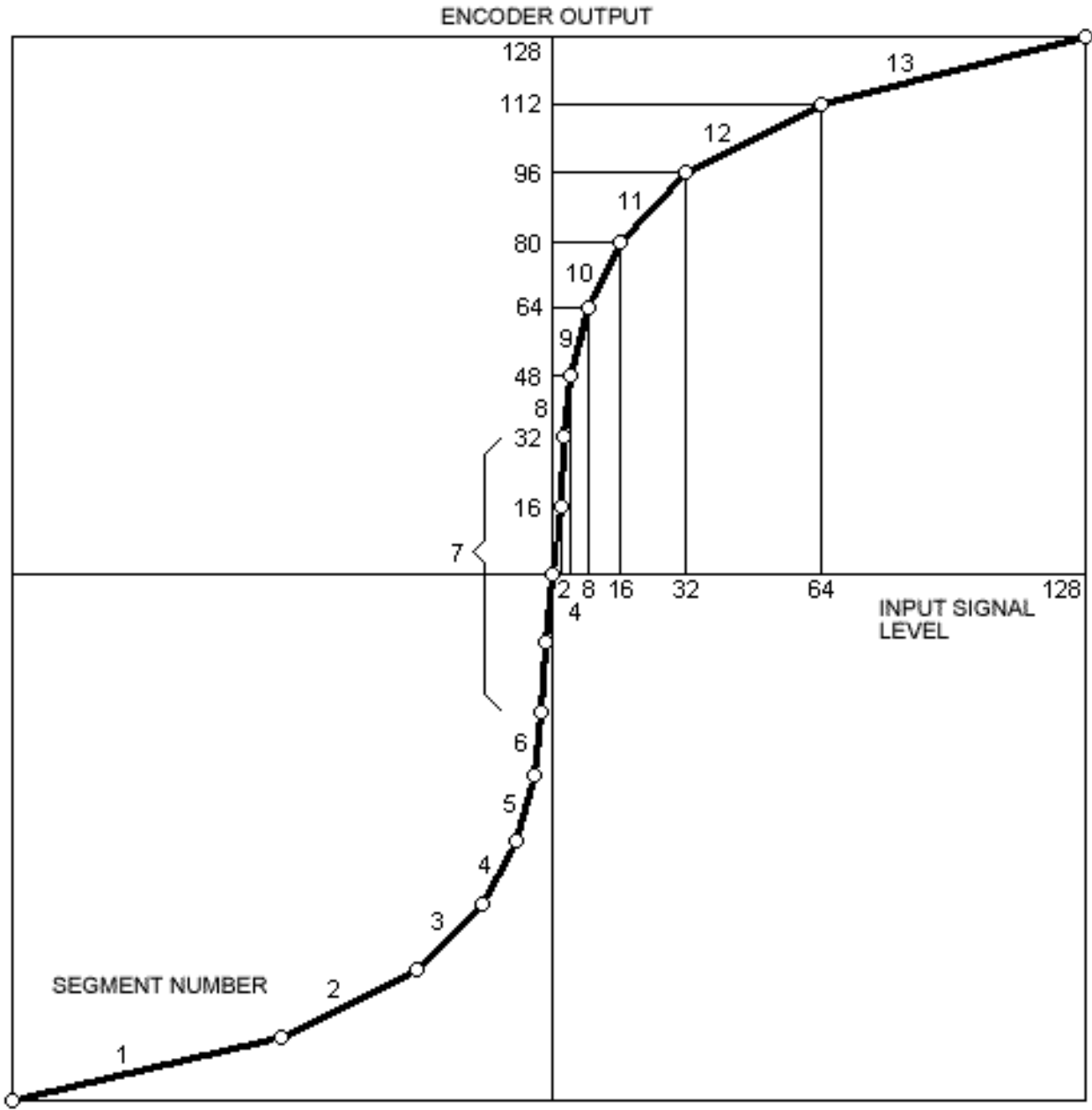
Τηλεφωνία

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

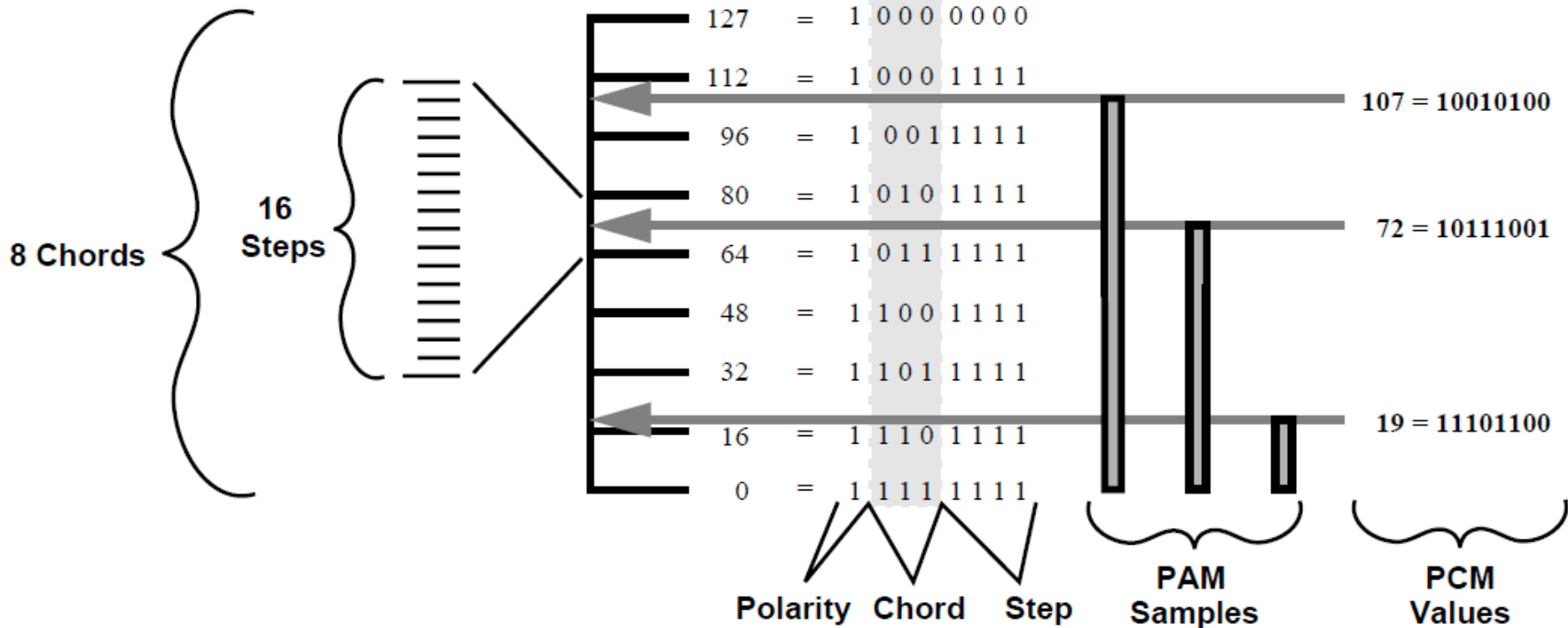
Δειγματοληψία
8000 Hz

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

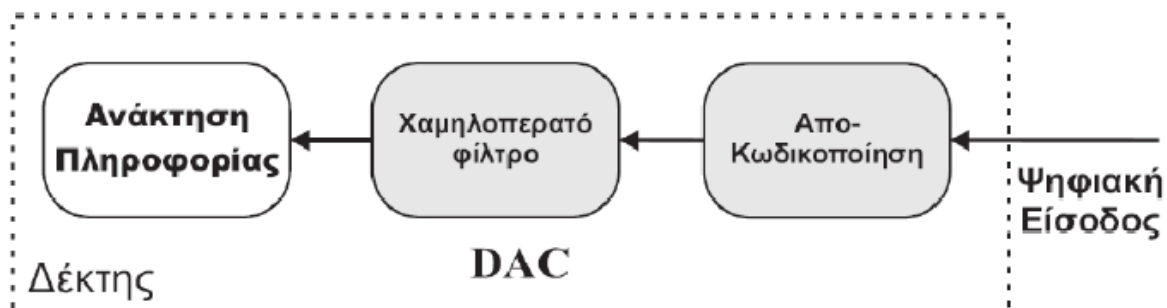
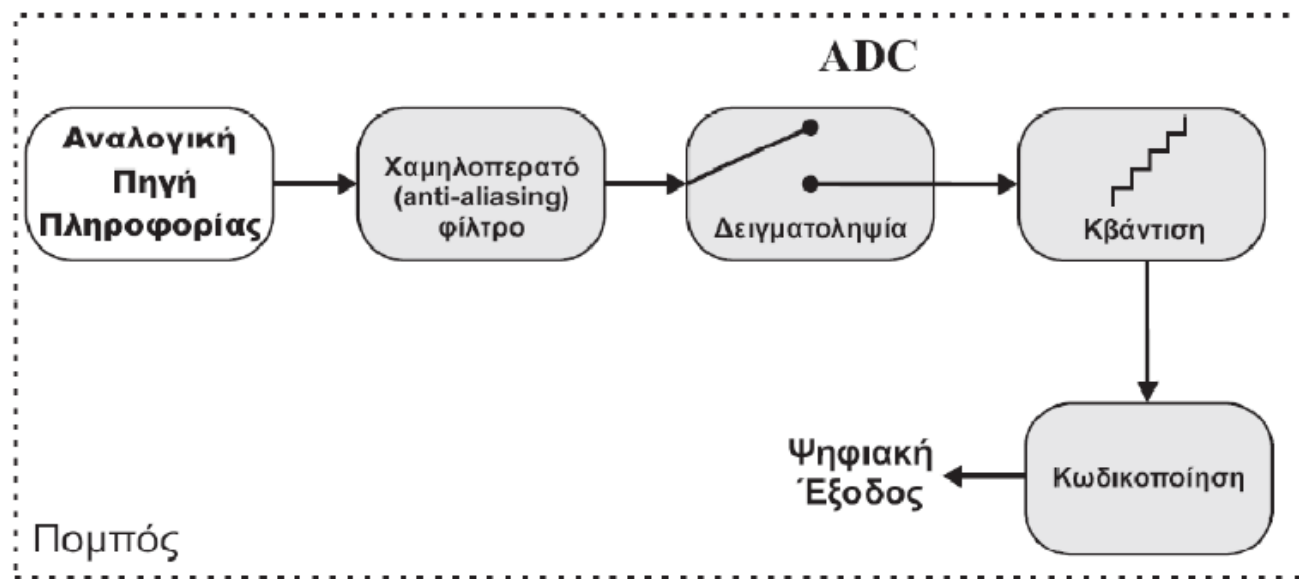


ITU-T RECOMMENDATION (συνέχεια)



Παλμοκωδική Διαμόρφωση (Pulse Code Modulation-PCM)

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



Επίδοση PCM

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

Έστω ότι το σήμα (ισχύος S) έχει τιμές ομοιόμορφα κατανομημένες στο $[-M, +M]$, δηλ. έχει εύρος τιμών $2M$. Αν έχουμε n στάθμες (βήματα) κβαντισμού, τότε:

$$n \Delta = 2M \Rightarrow \Delta = 2M / n$$

$$\text{SNR}_{o,q} = \frac{n^2 12S}{(2M)^2} = \frac{3n^2 S}{M^2}$$

Για binary PCM, ο αριθμός των bits του κώδικα για την κωδικοποίηση των n σταθμών κβαντισμού, είναι $\log_2 n$.

Έστω ότι η πληροφορία έχει εύρος ζώνης $B = \omega_s$

Η δειγματοληψία θα γίνεται με συχνότητα $2\omega_s$ οπότε τα δείγματα απέχουν μεταξύ τους $2\pi / 2\omega_s = \pi / \omega_s$ sec.

Στο χρονικό αυτό διάστημα μπορούμε να απλώσουμε τα $\log_2 n$ bits του κώδικα. Δηλ. κάθε bit διαρκεί

$$T = \pi / (\omega_s \log_2 n) \text{ sec} \Rightarrow 2\pi / B = \pi / (\omega_s \log_2 n) \Rightarrow \mathbf{B = 2\omega_s \log_2 n}$$

$$\Rightarrow \log_2 n = B / 2\omega_s \Rightarrow n = 2^{B/2\omega_s} \Rightarrow n^2 = 2^{B/\omega_s}$$

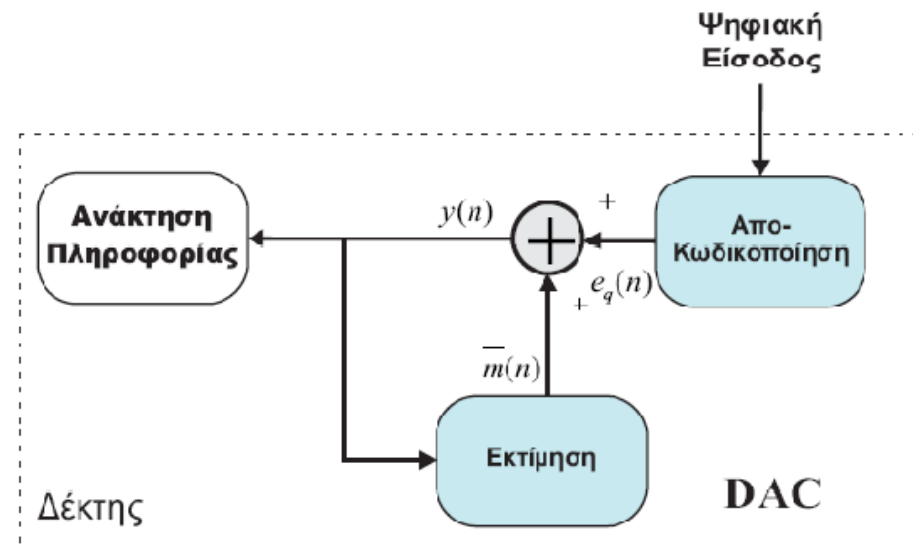
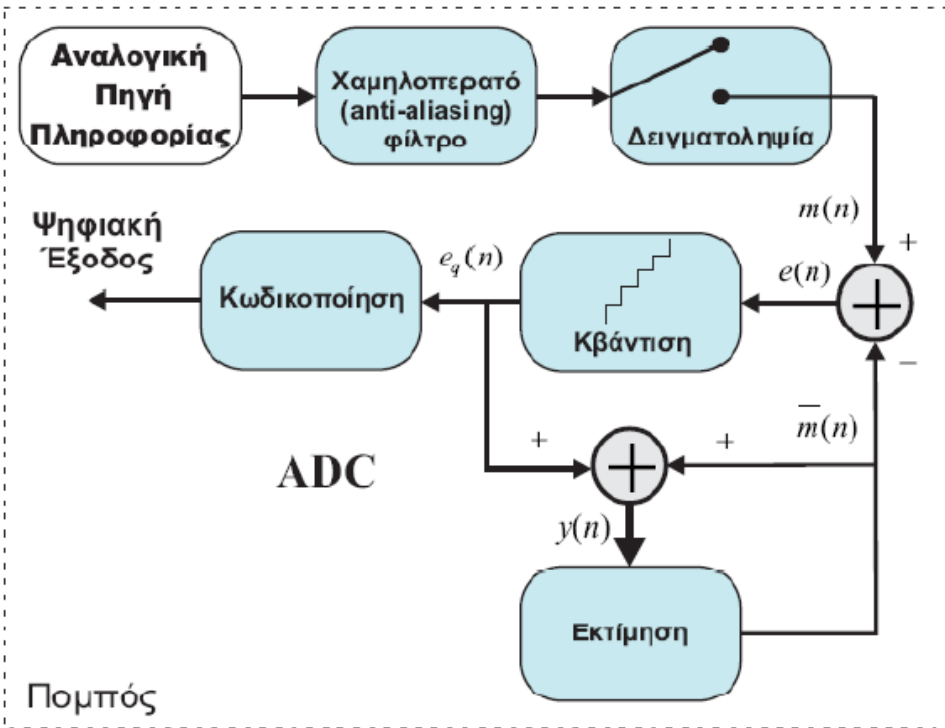
$$\text{SNR}_{o,q} = \frac{n^2 12S}{(2M)^2} = \frac{3S}{M^2} 2^{B/\omega_s}$$

Δηλ. ο λόγος σήματος προς θόρυβο κβάντισης εξαρτάται (αυξάνεται) **εκθετικά** από το εύρος ζώνης B του σήματος PCM. Για να αυξήσουμε το B αυξάνουμε τις στάθμες n .

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.

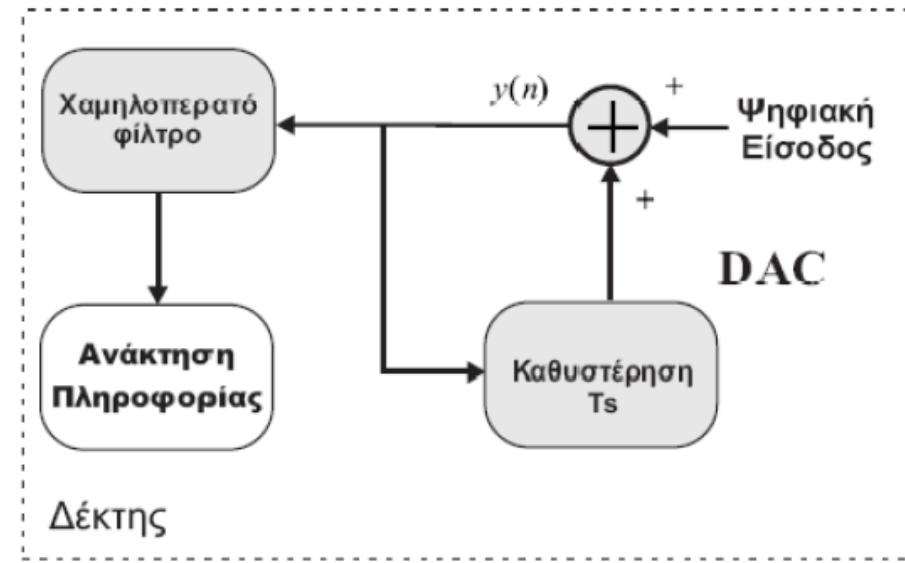
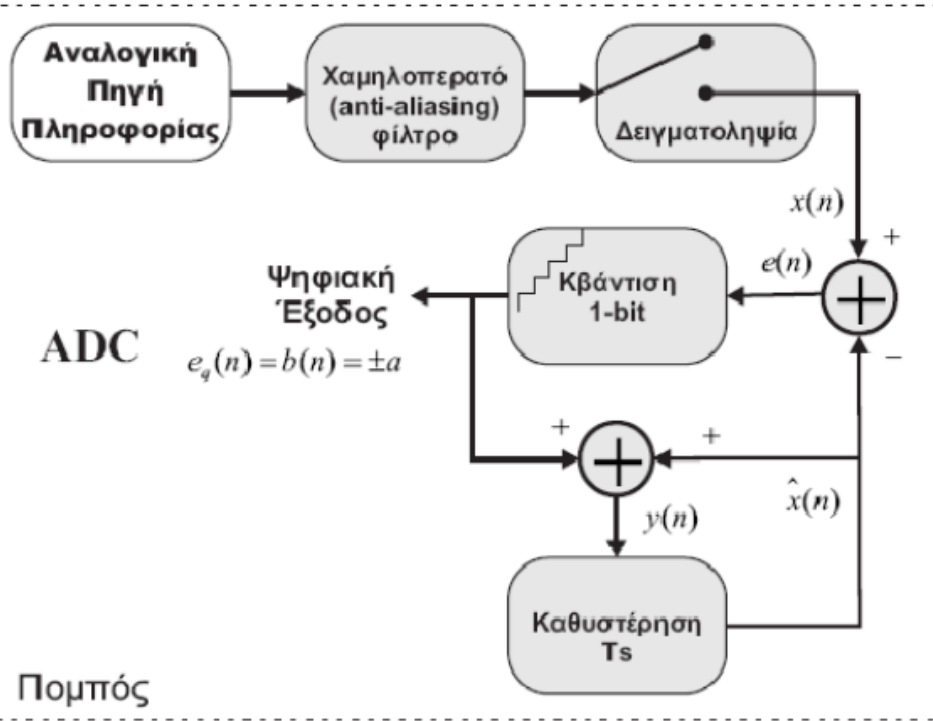
Το DPCM χρησιμοποιείται σε πρότυπα όπως το *Joint Photographic Experts Group (JPEG)* για την ψηφιοποίηση εικόνας και σαν *Adaptive DPCM (ADPCM)* για τη συμπίεση ήχου.

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)



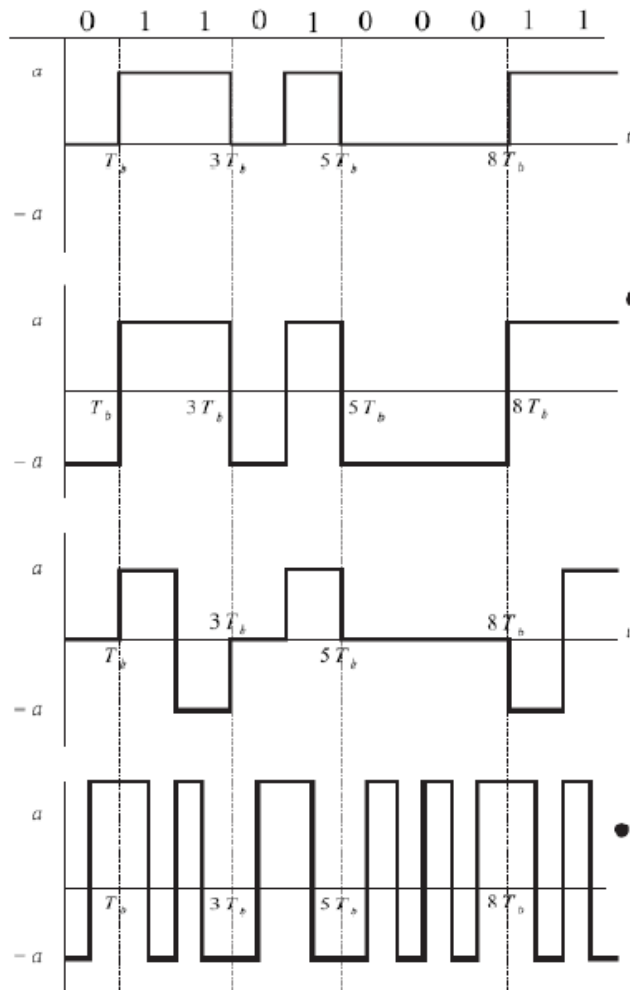
Κωδικοποίηση (Encoding)

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 .

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.