

2. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Για πολλά χρόνια, ο μόνος τρόπος μετάδοσης ενός σήματος ήταν σε αναλογική μορφή. Αυτό σημαίνει πως το σήμα έχει άπειρες τιμές τάσης. Επίσης ένα σήμα είτε μεταδίδεται σε ενσύρματο είτε σε ασύρματο μέσο υφίσταται εξασθένηση και γι' αυτό έχει την ανάγκη ενίσχυσης σε τακτές αποστάσεις.

Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι στο σήμα προστίθεται και θόρυβος κατά την διάδοση του μέσα στο μέσο και όταν ενισχύεται στην ουσία ενισχύεται με τον θόρυβο. Σε κάθε βαθμίδα ενίσχυσης, στο προϊόν της προηγούμενης βαθμίδας έχει προστεθεί και θόρυβος, με αποτέλεσμα η η-οστή βαθμίδα να ενισχύει μόνο θόρυβο. Το μέτρο της ποιότητας της επικοινωνίας είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (ή SNR, S/N, Signal to Noise Ratio). Είναι φανερό, πως όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της επικοινωνίας και, κατά συνέπεια, τόσο μεγαλύτερο είναι και το π. Στην θεωρητική περίπτωση, που ο λόγος σήματος προς θόρυβο τείνει στο άπειρο, τείνει στο άπειρο και ο αριθμός n των βημάτων ενίσχυσης, που είναι απαραίτητα για να μηδενιστεί το σήμα και να ενισχύουμε μόνο θόρυβο.

Αφού το σήμα είναι αναλογικό, οι στάθμες που μπορεί να πάρει 'είναι άπειρες. Όταν προστίθεται θόρυβος, οι στάθμες του σήματος που προκύπτει περιλαμβάνονται στις αποδεκτές τιμές σήματος με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει διαχωρισμός μεταξύ σήματος και θορύβου.

Τα τελευταία χρόνια προέκυψε και ένα ακόμη πρόβλημα. Με την ανάπτυξη και εξέλιξη των ψηφιακών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων παρουσιάστηκε η ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ αυτών των συστημάτων, με αποτέλεσμα να πρέπει το ψηφιακό σήμα να μετατραπεί σε αναλογικό, να μεταδοθεί και στο σύστημα λήψης να μετατραπεί πάλι σε ψηφιακό. Εδώ δημιουργείται πρόβλημα επειδή, λόγω θορύβου, η ψηφιακή επικοινωνία σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολη έως αδύνατη.

Τα ψηφιακά συστήματα έρχονται να λύσουν προβλήματα που αντιμετωπίζουμε με τις αναλογικές επικοινωνίες. Αφού λοιπόν ο τρόπος μετάδοσης είναι ψηφιακός μιλάμε πλέον για ψηφιακή επικοινωνία.

Πρώτα απ' όλα, και μόνο το ότι είναι ψηφιακή, δηλαδή κάθε λέξη που μεταδίδεται αποτελείται από 0 και 1, σημαίνει πως έχουμε δύο διακριτές στάθμες αντί για τις άπειρες στάθμες του αναλογικού σήματος.

Αν μεταφράσουμε τις δύο διακριτές στάθμες σε αντίστοιχες τάσεις, εύκολα καταλαβαίνουμε, πως προσθήκη θορύβου θα άλλαζε τις τιμές των τάσεων. Αφού όμως τάση μεγαλύτερη από την μεγαλύτερη που έχουμε ορίσει ή μικρότερη από την μικρότερη δεν έχει νόημα για εμάς, ψαλιδίζεται και αγνοείται. Έτσι κάθε προσθήκη θορύβου είναι αβλαβής για το σήμα. Μόνη εξαίρεση είναι όταν η στάθμη του θορύβου έχει τιμή αντίθετη από αυτή του σήματος και μέγεθος μεγαλύτερο από το μισό της διαφοράς των δύο τάσεων. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως αφενός είναι πιο δύσκολο να επηρεαστεί το σήμα από θόρυβο, και αφετέρου είναι πλέον δυνατό, όχι να ενισχυθεί απλά το σήμα αλλά να αναγεννηθεί, με αφαίρεση έτσι του θορύβου που προστέθηκε σε κάθε βήμα. Τώρα πια το σήμα, μετά το n -οστό βήμα ενίσχυσης, είναι το ίδιο με το σήμα που εξέπεμψε η πηγή.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του ψηφιακού σήματος είναι ότι μας δίνει

την δυνατότητα, όχι μόνο να ανιχνεύουμε λάθη, αλλά και να τα διορθώνουμε. Το πέρασμα από τις αναλογικές στις ψηφιακές επικοινωνίες, που δημιουργεί τη βάση για τη μετάδοση όχι μόνο φωνής αλλά επίσης δεδομένων και εικόνας γρήγορα και οικονομικά υπήρξε ένα από τα βασικά στοιχεία για την εξέλιξη προς μία νέα εποχή στις τηλεπικοινωνίες, στοιχείο που οφείλεται επίσης και στις αλματώδεις τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων χρόνων, ιδιαίτερα στο χώρο της μικροηλεκτρονικής.

2.1.1 Η ΤΕΧΝΙΚΗ PCM

Η τεχνολογία της ψηφιακής μετάδοσης αρχίζει την εποχή που ο A.H. Reeves χρησιμοποίησε την αρχή της Παλμοκωδικής Διαμόρφωσης (Pulse Code Modulation, PCM) για μετάδοση ομιλίας με τη μορφή ψηφιακών σημάτων (1937).

Στην Παλμοκωδική Διαμόρφωση το σήμα δειγματοληπτείται και το πλάτος του κάθε σήματος "στρογγυλοποιείται" στην κοντινότερη τιμή από ένα σύνολο επιτρεπτών τιμών, έτσι ώστε χρόνος και πλάτος να είναι κβαντοποιημένα. Αυτή η τεχνική επιτρέπει τη μετάδοση του σήματος με τη μορφή κωδικοποιημένων ηλεκτρικών σημάτων.

Οι βασικές λειτουργίες στο τμήμα εκπομπής (transmitter) ενός συστήματος PCM είναι : δειγματοληψία, κβαντοποίηση, κωδικοποίηση και πολυπλεξία σημάτων.

Οι βασικές λειτουργίες στο τμήμα λήψης (receiver) είναι: αναγέννηση του λαμβανόμενου σήματος, αποπολυπλεξία, αποκωδικοποίηση, αποδιαμόρφωση των κβαντοποιημένων δειγμάτων. Η αναγέννηση πραγματοποιείται σε ενδιάμεσα σημεία στο δρόμο μετάδοσης, όπου θεωρείται απαραίτητο.

α) Δειγματοληψία (Sampling)

Με τον όρο "δειγματοληψία" περιγράφεται η διαδικασία λήψης τιμών - δειγμάτων ενός αναλογικού τηλεφωνικού σήματος με σταθερή συχνότητα, όπως ορίζεται" από το Θεώρημα Δειγματοληψίας.

Θεώρημα Δειγματοληψίας (Sampling Theorem)

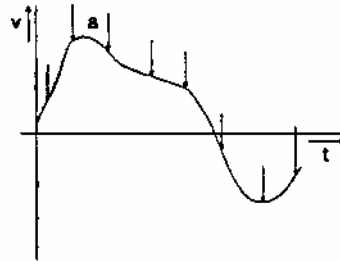
Το Θεώρημα Δειγματοληψίας του Shannon καθορίζει τον ελάχιστο ρυθμό με τον οποίο πρέπει να δειγματοληπτείται ένα αναλογικό σήμα, ώστε να μην υπάρχει απώλεια πληροφορίας κατά την αναπαραγωγή του αρχικού σήματος.

Η συχνότητα δειγματοληψίας f_s ενός αναλογικού σήματος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το διπλάσιο της μεγαλύτερης συχνότητας f_a , που περιέχεται στο σήμα

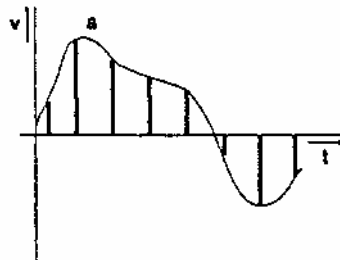
$$f_s > 2f_a$$

Το Θεώρημα Δειγματοληψίας μας δίνει τη δυνατότητα πλήρους μετάδοσης της πληροφορίας που περιέχεται σε ένα σήμα με περιορισμένο εύρος ζώνης, χρησιμοποιώντας δείγματα του σήματος, τα οποία λαμβάνονται ομοιόμορφα με ρυθμό που είναι ελαφρά υψηλότερος από το ρυθμό Nyquist, όπου ο

ρυθμός Nyquist (Nyquist rate) είναι $2W$ δείγματα ανά δευτερόλεπτο, για ένα σήμα με εύρος ζώνης W Hertz (σχήμα 2.1-1). Το σήμα που λαμβάνεται μετά το τέλος της δειγματοληψίας, είναι ένα σήμα διαμορφωμένο κατά πλάτος (Pulse Amplitude Modulation - PAM).



Περιοδική δειγματοληψία αναλογικού τηλεφωνικού σήματος a



Σήμα PAM αποτελούμενο από τα δείγματα αναλογικού τηλεφωνικού σήματος a

Σχ. 2.1-1 Δειγματοληψία Αναλογικού Σήματος

Τεχνική Δειγματοληψίας

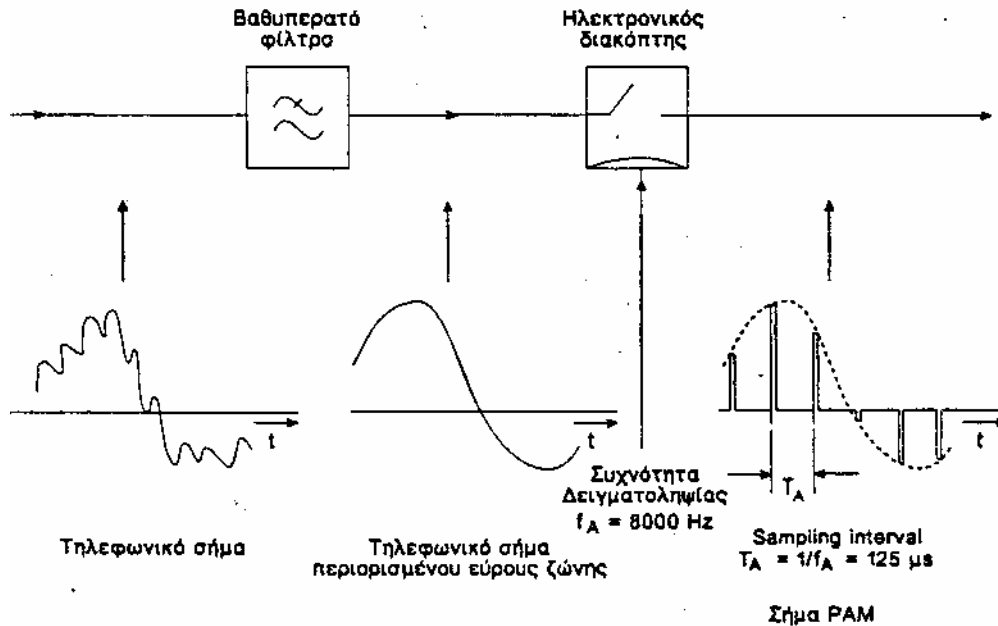
Στο σχήμα 2.1-2 φαίνεται πώς από ένα αναλογικό τηλεφωνικό σήμα προκύπτει μία σειρά δειγμάτων του σήματος.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για την δειγματοληψία είναι η εξής :

Το τηλεφωνικό σήμα οδηγείται σε ένα ηλεκτρονικό διακόπτη μέσω ενός φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (low-pass filter). Το φίλτρο κόβει τις συχνότητες που είναι υψηλότερες από το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας.

Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η εμφάνιση "συνιστωσών παρεμβολής" που προκαλούν φαινόμενα αναδίπλωσης.

Στη συνέχεια το περιορισμένου εύρους ζώνης σήμα , που έχει προκύψει από το φιλτράρισμα συχνοτήτων, οδηγείται στην έξοδο μέσω ενός ηλεκτρονικού διακόπτη. Ο διακόπτης διεγείρεται με συχνότητα ίση με τη συχνότητα δειγματοληψίας (8000 Hz). Στην έξοδο προκύπτει ένα σήμα διαμορφωμένο κατά πλάτος (PAM), δηλ. λαμβάνονται τα αναμενόμενα δείγματα του σήματος, τα οποία απέχουν μεταξύ τους χρονικά κατά 125 μ s.



Σχ. 2.1-2 Τεχνική Δειγματοληψίας

β) Κβαντοποίηση (Quantizing)

Ένα συνεχές σήμα, όπως είναι η φωνή, έχει ένα συνεχές πεδίο πλάτων και επομένως και τα δείγματα που προέρχονται από αυτό το σήμα, έχουν το ίδιο χαρακτηριστικό. Με άλλα λόγια, μέσα σε ένα πεπερασμένο πεδίο πλάτων του σήματος υπάρχει ένας άπειρος αριθμός επιπέδων. Στην πραγματικότητα δεν είναι απαραίτητο να μεταδίδονται τα ακριβή πλάτη των δειγμάτων του σήματος. Η ανθρώπινη ακοή, σαν τελικός αποδέκτης, μπορεί να διακρίνει πεπερασμένες τιμές έντασης. Αυτό σημαίνει ότι το αρχικό συνεχές σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί προσεγγιστικά με ένα σήμα, που έχει προκύψει από διακριτά πλάτη επιλεγμένα από ένα διαθέσιμο σύνολο, με όσο το δυνατόν μικρότερη εισαγωγή λάθους.

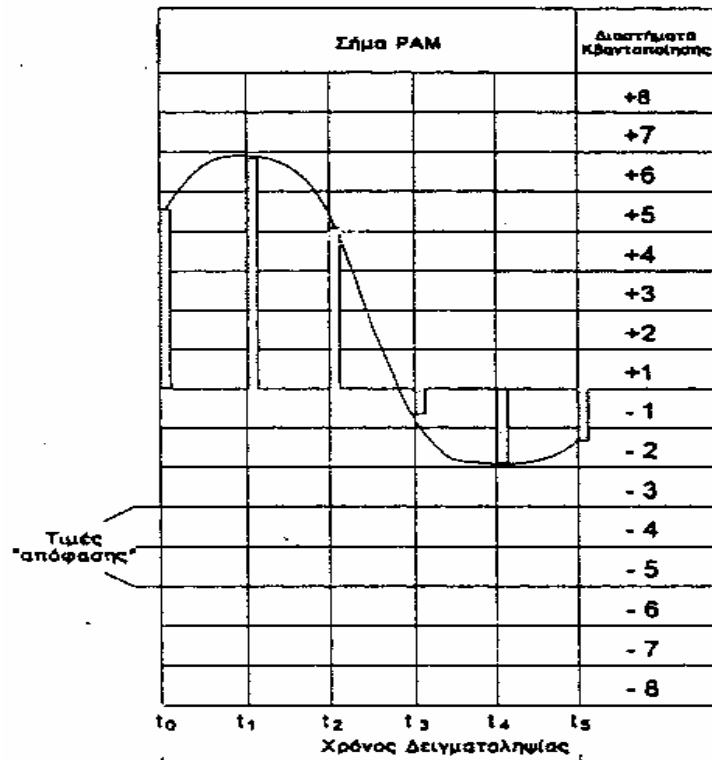
Η ύπαρξη ενός πεπερασμένου αριθμού επιπέδων διακριτού πλάτους είναι βασικό στοιχείο του PCM. Αρα τελικά, αν καθορίσουμε τα επίπεδα διακριτών πλάτων σε επαρκώς κοντινά διαστήματα, μπορούμε να κάνουμε το κατά προσέγγιση λαμβανόμενο σήμα πρακτικά ίδιο με το αρχικό συνεχές σήμα. Το διαμορφωμένο κατά πλάτος (PAM) σήμα εξακολουθεί να αναπαριστά το αρχικό σήμα σε αναλογική μορφή. Τα δείγματα ωστόσο μπορούν να μεταδοθούν και να υποστούν επεξεργασία καλύτερα σε ψηφιακή μορφή. Η μετατροπή ενός δείγματος του αρχικού αναλογικού σήματος σε ψηφιακή (διακριτή) μορφή ονομάζεται κβαντοποίηση.

Η αρχή της κβαντοποίησης φαίνεται στο σχήμα 2.1-3.

Στο σχήμα 2.1-3 για να απλοποιήσουμε την παρουσίαση όλης της διαδικασίας, έχουμε σχεδιάσει μόνο 16 ίσα διαστήματα (επίπεδα) κβαντοποίησης

Η αρίθμηση γίνεται ως εξής : ορίζονται 8 διαστήματα στη θετική κλίμακα, που αριθμούνται από +1 ως +8 και 8 διαστήματα στην αρνητική κλίμακα που αριθμούνται από -1 ως -8. Κάθε δείγμα αντιστοιχείται στο κατάλληλο

διάστημα κβαντοποίησης.



Σχ. 2.1-3 Ομοιόμορφη Κβαντοποίηση των Δειγμάτων Αναλογικού Τηλεφωνικού Σήματος

Η παραμόρφωση κβαντοποίησης, που προκύπτει στη λήψη σαν αποτέλεσμα των προηγούμενων, εμφανίζεται σαν θόρυβος υπερτιθέμενος στο σήμα. Η παραμόρφωση μειώνεται όσο ο αριθμός των διαστημάτων κβαντοποίησης αυξάνεται. Για το λόγο αυτό, στην πράξη χρησιμοποιούνται 256 άνισα διαστήματα κβαντοποίησης (ανομοιόμορφη κβαντοποίηση) με την εξής λογική :

Η κλίμακα των πλατών διαιρείται σε μικρά διαστήματα κβαντοποίησης για μικρές τιμές του πλάτους των δειγμάτων του σήματος και μεγάλα διαστήματα κβαντοποίησης για μεγάλες τιμές του σήματος. Με αυτή τη μέθοδο, ο λόγος του σήματος εισόδου προς την πιθανή διαφορά λόγω κβαντοποίησης έχει την ίδια σχεδόν τιμή για όλα τα πλάτη του σήματος εισόδου.

Η ανομοιόμορφη κβαντοποίηση πραγματοποιείται με τη βοήθεια χαρακτηριστικών, όπως προτείνονται από τη ITU-T :

α) τη χαρακτηριστική 13-τομέων, που χρησιμοποιείται στο σύστημα PCM 30 στην Ευρώπη

και

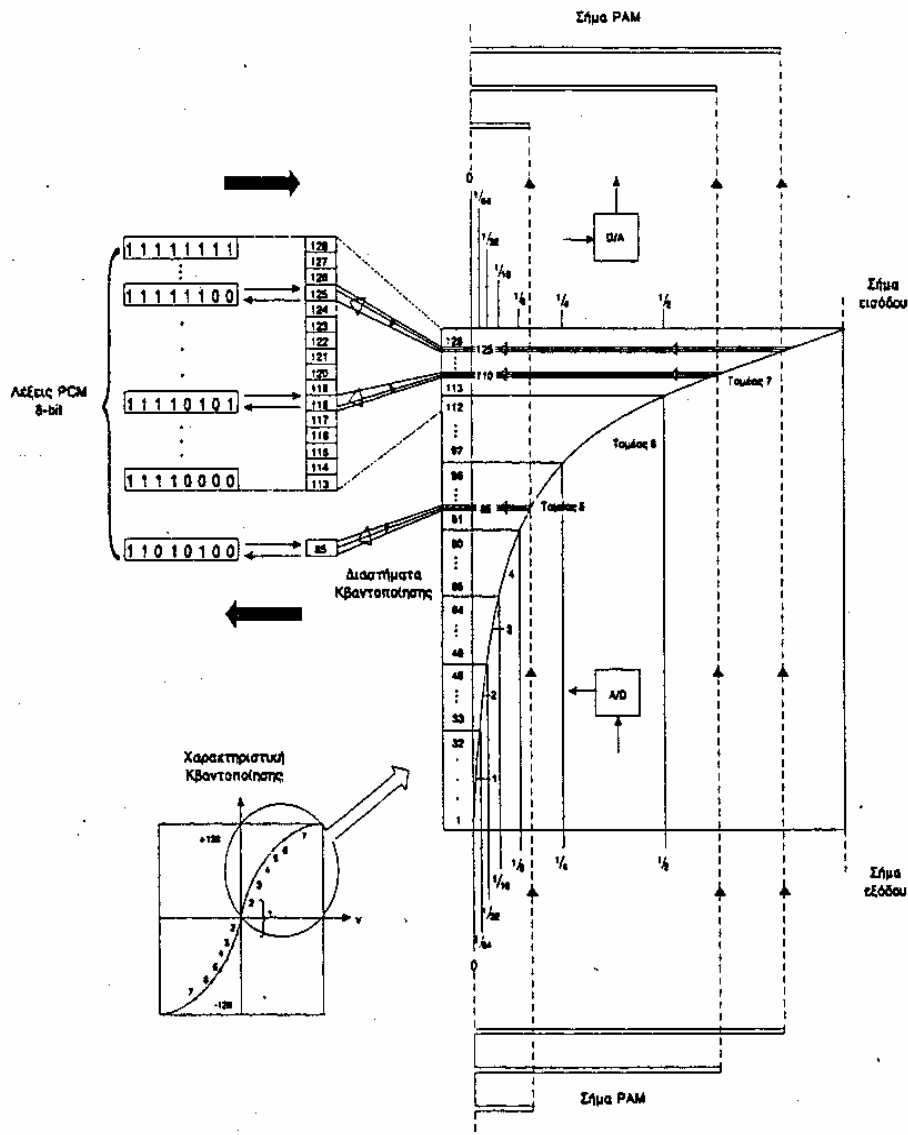
β) τη χαρακτηριστική 15-τομέων, που χρησιμοποιείται στο σύστημα PCM 24 στις ΗΠΑ, Καναδά και Ιαπωνία.

Στο σχήμα 2.1-4 φαίνεται η χαρακτηριστική των 13-τομέων και σε μεγέθυνση το θετικό τμήμα της . Η χαρακτηριστική αποτελείται από 7 τομείς στη θετική πλευρά και 7 τομείς στην αρνητική πλευρά. Οι τομείς 1 γύρω από το μηδέν αποτελούν στην πραγματικότητα ένα γραμμικό τομέα. Έτσι έχουμε συνολικά 13 τομείς.

γ) Κωδικοποίηση (Encoding)

Με το συνδυασμό των δύο διαδικασιών, δειγματοληψίας και κβαντοποίησης, το αρχικό σήμα περιορίζεται μεν σε ένα σύνολο διακριτών τιμών, αλλά η μορφή που έχει, δεν είναι η πλέον κατάλληλη για τη μετάδοση του σε μία γραμμή ή σε ένα κανάλι ραδιομετάδοσης.

Για να εκμεταλλευτούμε τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας και της κβαντοποίησης, απαιτείται η κωδικοποίηση, η μετατροπή δηλαδή των κβαντοποιημένων δειγμάτων σε μια μορφή κατάλληλη για μετάδοση σημάτων. Το σήμα PCM, που πρόκειται να μεταδοθεί, δημιουργείται έπειτα από κωδικοποίηση των διαστημάτων κβαντοποίησης. Με τη διαδικασία της κωδικοποίησης αντιστοιχείται μία λέξη PCM των 8-bit σε κάθε δείγμα. Επειδή ο συνολικός αριθμός των διαστημάτων κβαντοποίησης είναι $256 = 2^8$, οι λέξεις PCM έχουν μήκος 8 bits. Στο σχήμα 2.1-4, παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των διαστημάτων που αντιστοιχούν στον τομέα 7.



Σχ. 2.1-4 Κβαντοποίηση & Κωδικοποίηση των Δειγμάτων Αναλογικού Σήματος

δ) Πολυπλεξία (Multiplexing)

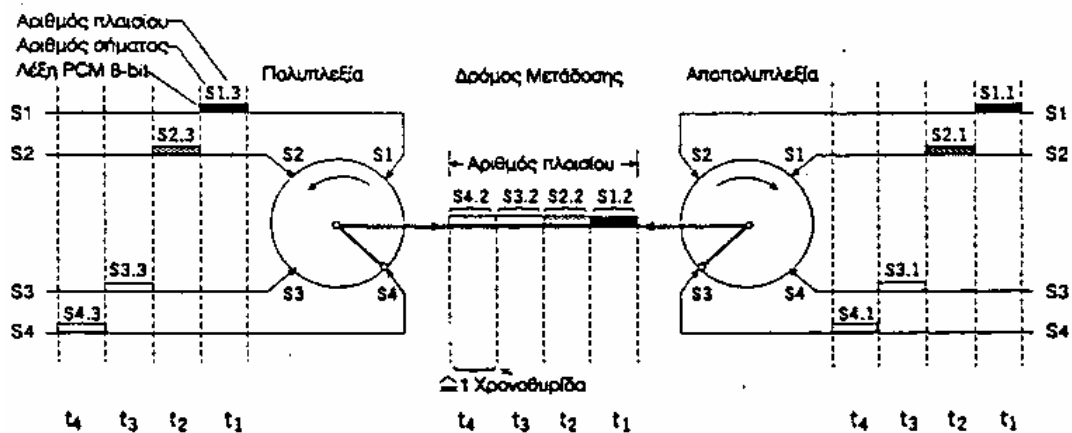
Ενα σημαντικό χαρακτηριστικό της διαδικασίας δειγματοληψίας είναι "η διατήρηση του χρόνου". Αυτό σημαίνει ότι η μετάδοση των δειγμάτων του μηνύματος δεσμεύει το κανάλι μετάδοσης για ένα μόνο κλάσμα του διαστήματος δειγματοληψίας σε περιοδική βάση και κατ' αυτόν τον τρόπο, το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε διαδοχικά δείγματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλες ανεξάρτητες πηγές μηνυμάτων, βασιζόμενα "στην κατανομή του χρόνου (time sharing basis)".

Επιτυγχάνεται έτσι ένα σύστημα TDM (Time Division Multiplexing), που επιτρέπει την από κοινού χρησιμοποίηση ενός καναλιού μετάδοσης από ένα πλήθος ανεξάρτητων πηγών μηνύματος χωρίς αμοιβαίες παρεμβολές. Οι κωδικοποιημένες με 8 bit λέξεις PCM από έναν αριθμό τηλεφωνικών καναλιών μπορούν να μεταδοθούν διαδοχικά σε επαναλαμβανόμενους κύκλους : Μία λέξη PCM ενός τηλεφωνικού σήματος ακολουθείται από λέξεις PCM όλων των άλλων τηλεφωνικών σημάτων σε μία καθορισμένη σειρά. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί ένα PCM σήμα πολυπλεξίας (PCM time - division multiplexed signal).

Η γενική ιδέα του TDM παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1-5

Οι διαδικασίες που σχετίζονται με την πολυπλεξία εκτελούνται από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Στο σχ. 2.1-5 χρησιμοποιούνται, για λόγους ευκολίας, τέσσερα σήματα εισόδου που δειγματοληπτούνται διαδοχικά από ένα περιστρεφόμενο διακόπτη Α. Ο διακόπτης Α κινείται από τη μία είσοδο στην άλλη, σε συγχρονισμό με την εισερχόμενη ακολουθία λέξεων PCM. Αφού ο Α μετακινηθεί από τη θέση S1 στη θέση S4, το πολυπλεγμένο σήμα PCM είναι διαθέσιμο στην έξοδο του Α. Το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου μεταδίδεται μια λέξη PCM ονομάζεται χρονοθυρίδα (time slot).

Μία σειρά από bit που περιέχει μια λέξη PCM από κάθε σήμα εισόδου είναι γνωστή ως πλαίσιο (frame). Στο παράδειγμα του σχήματος 2.1-5 το πλαίσιο αποτελείται από 4 διαδοχικές λέξεις PCM, δηλαδή 4 χρονοθυρίδες, που προέρχονται από τα σήματα μετάδοσης S1, S2, S3 και S4. Στο σύστημα μετάδοσης PCM 30 το πλαίσιο αποτελείται από 32 χρονοθυρίδες.



Σχ 2.1-5 Αρχή Πολυπλεξίας-Αποπολυπλεξίας

ε) Αναγέννηση σήματος (Regeneration)

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων PCM έγκειται στην δυνατότητα ελέγχου της επίδρασης της παραμόρφωσης και του θορύβου, που παράγονται κατά τη μετάδοση ενός σήματος PCM σε ένα κανάλι.

Αυτή η ικανότητα των συστημάτων επιτυγχάνεται με ανακατασκευή του σήματος με μία σειρά αναγεννητικών επαναληπτών, που τοποθετούνται σε επαρκώς κοντινές αποστάσεις κατά μήκος του δρόμου μετάδοσης.

Σε κάθε αναγεννητή εκτελούνται οι ακόλουθες λειτουργίες : ισοστάθμιση, εξαγωγή χρονισμού και λήψη απόφασης.

ζ) Αποπολυπλεξία (Demultiplexing)

Στη λήψη το κάθε σήμα PCM κατανέμεται στην κατάλληλη έξοδο. Όπως η λειτουργία της πολυπλεξίας, έτσι και η αποπολυπλεξία πραγματοποιείται πλήρως με ηλεκτρονικά κυκλώματα αλλά κατά την αντίστροφη σειρά.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1-5 τα ανεξάρτητα σήματα PCM (S1, S2, S3, S4) ανακτώνται από το πολυπλεγμένο σήμα PCM, δηλαδή οι λέξεις PCM διανέμονται στις κατάλληλες εξόδους. Ο διακόπτης Β δέχεται το πολυπλεγμένο PCM σήμα, και συγχρονισμένο με το διακόπτη Α διανέμει τις PCM λέξεις στις 4 εξόδους.

η) Αποκωδικοποίηση (Decoding)

Ο αποκωδικοποιητής λαμβάνει ένα ψηφιακό σήμα μήκους 8 bit και παράγει το αντίστοιχο σήμα εξόδου. Η χαρακτηριστική για την αποκωδικοποίηση είναι η ίδια όπως και για την κωδικοποίηση στην εκπομπή. Οι PCM λέξεις αποκωδικοποιούνται με τη σειρά που λαμβάνονται και μετατρέπονται σε σήμα P AM. Το σήμα PAM οδηγείται σε ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων, που αναπαράγει το αρχικό αναλογικό τηλεφωνικό σήμα και σε ένα διαφορικό μετασχηματιστή, που μετατρέπει τις δύο πλευρές (ομιλίας και ακοής) σε μία δισύρματη γραμμή προς το συνδρομητή.

2.1.2 Ψηφιακοποίηση αναλογικών σημάτων και κωδικοποίηση (μια αναλυτική παρουσίαση)

Οι Τηλεπικοινωνίες της εποχής μας είναι η εξέλιξη μιας προσπάθειας που άρχισε στα μέσα του 1800. Το πρώτο είδος τηλεπικοινωνίας ήταν τότε η Τηλεγραφία.

Τηλεγραφία είναι η μεταβίβαση γραμμάτων του αλφαβήτου μέσω κώδικα, του γνωστού κώδικα MORSE, όπου κάθε γράμμα είναι συνδυασμός από τελείες και παύλες.

Είναι προφανές ότι ο κώδικας αυτός είναι εξ ολοκλήρου ψηφιακός (δύο διακεκριμένες καταστάσεις “τελεία”, “παύλα”).

Η Τηλεφωνία που εφευρέθηκε κατόπιν (1876), είναι αναλογική στο τμήμα της φωνής ενώ στο τμήμα της σηματοδότησης (επιλογή ψηφίων και ανταλλαγή κριτηρίων μεταξύ κέντρου και συνδρομητή) είναι ψηφιακή. Ακόμη μέχρι σήμερα σε αρκετό ποσοστό παραμένει αναλογική.

Η αναλογική μετάδοση φωνής παρουσιάζει πολλά προβλήματα ποιότητας (θόρυβος, διακοπές, παραμορφώσεις κλπ). Η μετατροπή της σε ψηφιακή προσπαθεί και λύνει τα περισσότερα από αυτά.

Το πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε στην ψηφιακοποίηση της φωνής έχει ως εξής:

- α) Μετατροπή της αναλογικής φωνής σε ψηφιακό κωδικοποιημένο σήμα.
- β) Μετάδοση - Μεταγωγή του σήματος αυτού στον προορισμό του (δέκτη) και
- γ) Μετατροπή του πάλι σε αναλογικό (φωνή) προκειμένου να ακουσθεί από τον δέκτη - άνθρωπο.

Εφευρέτης της ψηφιακής αυτής μεθόδου θεωρείται ο Γάλλος Alec Reeves (1937) ο οποίος ανέπτυξε την μέθοδο που ονομάζεται **Παλμοκωδική Διαμόρφωση -Pulse Code Modulation (PCM)**.

Γιά να επιτευχθεί “ταυτόχρονη” μετάδοση πολλών σημάτων φωνής μαζί, τα σήματα PCM πολυπλέκονται στο πεδίο του χρόνου όπως θα δούμε παρακάτω. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται στα αγγλικά **Time Division Multiplexing (TDM)**.

Η παλμοκωδική διαμόρφωση βασίστηκε στην θεωρία της δειγματοληψίας που ανέπτυξε ο μαθηματικός Shannon (1936) και απέδειξε το θεώρημα της δειγματοληψίας.

Το 1937 ήταν αδύνατο να υλοποιηθούν οι θεωρητικές αυτές εφευρέσεις λόγω της αδυναμίας της τότε τεχνολογίας. Το 1960 όμως με την εφεύρεση του τρανζίστορ κατασκευάζεται για πρώτη φορά σύστημα διαμόρφωσης PCM και χρησιμοποιείται στις ζεύξεις μεταξύ αναλογικών τηλεφωνικών κέντρων.

Με την χρησιμοποίηση της διαμόρφωσης PCM κατασκευάστηκαν συστήματα πολλαπλής μετάδοσης με διαχωρισμό ως προς το χρόνο. Τα συστήματα αυτά που θα περιγραφούν στα επόμενα θα τα αναφέρουμε στην συνέχεια σαν PCM - TDM. Με τα συστήματα αυτά έγινε δυνατή η μετάδοση ταυτόχρονα πολλών συνδιαλέξεων (συνήθως 30) από δύο μόνο ζεύγη αγωγών

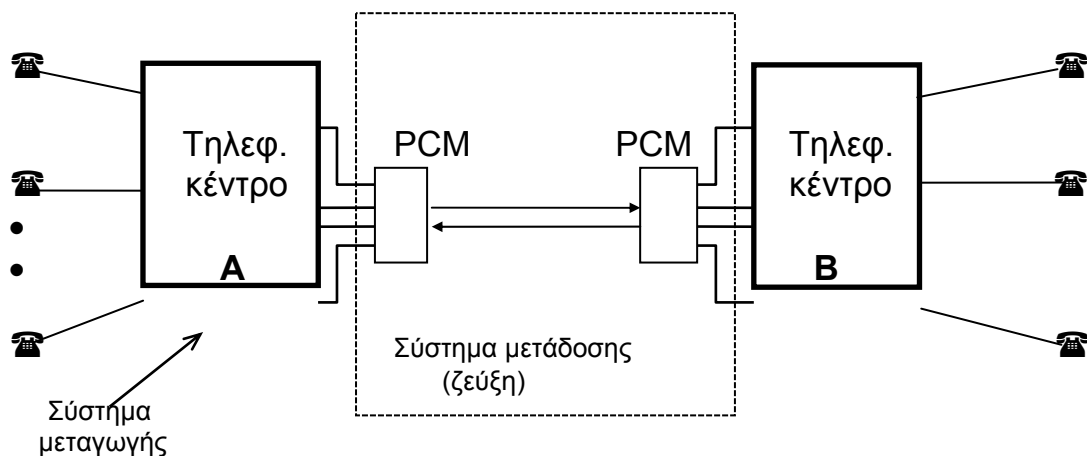
τηλεφωνικού καλωδίου.

Από το 1959 λειτούργησε για πειραματικούς σκοπούς από ερευνητές της Bell στην Αμερική και το πρώτο ψηφιακό τηλεφωνικό κέντρο που ονομάστηκε ESSEX (Experimental Solid State Exchange). Το κέντρο αυτό είχε καθοδήγηση από Ηλεκτρονικού Υπολογιστή ενταμιευμένου προγράμματος (Stored Program Control ή SPC κέντρο). Του είδους αυτού τα κέντρα αναφέρονται και σήμερα σαν κέντρα SPC . Η διάδοσή τους άρχισε μετά το 1980 και στην χώρα μας σήμερα καλύπτουν περίπου το 45% των εγκατεστημένων τηλεφώνων. Χαρακτηριστικό των κέντρων αυτών όσον αφορά την ψηφιακή τεχνολογία είναι ότι και η επιλογή γίνεται ψηφιακά δηλαδή δεν χρησιμοποιούνται οι κλασικοί επιλογείς αλλά γίνεται μεταγωγή στο πεδίο του χρόνου.

Είναι προφανές ότι όπου είναι ανάγκη να συνδεθούν αναλογικά κέντρα με ψηφιακά χρειάζεται μία μετατροπή των σημάτων ούτως ώστε να συνεργάζονται. Αυτό σήμερα προσθέτει ένα σημαντικό κόστος στην συνεργασία παλαιάς και νέας τεχνολογίας. Όταν όμως όλα τα συστήματα γίνουν ψηφιακά θα είναι πολύ οικονομικότερα.

2.1.3 Μετάδοση - Μεταγωγή

Κρίνεται σκόπιμο να εξηγήσουμε εδώ την έννοια της ζεύξης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων όπου χρησιμοποιούνται συστήματα μετάδοσης και την έννοια της μεταγωγής.



Σχ. 1.2

Σύστημα μεταγωγής ονομάζουμε το σύστημα εκείνο όπου διεκπεραιώνονται οι αυτόματες διαδικασίες σύνδεσης ενός συνδρομητή του (καλούντος) με έναν άλλον ανάμεσα σε ένα πλήθος. Τα όργανα του συστήματος είναι κατειλημένα όσο διαρκεί η συνδιάλεξη και μετά απολύονται και είναι στην διάθεση άλλου συνδρομητή. Σύστημα μεταγωγής είναι το τηλεφωνικό κέντρο (σχ. 1.2).

Σύστημα μετάδοσης είναι το μέρος εκείνο του τηλεπικοινωνιακού συστήματος όπου υπάρχει σταθερή ζεύξη (γραμμή μεταδόσεως) μεταξύ δύο σημείων και μεταδίδεται το σήμα. Στο παραπάνω σχήμα

σύστημα μετάδοσης είναι οι γραμμές ζεύξης και τα συστήματα PCM που συνδέουν τα δύο τηλεφωνικά κέντρα Α και Β.

2.1.4 Ψηφιακή Μετάδοση

Η διαμόρφωση PCM αποτελεί έναν τρόπο μετατροπής αναλογικών σημάτων (πληροφοριών) σε ψηφιακά. Όπως ξέρουμε στο μικρόφωνο γίνεται αναλογική παράσταση της φωνής μας με το μικροφωνικό ρεύμα. Όπως θα δούμε στην συνέχεια είναι δυνατό με την διαμόρφωση PCM να παραστήσουμε από το μικροφωνικό ρεύμα ψηφιακά τη ανθρώπινη φωνή. Στην διαμόρφωση PCM η μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ακολουθεί τρεις διαδικασίες:

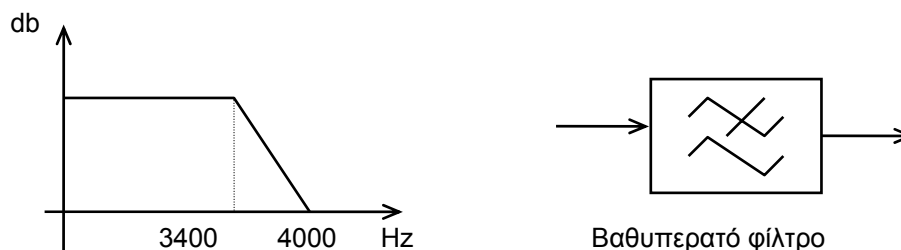
- Την Δειγματοληψία (sampling)
- Την Κβαντοποίηση (quantizing)
- Την Κωδικοποίηση (coding)

Σύμφωνα με το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon της θεωρίας πληροφοριών (information theory), για να μεταβιβάσουμε την πληροφορία που περιέχει ένα σήμα μέγιστης συχνότητας F , δεν είναι ανάγκη να μεταδώσουμε όλο το σήμα. Είναι αρκετό να μεταβιβάσουμε δείγματα του σήματος που να απέχουν μεταξύ τους το πολύ $1/2F$ sec. Αυτό σημαίνει ότι θα έχουμε τουλάχιστον $2F$ δείγματα ανά sec.

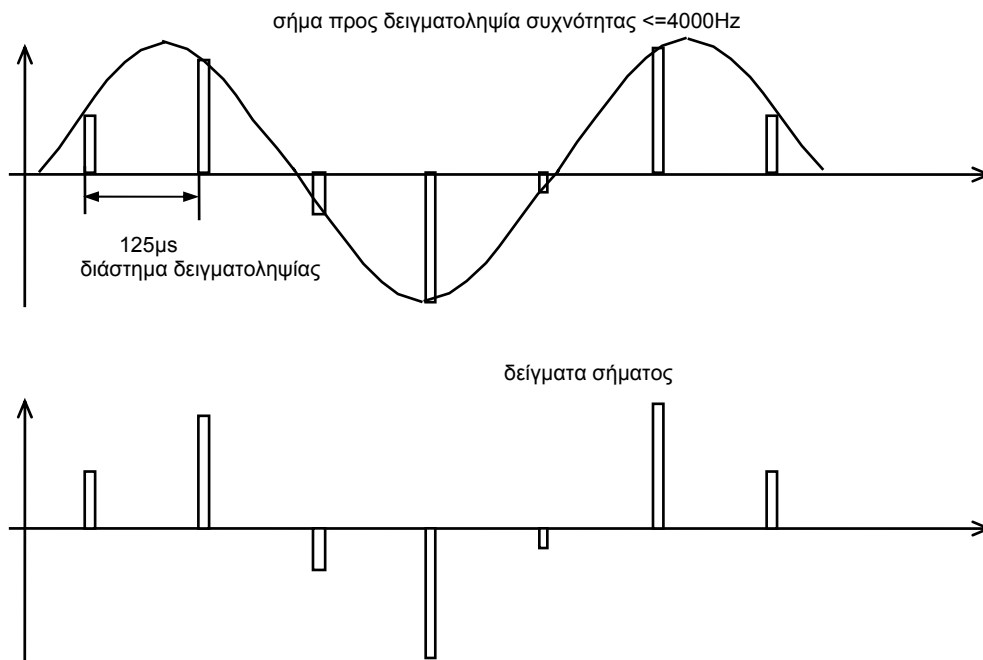
Η ανθρώπινη φωνή περιλαμβάνει συχνότητες από 100 Hz έως 16 - 18 KHz. Στην πράξη όμως και σύμφωνα με τους κανονισμούς που θεσπίστηκαν για την ευκρινή μετάδοση της ομιλίας είναι επαρκής στην τηλεφωνία η μετάδοση ζώνης συχνοτήτων από 300 έως 3.400 Hz.

Στο μικρόφωνο του τηλεφώνου, όπως γνωρίζουμε περιορίζεται το εύρος συχνοτήτων του ρεύματος που παριστά την φωνή όχι όμως αρκετά. Έτσι στην περίπτωση διαμόρφωσης PCM προκειμένου να έχουμε σίγουρα ζώνη συχνοτήτων 300 έως 3.400 Hz χρησιμοποιούμε ένα βαθυπερατό φίλτρο (low pass filter).

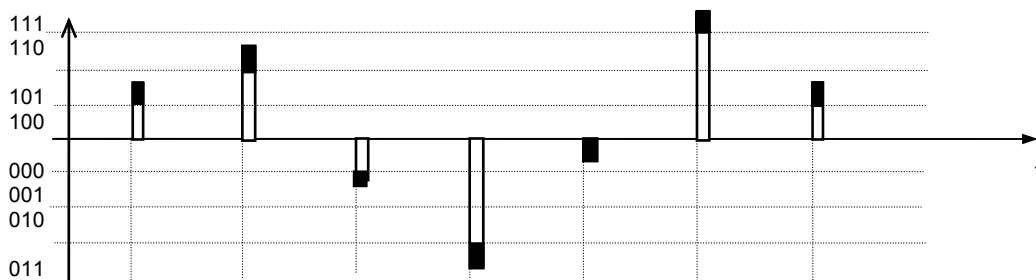
Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 τα χρησιμοποιούμενα φίλτρα αφήνουν να περνά ζώνη συχνοτήτων περίπου μέχρι 4000 Hz επειδή είναι εξαιρετικά δύσκολο να έχουμε φίλτρα με πολύ απότομη μεταβολή της απόσβεσής τους. Έτσι στην τηλεφωνία έχουμε $F=4000$ Hz. Συνεπώς θα έχουμε $2F = 8000$ δείγματα τουλάχιστον ανά δευτερόλεπτο. Το κάθε δείγμα επίσης θα απέχει από το επόμενο, στην περίπτωση συχνότητας δειγματοληψίας $2F$, κατά $1/2F$ sec = $1/8000 = 0,000125$ s = 125μs.



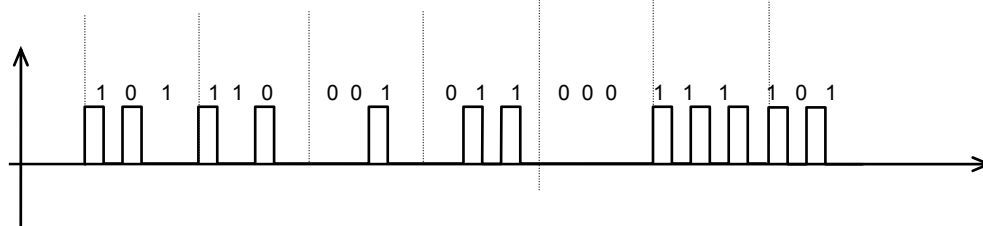
Σχ. 1.3α Βαθυπερατό φίλτρο για την ανθρώπινη φωνή στην Τηλεφωνία



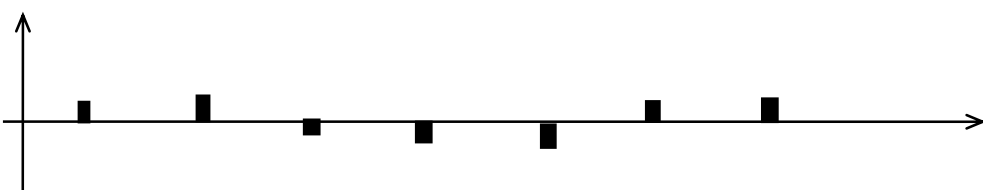
Σχ. 1.3β Δειγματοληψία αναλογικού σήματος φωνής



Σχ. 1.3γ Κβαντισμός δειγμάτων



Σχ. 1.3δ Κωδικοποίηση δειγμάτων



Σχ. 1.3ε Θόρυβος Κβαντοποίησης

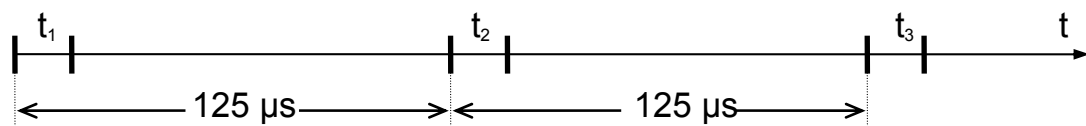
Στο σχ. 1.3β φαίνεται ένα παράδειγμα δειγματοληψίας ενός αναλογικού σήματος με συχνότητα δειγματοληψίας $2F=8000$ δείγματα/sec.

Τα δείγματα του σήματος ομιλίας μπορεί να έχουν διάφορες άπειρες τιμές (κάθε σημείο της καμπύλης μπορεί να αποτελέσει τιμή δείγματος). Γι' αυτό το επόμενο βήμα προς την ψηφιακοποίηση είναι η κβαντοποίηση (σχ. 1.3γ). Περιορίζουμε δηλαδή τις τιμές των δειγμάτων σε προκαθορισμένα και πεπερασμένα επίπεδα (στρογγύλευση τιμών). Τότε όμως αναγκαζόμαστε να απορρίψουμε ένα μικρό κομμάτι της τιμής του δείγματος με συνέπεια να χάνουμε ένα μέρος του σήματος και να δημιουργείται μία παραμόρφωση. Τα κομμάτια αυτά που απορρίπτονται προκαλούν τον λεγόμενο θόρυβο κβαντοποίησης (σχ. 1.3ε). Όσο πιά μικρό το βήμα κβαντοποίησης τόσο πιά μικρή η παραμόρφωση κβαντοποίησης του σήματος.

Μετά την κβαντοποίηση ακολουθεί η κωδικοποίηση του σήματος σε κατάλληλο κώδικα. Στο σχ. 1.3δ φαίνεται η κωδικοποίηση του αρχικού σήματος του σχ. 1.3β που στο παράδειγμά μας έγινε σε δυαδικό κώδικα.

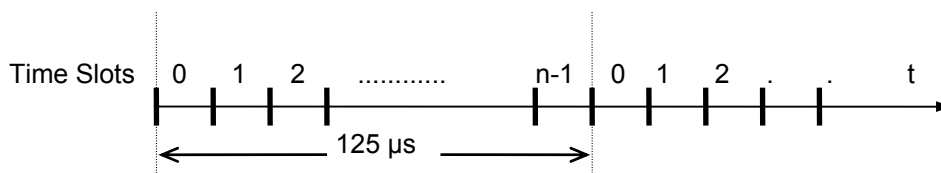
Στην συνέχεια γίνεται η μετάδοση του κωδικοποιημένου σήματος. Κατά την μετάδοση λαμβάνονται και διάφορα άλλα μέτρα που θα εξηγηθούν στα επόμενα.

Όπως φαίνεται στο σχ. 1.3ζ για συχνότητα δειγματοληψίας 8000Hz κάθε 125 μ s έχουμε μετάδοση ενός δείγματος του αναλογικού σήματος (στις χρονικές στιγμές t_1, t_2, t_3 , κλπ).



Σχ. 1.3ζ Χρονική διάρκεια δειγμάτων του ίδιου σήματος κάθε 125 μ s

Η χρονική διάρκεια της μετάδοσης κάθε δείγματος είναι μικρή σε σχέση με τον χρόνο των 125 μ s. Έτσι είναι δυνατό όπως φαίνεται στο σχ. 1.3η με χρησιμοποίηση του υπολοίπου διαστήματος των 125 μ s να μεταδίδονται από την ίδια γραμμή δείγματα περισσότερων τηλεφωνικών συνδιαλέξεων (0 έως n-1).

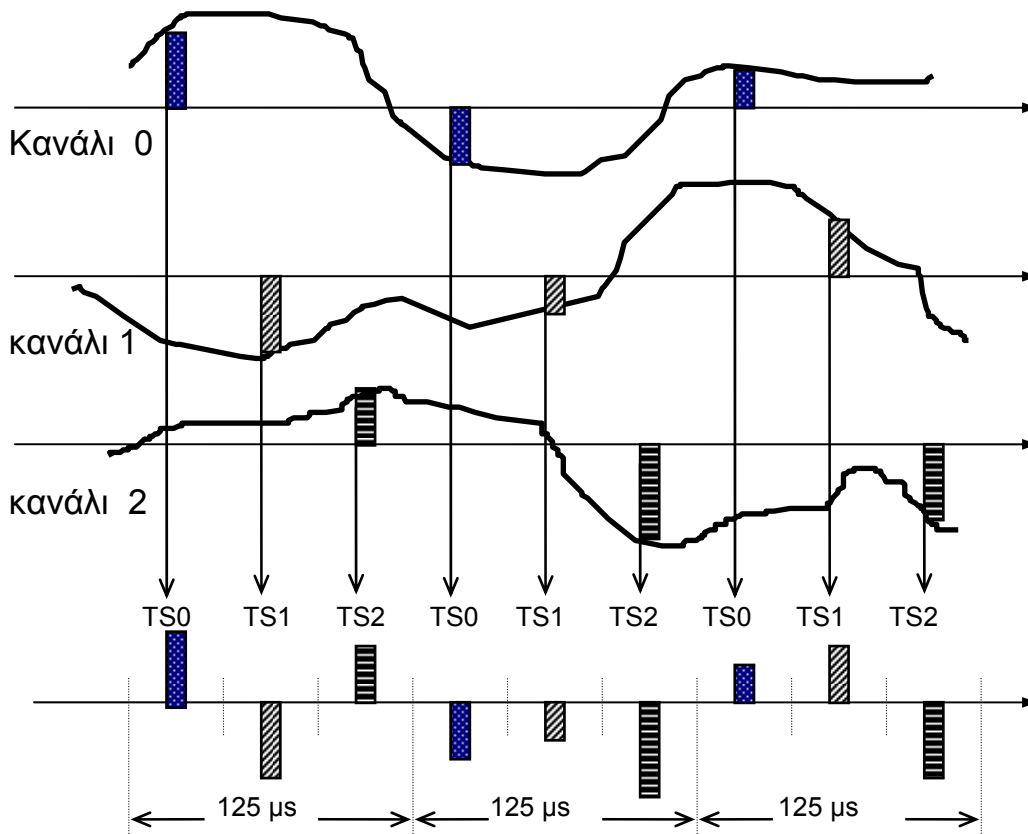


Σχ. 1.3η Διάταξη χρονοθυρίδων (Time slots)

Όπως φαίνεται στο σχήμα η περίοδος δειγματοληψίας των 125 μ s υποδιαιρείται σε ορισμένο αριθμό διαστημάτων που θα τα ονομάζουμε όπως

και στα αγγλικά Time Slots (χρονοθυρίδες) ή TS . Σε κάθε TS μεταβιβάζεται το δείγμα από ένα τηλεφωνικό κανάλι και κάθε 125 μs βρίσκουμε ξανά το ίδιο κανάλι. Ο χρόνος που χρειάζεται για να μεταβιβαστεί ένα δείγμα από όλα τα κανάλια ονομάζεται “frame”. Στο παράδειγμα του παραπάνω σχήματος όπου έχουμε συχνότητα δειγματοληψίας 8000 Hz το Frame ισούται με 125 μs.

Στο παρακάτω σχήμα 1.3θ φαίνεται ένα παράδειγμα από τρία τηλεφωνικά κανάλια που μεταδίδονται στην ίδια γραμμή.



Σχ. 1.3θ Αντιστοιχία καναλιού με χρονοθυρίδα (time slot)

2.1.5 Τυποποίηση Συστημάτων PCM

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι με την χρησιμοποίηση της διαμόρφωσης PCM είναι δυνατό από την ίδια γραμμή μεταδόσεως να διαβιβάζουμε πολλές συνδιαλέξεις. Έχουμε δηλαδή συστήματα πολλαπλής μετάδοσης PCM - TDM.

Προέκυψε λοιπόν η ανάγκη τυποποίησης των συστημάτων αυτών ώστε οι διάφορες κατασκευαστικές εταιρείες και οργανισμοί να μπορούν να συνεργάζονται και τα συστήματά τους να είναι συμβατά. Το έργο αυτό έγινε από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union ή ITU-T πρώην CCITT).

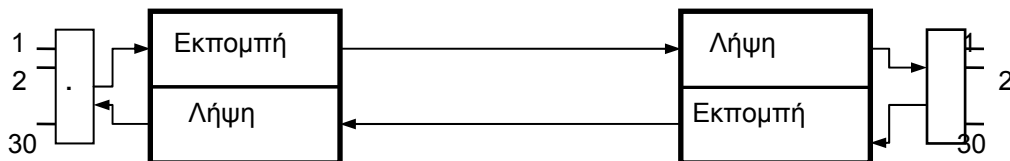
Έχουν καθιερωθεί δύο τυποποιημένα τέτοια συστήματα πολλαπλής μετάδοσης. Το ένα είναι το ευρωπαϊκό που πρότεινε ο

ευρωπαϊκός οργανισμός τυποποίησης CEPT και έχει συχνότητα δειγματοληψίας 8000 Hz και Frame με 32 χρονοθυρίδες. Τα 30 time slots χρησιμοποιούνται για τηλεφωνικά κανάλια, το ένα για συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη και ένα ακόμη για σηματοδότηση μεταξύ των δύο σταθμών (την έννοια του συγχρονισμού και σηματοδότησης θα την αναλύσουμε παρακάτω).

Ένα δεύτερο διαδεδομένο σύστημα PCM -TDM είναι το αμερικάνικο που καθιέρωσε η εταιρεία AT & T και έχει Frame με 24 χρονοθυρίδες.

Τα συστήματα με 32 και 24 Time Slots είναι τα βασικά συστήματα και ονομάζονται συστήματα πρώτης τάξης. Από άθε ένα απ' αυτά όπως θα δούμε στα επόμενα, μπορούν να σχηματιστούν με ιεραρχικό τρόπο συστήματα δεύτερης τάξης (π.χ. για 120 κανάλια ή 96 αντίστοιχα), τρίτης τάξης, τέταρτης και πέμπτης.

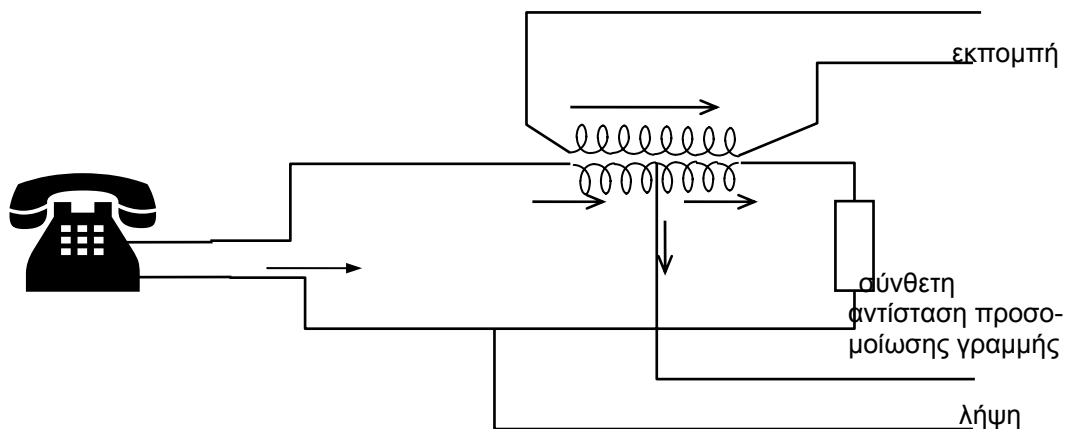
Τα συστήματα για τα οποία συζητάμε υλοποιούνται ως γνωστόν με ηλεκτρονικά κυκλώματα χαρακτηριστικό των οποίων είναι η μονή κατεύθυνση (είσοδος - έξοδος). Είναι δηλαδή μονόφορες συσκευές γι' αυτό σε κάθε άκρο ζεύξης συστημάτων PCM χρειάζονται δύο διατάξεις επικοινωνίας, πομπός και δέκτης, ώστε το σύστημα να είναι αμφίδρομο.



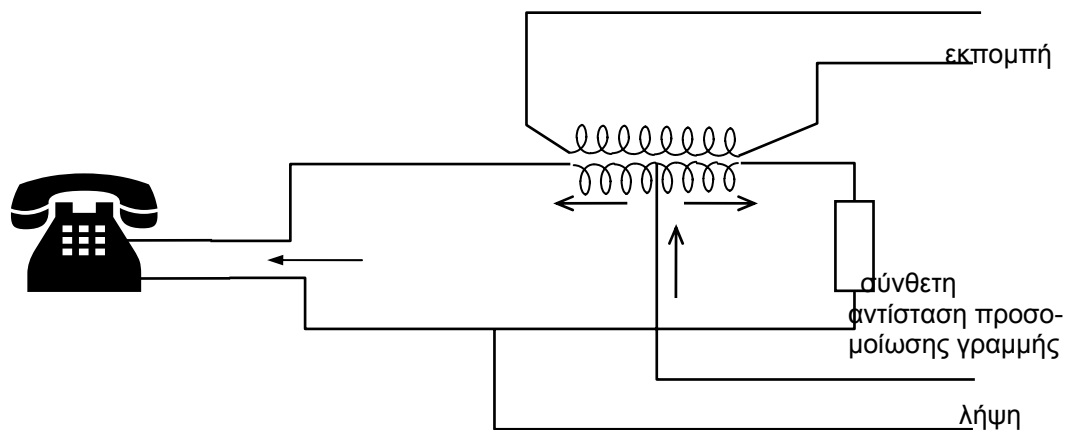
Σχ. 1.4α Διαχωρισμός εκπομπής και λήψης

Το αναλογικό σήμα ομιλίας που μας έρχεται από την τηλεφωνική συσκευή χρειάζεται ως γνωστόν ένα ζεύγος αγωγών. Πάνω σ' αυτό το ζεύγος διατρέχει το ρεύμα ομιλίας και προς τις δύο κατευθύνσεις ανάλογα αν είναι εκπομπή ή λήψη. Θα πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιηθεί μία διάταξη η οποία σε κάποιο σημείο του κυκλώματος να διαχωρίζει την εκπομπή από την λήψη και να δημιουργεί δύο ζεύγη αγωγών. Η διάταξη αυτή ονομάζεται διχάλη και αποτελείται από ένα συνδιασμό πηνίων κατάλληλα συνδεδεμένων με μία σύνθετη αντίσταση προσομοίωσης της γραμμή μεταδόσεως.

Όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα όταν μιλάμε στο μικρόφωνο της τηλεφωνικής συσκευής το ρεύμα ακολουθεί την οδό εκπομπής. Ένα μέρος του ρεύματος αυτού πηγαίνει και προς την λήψη, αλλά λόγω της μεγάλης αντίστασης της λήψης αυτό δεν επηρεάζει την λειτουργία του κυκλώματος.



Σχ. 1.4β Η λειτουργία της διχάλης κατά την εκπομπή



Σχ. 1.4γ Η λειτουργία της διχάλης κατά την λήψη

Όταν όμως έρχεται ρεύμα λήψης (ακούμε τον απέναντι συνδρομητή) τότε το ρεύμα αυτό περνώντας μέσα από πηνίο στην ενδιάμεση λήψη διαχωρίζεται σε δύο ίσα και αντίθετα ρεύματα. Το ένα μέρος του ρεύματος αυτού πηγαίνει στην τηλεφ. συσκευή και ακούγεται στο ακουστικό και το άλλο οδεύει στην αντίσταση προσομοίωσης της γραμμής. Έτσι στο δευτερεύον του πηνίου, που είναι η εκπομπή, το ρεύμα είναι μηδέν και δεν δημιουργεί την ανεπιθύμητη και ενοχλητική ανάδραση (σφύριγμα).

Ο τρόπος κωδικοποίησης κάθε δείγματος έχει τυποποιηθεί και αυτός και θα αναφερθεί με λεπτομέρειες στο επόμενο κεφάλαιο. Μπορούμε όμως να πούμε από τώρα ότι για την κωδικοποίηση αυτή χρησιμοποιούνται **8 δυαδικά ψηφία (bits) για κάθε δείγμα**. Έτσι για **συχνότητα δειγματοληψίας 8000 Hz για κάθε κανάλι** θά έχουμε :

$$8000 \text{ δείγμ./sec} \times 8 \text{ bits/δείγμα} = 64.000 \text{ bits/sec}$$

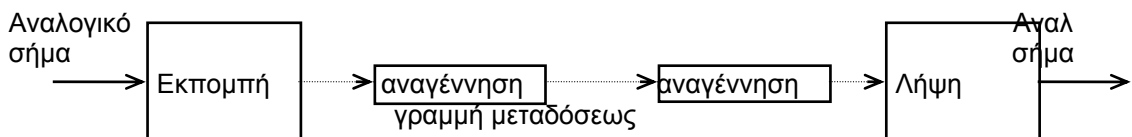
τα 64.000 bit/s κάθε καναλιού είναι αρκετά και μας δίνουν την δυνατότητα να μεταβιβάζουμε εκτός από την φωνή και διάφορα άλλα δεδομένα (data, telex, fax κλπ). Αυτό αποτελεί ένα πλεονέκτημα της μετάδοσης PCM -TDM.

Άλλο πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι το ότι η ποιότητά της μετάδοσης είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την απόσταση επειδή είναι δυνατό με ενδιάμεσους αναγεννητές (repeaters ή regenerators) να έχουμε αναγέννηση (αναπαραγωγή) του ψηφιακού σήματος.

Αντίθετα με τους ενδιάμεσους ενισχυτές που χρησιμοποιούσαμε στην περίπτωση των αναλογικών σημάτων μετάδοσης, όπου ενισχύονταν και ο θόρυβος και μεγάλωνε η παραμόρφωση, στην περίπτωση των PCM δεν υπάρχει τέτοιο θέμα και το μόνο που χρειάζεται στον δέκτη ή αναγεννητή είναι να διαπιστωθεί αν υπάρχει ή όχι παλμός. Τοποθετώντας λοιπόν τους αναγεννητές σε κατάλληλη απόσταση επιτυγχάνουμε ικανοποιητική μετάδοση.

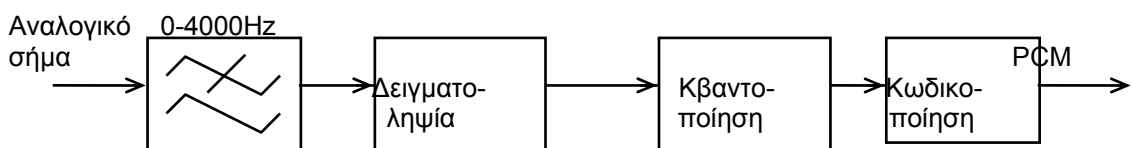
2.1.6 Αρχές Παλμοκωδικής Διαμόρφωσης

Κατά την μετάδοση ενός αναλογικού σήματος από μία θέση σε άλλη με διαμόρφωση PCM διακρίνουμε όπως δείχνει το σχ. 2.1, την εκπομπή, την λήψη, την γραμμή μεταδόσεως και την αναγέννηση του σήματος.



Σχ. 2.1

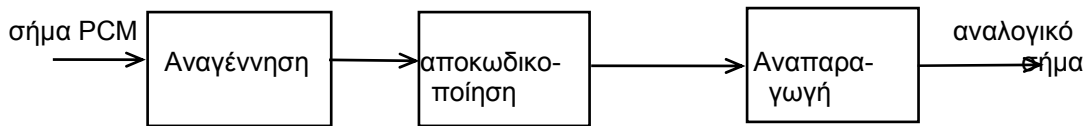
Έστω ότι το αναλογικό σήμα είναι ρεύμα ομιλίας. Τότε στην εκπομπή θα έχουμε πρώτα ένα φίλτρο βαθυπερατό περιορισμού του εύρους συχνοτήτων του ρεύματος ομιλίας στα 0 έως 4000 Hz. Στην συνέχεια όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 θα έχουμε δειγματοληψία με συχνότητα τουλάχιστον 8000 Hz, κβαντοποίηση και κωδικοποίηση του σήματος.



Σχ. 2.2 Εκπομπή σήματος PCM

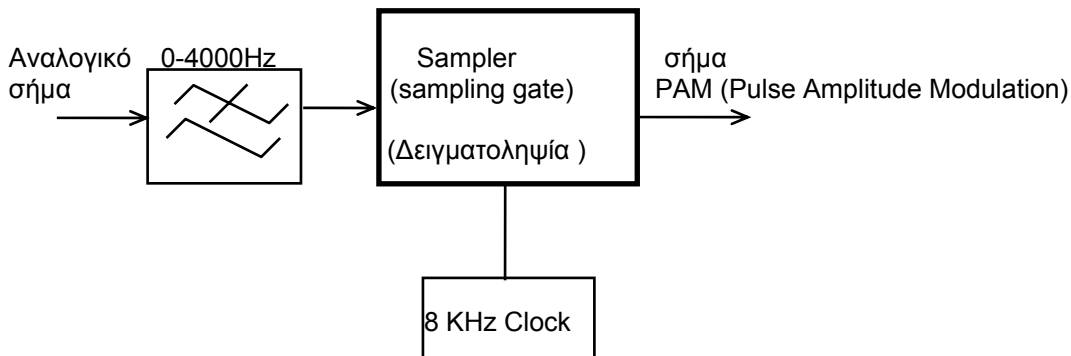
Στήν λήψη θα έχουμε πρώτα αναγέννηση του κωδικοποιημένου σήματος και στην συνέχεια αποκωδικοποίηση και αναπαραγωγή του

αναλογικού σήματος (σχ. 2.3).



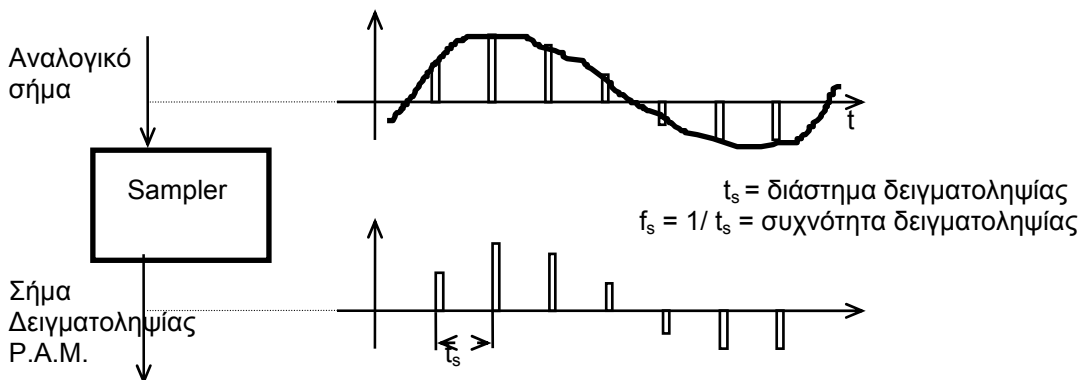
Σχ. 2.3 Λήψη σήματος PCM

Στο σχήμα 2.4 φαίνεται παραστατικά η διαδικασία της δειγματοληψίας που γίνεται στην περίπτωση ρεύματος ομιλίας με την βοήθεια ρολογιού 8 KHz.



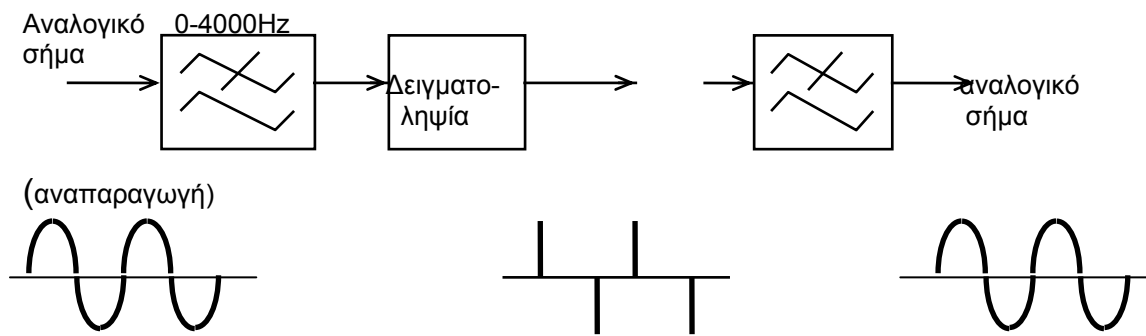
Σχ. 2.4 Πύλη δειγματοληψίας και ρολόι δειγματοληψίας 8KHz

Ένα παράδειγμα δειγματοληψίας αναλογικού σήματος βλέπουμε στο σχ. 2.5.



Σχ. 2.5 Με την δειγματοληψία διαμορφώνεται ένα σήμα P.A.M. Υπενθυμίζουμε ότι θα πρέπει το αναλογικό σήμα να είναι περιορισμένου εύρους συχνοτήτων με μέγιστη συχνότητα έστω F. Τότε η συχνότητα δειγματοληψίας f_s πρέπει να είναι $f_s \geq 2F$. Για $F=4000$ Hz έχουμε $f_s = 8000$ και $t_s = 125\mu s$.

Στην έξοδο του Sampler λέμε ότι έχουμε σήμα διαμορφωμένο κατά πλάτος παλμού (Pulse Amplitude Modulation , PAM). Στην διαμόρφωση αυτή έχουμε μία σειρά παλμών που το πλάτος τους διαμορφώνεται από το αναλογικό σήμα. Τα πλάτη των παλμών μεταβάλλονται τότε συνεχώς σε συνάρτηση με την μεταβολή του αναλογικού σήματος. Δηλαδή η διαμόρφωση PAM είναι μία αναλογική διαδικασία.



Σχ. 2.6 Δειγματοληψία - αναπαραγωγή

Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η περίπτωση διαμόρφωσης PAM ενός αναλογικού σήματος, η μεταδοσή του και η αναπαραγωγή του.

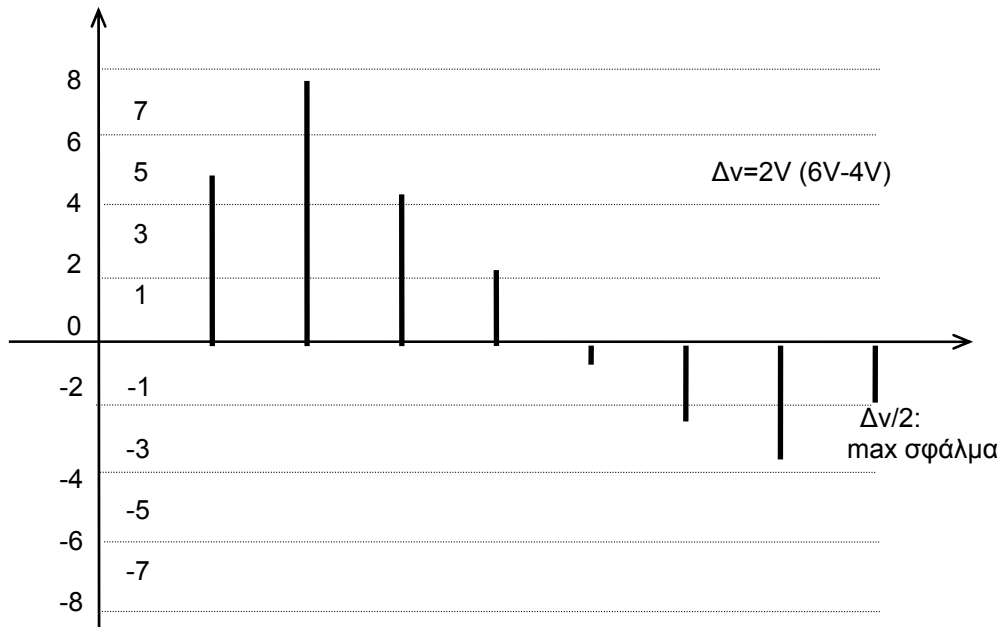
Εφόσον σύμφωνα με το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon το σήμα PAM περιέχει όλες τις πληροφορίες του αναλογικού σήματος μπορούμε να αναπαράγουμε στην λήψη το αναλογικό σήμα. Η αναπαραγωγή γίνεται με διέλευση του σήματος PAM μέσα από ένα βαθυπερατό φίλτρο. Το φίλτρο αυτό είναι το ίδιο με εκείνο που χρησιμοποιείται πριν από την δειγματοληψία δηλαδή έχει την ίδια ακριβώς συχνότητα αποκοπής.

Γιά να γίνει η αναπαραγωγή του αναλογικού σήματος στην περίπτωση της διαμόρφωσης PAM πρέπει στην λήψη να φτάσουν τα δείγματα με αρκετή ακρίβεια. Στις μεγάλες όμως αποστάσεις τα δείγματα αυτά παραμορφώνονται και δεν είναι δυνατόν η τέλεια αναπαραγωγή πολλές δε φορές είναι αδύνατη. Έτσι παρά την απλότητά της η διαμόρφωση PAM δεν χρησιμοποιείται όταν έχουμε μεταφορά σήματος σε μεγάλη απόσταση. Γι' αυτό μετά την δειγματοληψία έχουμε στην εκπομπή την κβαντοποίηση και την κωδικοποίηση .

Όπως έχουμε πεί οι τιμές που μπορεί να έχουν τα δείγματα του σήματος είναι απεριόριστες (όσες και τα σημεία της καμπύλης του αναλογικού σήματος). Έτσι στην έξοδο του κβαντοποιητή έχουμε ουσιαστικά στρογγύληυση των τιμών των δειγμάτων σε ορισμένο αριθμό πεπερασμένων τιμών.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το παράδειγμα κβαντοποίησης δειγμάτων ενός αναλογικού σήματος. Κάθε δείγμα με τιμή μεταξύ 0-2 V

παίρνει στην έξοδο του κβαντοποιητή την τιμή 1V, μεταξύ 2-4 V την τιμή 3V, μεταξύ 4-6 V την τιμή 5V κ.ο.κ., μεταξύ 0 - -2V την τιμή -1V, μεταξύ -2 - -4V την τιμή -3V κ.ο.κ.



Σχ. 2.7 Κβαντοποίηση δειγμάτων αναλογικού σήματος

Ας ονομάσουμε Δv την έκταση ενός διαστήματος όπου στρογγυλεύονται οι τιμές (διάστημα κβαντοποίησης, quantizing interval). Τότε το μέγιστο σφάλμα κατά την κβαντοποίηση ενός δείγματος στο παράδειγμα του σχήματος ισούται με $\Delta v/2$. Π.χ. η κβαντοποιημένη τιμή του τελευταίου δεξιά δείγματος θα είναι ίση με -3V και θα διαφέρει κατά $\sim \Delta v/2 = 1$ από την πραγματική τιμή του δείγματος αυτού.

Η διαφορά του κβαντοποιημένου δείγματος από την αρχική του τιμή ονομάζεται παραμόρφωση ή θόρυβος κβαντοποίησης (quantizing distortion).

Στο παράδειγμα του σχ. 2.7 η τιμή του θορύβου κβαντοποίησης είναι ανεξάρτητη από την τιμή του δείγματος (έχει μέγιστη τιμή $\Delta v/2 = 1$ V σε οποιοδήποτε διάστημα κβαντοποίησης).

Αυτό σημαίνει ότι ο δείκτης θορύβου (λόγος σήματος προς θόρυβο - signal to noise ratio - SNR) εξαρτάται από την τιμή του δείγματος. Έτσι π.χ. ένα δείγμα με μικρή τιμή θα έχει μεγαλύτερη παραμόρφωση (μικρότερο λόγο σήματος προς θόρυβο) από ένα δείγμα με μεγάλη τιμή.

Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι στο παράδειγμά μας όλα τα διαστήματα κβαντοποίησης είναι ίσα μεταξύ τους. Έτσι έχουμε πρόβλημα με τους ανθρώπους που μιλούν χαμηλόφωνα.

Μιά λύση για να έχουμε για κάθε τιμή δείγματος ικανοποιητικό λόγο σήματος προς θόρυβο θα ήταν να αυξήσουμε τον αριθμό των βημάτων (διαστημάτων) κβαντοποίησης ώστε η τιμή κάθε δείγματος να

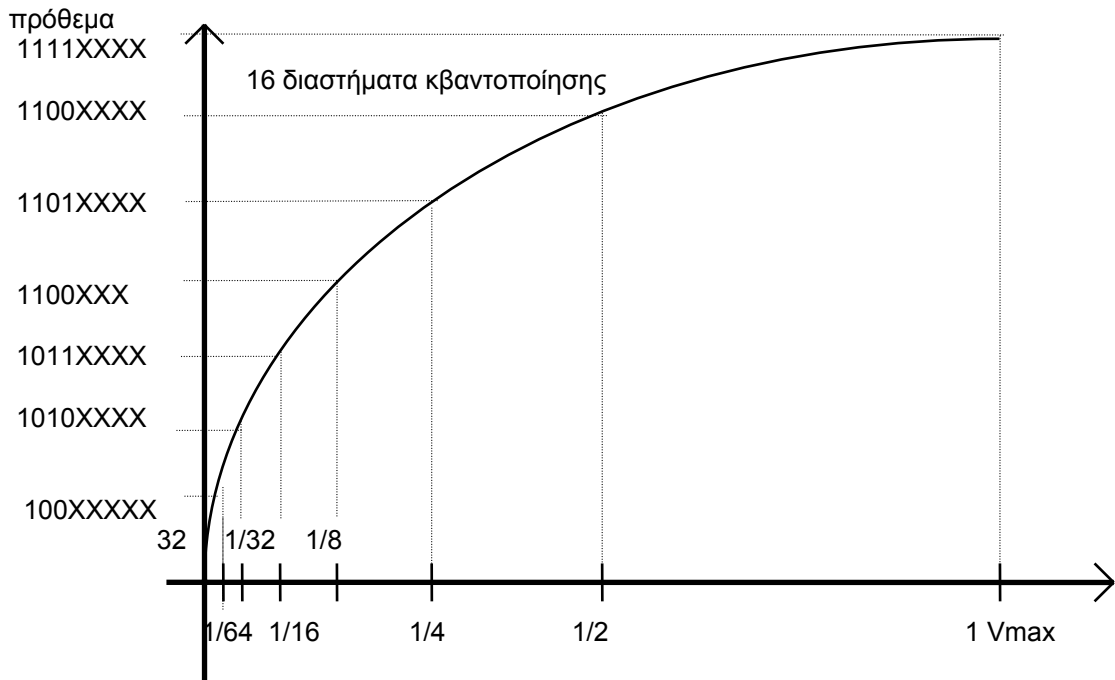
ήταν αρκετά μεγαλύτερη από το μέγιστο σφάλμα $\Delta n/2$. Τότε όμως θα είχαμε υπερβολικά ικανοποιητικό SNR για τα δείγματα με υψηλή τιμή και αύξηση του κόστους των συστημάτων.

Θέλουμε ύστερα απ' αυτά να έχουμε τον ίδιο δυνατό SNR για όλες τιμές των δειγμάτων. Στην πράξη αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση του διαστήματος κβαντοποίησης όσο αυξάνεται η τιμή του δείγματος. Έτσι για τα χαμηλά πλάτη του σήματος ορίζονται μικρότερα βήματα κβαντοποίησης και για τα μεγάλα πλάτη μεγαλύτερα βήματα. Η αύξηση αυτή των βημάτων ακολουθεί σχεδόν λογαριθμικό τρόπο.

Για τα τηλεφωνικά συστήματα PCM, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU-T (πρώην CCITT) συνιστά δύο τρόπους ή νόμους όπως ονομάζονται κβαντοποίησης: Τον A-νόμο και τον μ -νόμο (A - law και μ - law). Οι νόμοι αυτοί ονομάζονται νόμοι της κωδικοποίησης επειδή στην πράξη η κβαντοποίηση γίνεται στον κωδικοποιητή (Coder).

Στα Ευρωπαϊκά συστήματα χρησιμοποιείται ο A-νόμος κωδικοποίησης και θα τον περιγράψουμε στην συνέχεια.

Έστω ότι έχουμε δείγματα με τιμές από $+V_{max}$ έως $-V_{max}$. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κβαντοποίηση σύμφωνα με τον A - νόμο για τις τιμές δειγμάτων από 0 έως $+V_{max}$. Συμμετρικές θα είναι είναι και οι τιμές δειγμάτων από 0 έως $-V_{max}$.



Σχ. 2.8 Ο A-νόμος κωδικοποίησης PCM

Εάν αντιστοιχίσουμε στην τιμή V_{max} την τιμή 1 τότε σύμφωνα με το σχήμα και τον A-νόμο θα έχουμε

Τιμή δείγματος	Αντιστοίχιση	διάστημα κβαντοποίησης	αριθμός βημάτων κβαντοποίησης
V _{max}	1	1/2 - 1	16
V _{max} /2	1/2	1/4 - 1/2	16
V _{max} /4	1/4	1/8 - 1/4	16
V _{max} /8	1/8	1/16 - 1/8	16
V _{max} /16	1/16	1/32 - 1/16	16
V _{max} /32	1/32	1/64 - 1/32	16
V _{max} /64	1/64	0 - 1/64	32

Το διάστημα κβαντοποίησης από 1/2 έως 1 είναι χωρισμένο σε 16 ίσα βήματα κβαντοποίησης. Ομοίως είναι χωρισμένα σε 16 βήματα όλα τα άλλα διαστήματα κβαντοποίησης εκτός από το τελευταίο (0 - 1/64) το οποίο είναι χωρισμένο σε 32 βήματα.

Έχουμε δηλαδή $6 \times 16 + 32 = 128$ βήματα κβαντοποίησης για τις θετικές τιμές των δειγμάτων (0 έως +V_{max}). Συνολικά δε 256 τιμές για όλα τα πλάτη του σήματος (-V_{max} έως +V_{max}).

Κάθε λοιπόν βήμα κβαντοποίησης μπορεί να παρασταθεί με 8 δυαδικά ψηφία ($2^8 = 256$).

Παρατηρούμε ότι για κάθε διάστημα κβαντοποίησης τα πρώτα 4 δυαδικά ψηφία είναι ίδια και τα υπόλοιπα 4 παριστούν τα 16 διαφορετικά βήματα κβαντισμού του διαστήματος. Στο τελευταίο όμως διάστημα (0 - 1/64) τα βήματα είναι 32 και τα μεταβαλλόμενα ψηφία 5 (με X συμβολίζουμε τα μεταβαλλόμενα ψηφία).

Επίσης φαίνεται στο σχήμα ότι τα θετικά βήματα κβαντοποίησης αρχίζουν όλα από το δυαδικό ψηφίο (πρόθεμα) 1, ενώ τα αρνητικά έχουν το πρόθεμα 0.

Παρατηρούμε λοιπόν από τα παραπάνω ότι όσο σε πίο μικρό διάστημα κβαντοποίησης πάμε τόσο πίο μικρό βήμα (σε Volts) λαμβάνουμε, δηλαδή:

Διάστημα κβαντοποίησης		Βήμα κβαντοποίησης
0 - 1/64	1/64V _{max} :32	= 1/2048
1/64 - 1/32	1/32V _{max} :16	= 1/1024
1/32 - 1/16	1/16V _{max} :16	= 1/512
1/16 - 1/8	1/8V _{max} :16	= 1/256
1/8 - 1/4	1/4V _{max} :16	= 1/128
1/4 - 1/2	1/2V _{max} :16	= 1/64
1/2 - 1	1 V _{max} :16	= 1/32

Στην κωδικοποίηση χρησιμοποιούνται δυαδικοί παλμοί. Έτσι κάθε δείγμα κωδικοποιείται όπως λέμε σε μία λέξη PCM (PCM word) από 8 δυαδικούς παλμούς. Κάθε λέξη PCM συνεπώς αποτελείται από 8 bit. Εάν έχουμε ταχύτητα δειγματοληψίας 8000 Hz θα έχουμε 8000

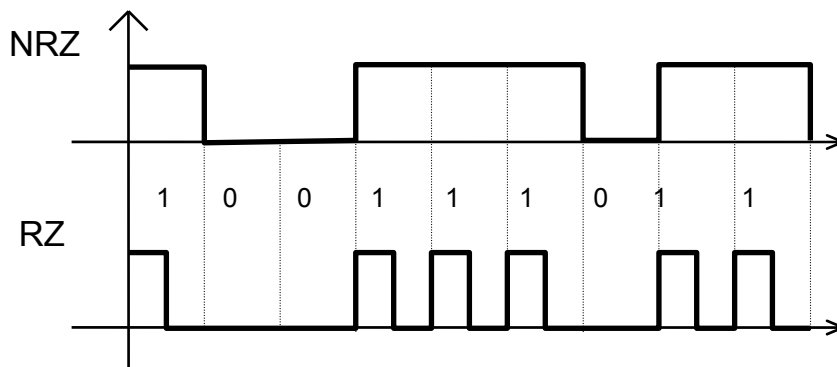
δείγματα του σήματος στο δευτερόλεπτο και συνεπώς 8000 λέξεις PCM ανά sec ή 64.000 bits/sec - 64 Kb/s για το διαμορφωμένο σήμα PCM.

2.1.7 Ψηφιακά παλμικά πρότυπα

Κάθε bit των λέξεων PCM παρίσταται με ένα ηλεκτρικό παλμό. Ο παλμός αυτός μπορεί να έχει διάφορα χαρακτηριστικά. Ανάλογα με την περίπτωση χρησιμοποιούνται διάφορα είδη παλμών.

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού παλμού είναι το πλάτος του και η διάρκειά του. Η διάρκεια του ηλεκτρικού παλμού μπορεί να συσχετισθεί με την διάρκεια ενός bit της λέξης PCM. Έτσι έχουμε:

- Ο ηλεκτρικός παλμός διαρκεί όσο και το bit και δεν επιστρέφει στο μηδέν εντός της διάρκειας αυτής. Τότε την παλμοσειρά αυτή την ονομάζουμε "σήμα που δεν επιστρέφει στο μηδέν" (Non Return to Zero - NRZ).
- Ο ηλεκτρικός παλμός διαρκεί λιγώτερο από την διάρκεια του bit και επιστρέφει στο μηδέν εντός της διάρκειας αυτής. Τότε αυτό το σήμα ονομάζεται "σήμα που επιστρέφει στο μηδέν" (Return to Zero -RZ).



Σχ. 2.2α Σήματα Non Return to zero (NRZ) και Return to zero (RZ)

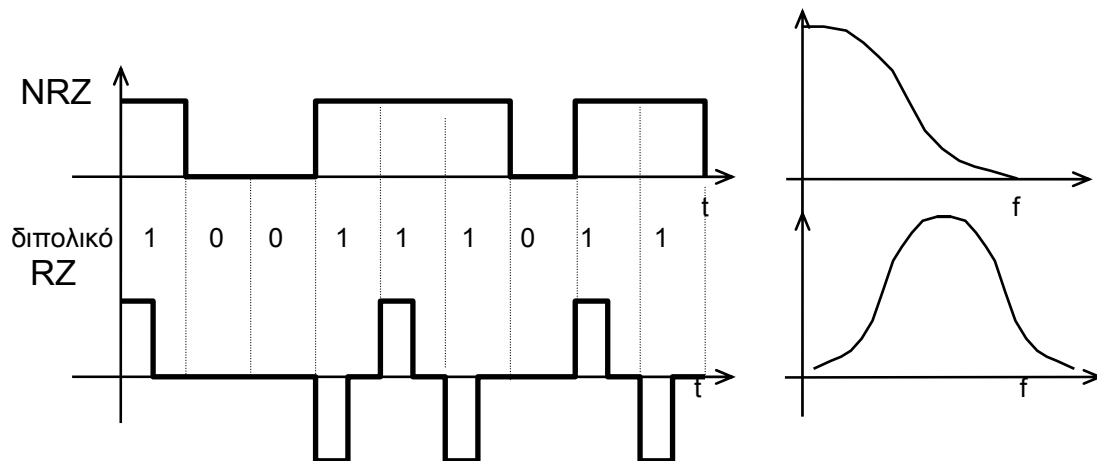
Τα δύο αυτά είδη σημάτων έχουν διαφορές κυρίως στο φασματικό περιεχόμενό τους.

Στο σχήμα 2.2β παρίσταται ένα NRZ σήμα και όπως φαίνεται έχει μεγάλη ισχύ στις χαμηλές συχνότητες. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα για την μετάδοση σημάτων PCM διότι όταν χρησιμοποιούνται αναγεννητές στην γραμμή μεταδόσεως αυτοί δημιουργούν προβλήματα στην διέλευση χαμηλών συχνοτήτων και συνεπώς τα σήματα αυτά εξασθενούν γρήγορα και δεν μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις.

Στο σχήμα 2.2γ παρίσταται ένα RZ σήμα το οποίο έχει θετικούς και αρνητικούς παλμούς. Αυτό ονομάζεται διπολικό Return to Zero σήμα. Το σήμα αυτό είναι καταλληλότερο για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις επειδή δεν έχει συνιστώσα συνεχούς ρεύματος όπως φαίνεται στο διάγραμμα του φάσματος συχνοτήτων του.

Άλλο πλεονέκτημα του διπολικού σήματος RZ είναι η δυνατότητα

αναπαραγωγής με ανόρθωση απ' αυτό του δυαδικού σήματος NRZ και κατόπιν ο εύκολος τρόπος ελέγχου των σφαλμάτων.



Σχ. 2.2β και 2.2γ NRZ & RZ σήματα και το φασματικό περιεχόμενό τους

2.1.8 Αναγέννηση ψηφιακών παλμών

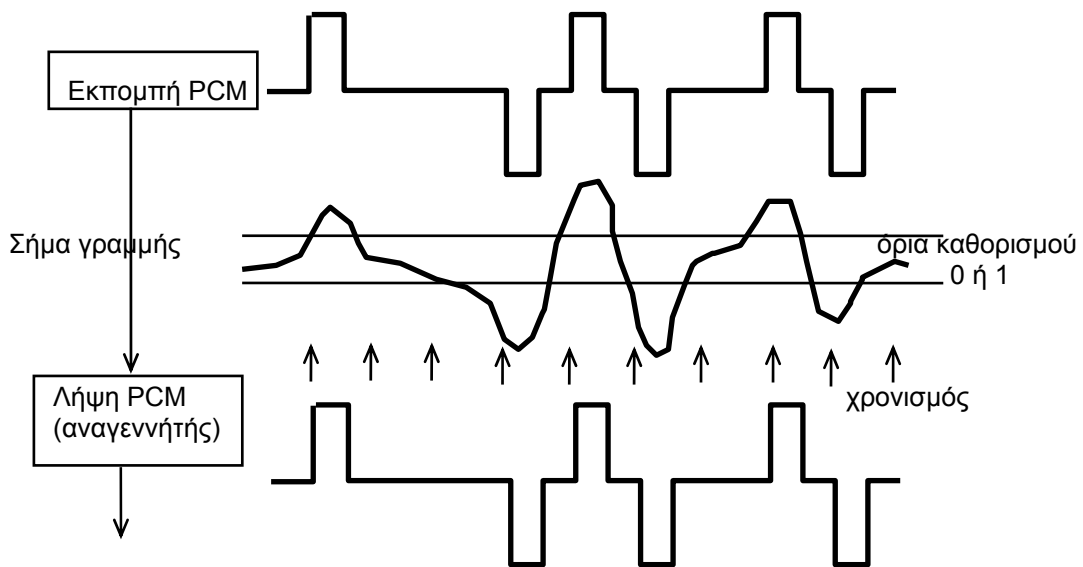
Όπως έχουμε πεί για την μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις των ψηφιακών παλμών χρειάζονται κατά διαστήματα αναγεννητές των παλμών αυτών. Στην πράξη οι αναγεννητές αυτοί τοποθετούνται για τα συστήματα πρώτης τάξης ανά 2 Km. Στο σχήμα 2.3α φαίνεται η αναγέννηση ενός RZ σήματος σε ενδιάμεσο αναγεννητή (regenerator, regenerative repeater). Όπως είναι φανερό με αναγεννητές στις κατάλληλες αποστάσεις είναι δυνατό να έχουμε στην λήψη σήμα χωρίς καμία παραμόρφωση. Η λειτουργία της αναγέννησης είναι απλή. Χρειάζεται βασικά μόνο να διακριθεί αν υπάρχει ή όχι παλμός.

Η απόφαση για το αν υπάρχει ή όχι παλμός είναι πολύ σημαντική και πρέπει να γίνει την κατάλληλη στιγμή (όταν δηλαδή αναμένεται ή όχι παλμός). Είναι λοιπόν απαραίτητο τόσο ο αναγεννητής όσο και το σύστημα λήψης να συγχρονίζονται προκειμένου να λάβουν τις σωστές αποφάσεις περί υπάρξεως ή όχι παλμού.

Ο συγχρονισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω του ίδιου του μεταδιδόμενου σήματος όταν αυτό είναι κατάλληλα κατασκευασμένο. Δηλαδή από την κυματομορφή του μεταδιδόμενου σήματος εξάγεται ένα ρολοί το οποίο χρησιμοποιείται για συγχρονισμό. Η κατάλληλη κυματομορφή μεταδιδόμενου σήματος είναι αυτή που έχει εναλλασσόμενους θετικούς και αρνητικούς παλμούς (διπολικό σήμα).

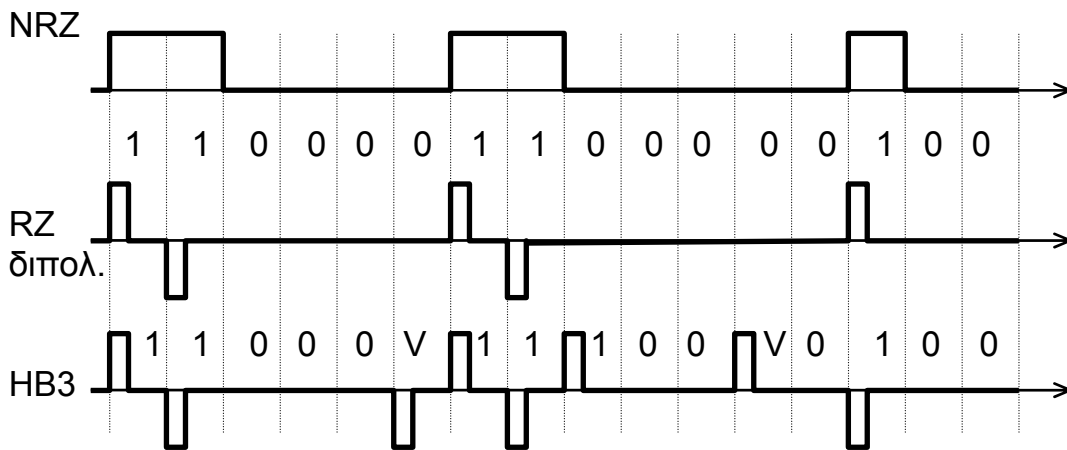
Επίσης για να είναι δυνατόν να εξαχθεί από την κυματομορφή ρολοί πρέπει να μην υπάρχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ύπαρξη παλμού διότι τότε χάνεται ο συγχρονισμός. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού χρησιμοποιείται κατά την μετάδοση κατάλληλος κώδικας ο οποίος προσθέτει στην εκπομπή ψευτοπαλμούς και τους αφαιρεί κατά την λήψη ώστε να εξάγει το ρολοί

συγχρονισμού.



Σχ. 2.3α αναγέννηση ψηφιακών παλμών

Ένας τέτοιος κώδικας είναι ο HB3 που φαίνεται στο σχ. 2.3β. Στο σχήμα αυτό έχουμε το πρώτο σήμα που είναι ένα NRZ σήμα το αντίστοιχό του διπολικό RZ (δεύτερο) και το σε κώδικα HB3 (κάτω μέρος τους σχήματος).



Σχ. 2.3β ψηφιακό σήμα με κώδικα HB3

Στον κώδικα HB3 τέσσερα συνεχή 0 του διπολικού κώδικα αντικαθίστανται από 000V ή από 100V. Το V είναι ένα παλμός που ισούται με 1 και έχει την πολικότητα του προηγούμενου παλμού. Στο σχήμα φαίνεται η μετατροπή τεσσάρων συνεχόμενων 0 σε 000V (το V με την πολικότητα του προηγούμενου παλμού) και σε 100V (το V με την πολικότητα του προηγούμενου παλμού).

Όπως φαίνεται έχουμε εναλλαγή θετικών και αρνητικών V.

Συνήθως τα τέσσερα πρώτα 0 γίνονται 100V και μετά έχουμε εναλλαγή (000V, 100V, κ.ο.κ.).

Γιά να προστεθεί ο κώδικας HB3 στο σήμα χρειάζεται στο σύστημα μιά επιπλέον μονάδα τόσο στην εκπομπή γιά την εισαγωγή του κώδικα όσο και στην λήψη γιά την απαλοιφή του.

Στην λήψη θα έχουμε πρώτα αναγέννηση του σήματος και μετά θα έχουμε απαλοιφή του κώδικα HB3 αφού πρώτα εξαχθεί το ρολόι απ' το σήμα αυτό. Κατόπιν το σήμα θα οδηγηθεί στον αποκωδικοποιητή και στον ολοκληρωτή ώστε να ληφθεί σε αναλογική μορφή.

2.1.9 Πολυπλεξία

Όπως είπαμε και στα προηγούμενα ένα από τα πλεονεκτήματα της ψηφιακοποίησης των αναλογικών σημάτων είναι η δυνατότητα που προσφέρεται γιά εύκολη πολλαπλή μετάδοση σημάτων μέσα από το ίδιο φυσικό μέσο (γραμμή μεταδόσεως),

Η πολλαπλή μετάδοση επιτυγχάνεται από την εκμετάλλευση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί από δείγμα σε δείγμα. Γιά σήματα περιορισμένα στα 4KHz αυτό το χρονικό διάστημα είδαμε ότι είναι 125μs.

Αυτό το χρονικό διάστημα το χωρίζουμε σε χρονοθυρίδες (Time Slots) και μέσα σε κάθε χρονοθυρίδα εκπέμπουμε δεδομένα σήματος (λέξη PCM) από διαφορετικό κανάλι επιτυγχάνοντας έτσι πολλαπλή μετάδοση.

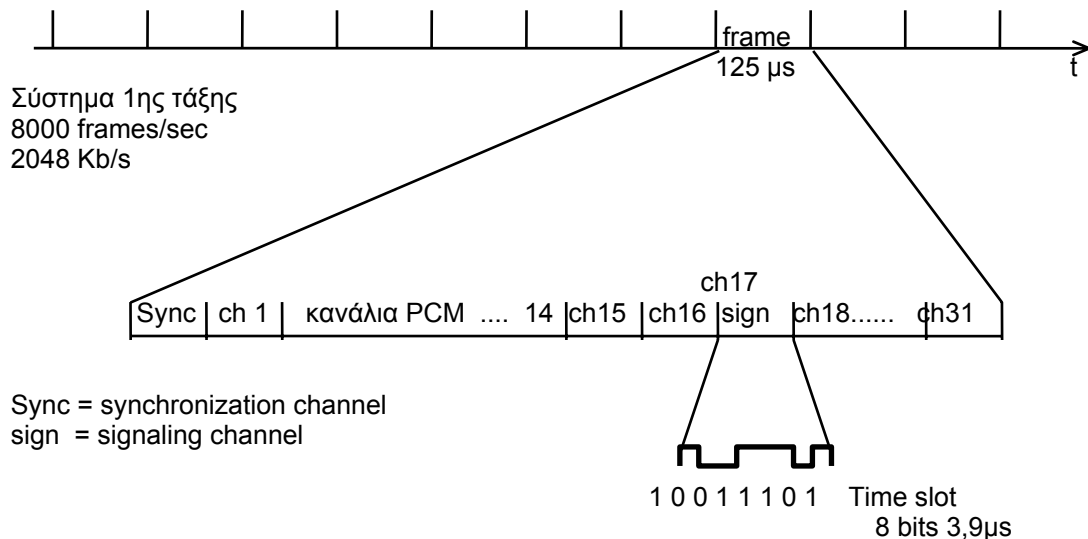
Όπως έχουμε αναφέρει η ITU-T συνιστά δύο συστήματα πολλαπλής μετάδοσης (PCM - TDM). Το ευρωπαϊκό με 32 χρονοθυρίδες και το αμερικάνικο με 24. Σε κάθε χρονοθυρίδα εκπέμπεται μιά λέξη PCM (8 bits). Επειδή σε κάθε time slot παρίσταται ψηφιακά ένα δείγμα του σήματος λέμε ότι έχουμε πολυπλεξία χρονοθυρίδων (Time slot interleaving).

Οι 32 ή 24 χρονοθυρίδες έχουν συγκεκριμένη διάταξη στον χρόνο και το όλο σύνολο ονομάζουμε Frame (πλαίσιο) 1ης τάξης. Στο ευρωπαϊκό σύστημα το frame αποτελείται από 32 time slots, σε κάθε TS έχουμε 8 bits που αντιστοιχούν στο δείγμα της στιγμής του συγκεκριμένου καναλιού.

Στο σχήμα 2.4α φαίνεται το Frame του PCM 1ης τάξης, οι χρονοθυρίδες του και ο τρόπος τοποθέτησης σ' αυτές των 32 καναλιών. Η αρίθμηση αρχίζει από το 0 συνεπώς οι χρονοθυρίδες κυμαίνονται από 0 έως 31.

Το κανάλι 0 (time slot 0) χρησιμοποιείται πάντα γιά συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη, εκπέμπει δηλαδή συνεχώς bits συγχρονισμού.

Το κανάλι 16 (time slot 16) χρησιμοποιείται γιά ανταλλαγή κρητιρίων επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη (σηματοδοσία) και γι'



Σχ. 2.4α Ανάπτυγμα του Frame για το PCM πρώτης τάξης

αυτό ονομάζεται κανάλι σηματοδότησης (signaling channel). Τα υπόλοιπα 30 κανάλια χρησιμοποιούνται για φωνή.

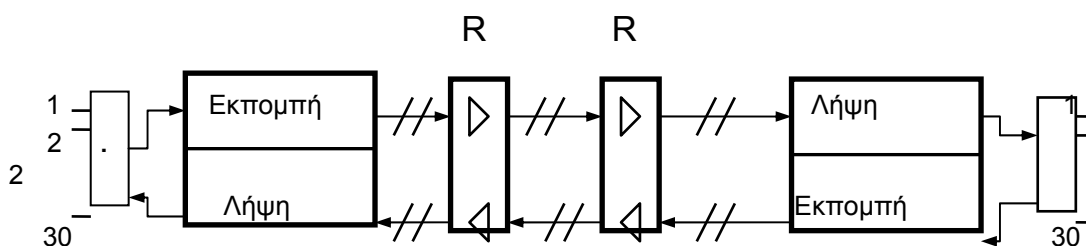
- Κάθε Time Slot διαρκεί $125\mu\text{s}/32 = 3,9 \mu\text{s}$

- Κάθε TS περιέχει 8 bits συνεπώς το frame έχει $32 \times 8 = 256$ bits

Γιά συχνότητα δειγματοληψίας 8000 Hz έχουμε 8000 δείγματα/sec ή $8000 \times 256 = 2048 \text{ Kb/s}$. Αυτή είναι η ταχύτητα δεδομένων για το PCM πρώτης τάξης.

2.1.10 PCM πρώτης και ανώτερης τάξης

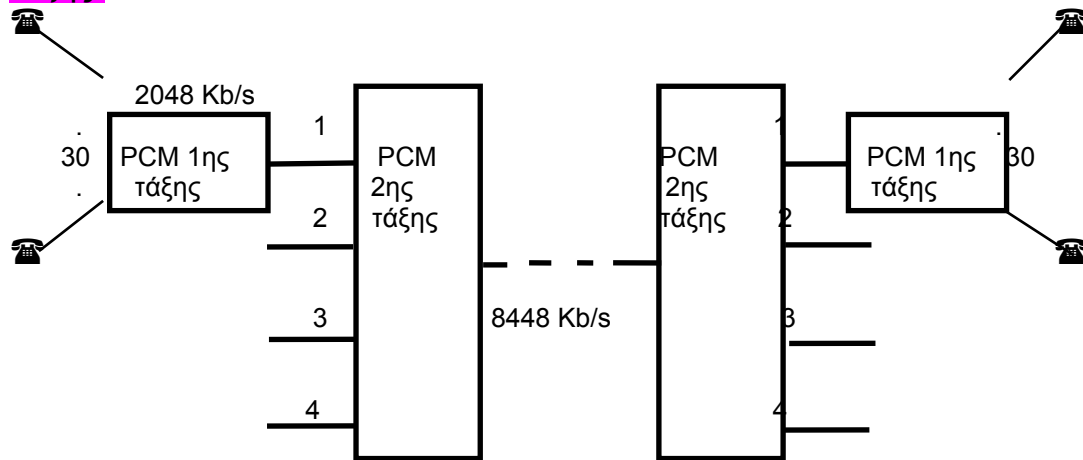
Στο σχήμα 2.5α φαίνεται παραστατικά ένα σύστημα PCM-TDM πρώτης τάξης 30 καναλιών. Στο σχήμα φαίνονται οι ξεχωριστοί δρόμοι εκπομπής και λήψης καθώς και οι ενδιάμεσοι αναγεννητές. Επίσης φαίνεται ο συμβολισμός της διχάλης που μετατρέπει (όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο) την επικοινωνία με δύο σε επικοινωνία με τέσσερις αγωγούς.



Σχ. 2.5α Σύστημα PCM πρώτης τάξης 30 καναλιών

Από το σύστημα πρώτης τάξης (primary PCM Multiplex) είναι δυνατό να έχουμε όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5β ψηφιακά συστήματα

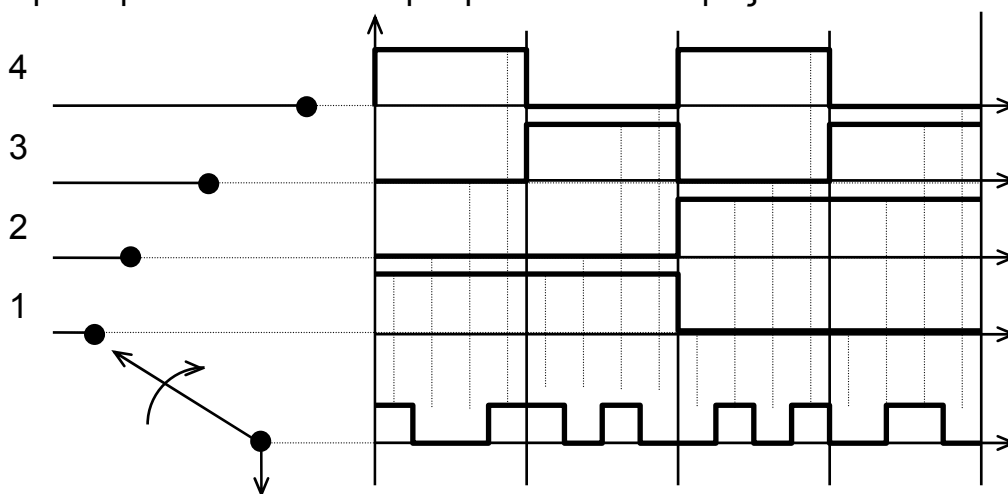
πολυπλεξίας δεύτερης τάξης. Ο κανόνας που έχει τηρηθεί είναι 4 συστήματα κατώτερης τάξης δημιουργούν ένα σύστημα ανώτερης τάξης.



Σχ. 2.5β Σύστημα PCM δεύτερης τάξης

Στο ψηφιακό σύστημα δεύτερης τάξης συνδιάζονται στην εκπομπή με δειγματοληψία τα τέσσερα ψηφιακά σήματα των συστημάτων πρώτης τάξης (το καθένα με ταχύτητα 2048 Kb/s) σε ένα ψηφιακό σήμα ταχύτητας 8448 Kb/s. Η ταχύτητα αυτή είναι $4 \times 2048 + 256 = 8448$ Kb/s. Η επιπλέον ταχύτητα προστίθεται γιατί έχει το σύστημα ανοχές διότι στην πράξη κάθε σήμα πρώτης τάξης δεν έχει ακριβώς ταχύτητα 2048 Kb/s αλλά κυμαινόμενη. Αυτό συμβαίνει και στα άλλα συστήματα ανώτερης τάξης όπως θα δούμε.

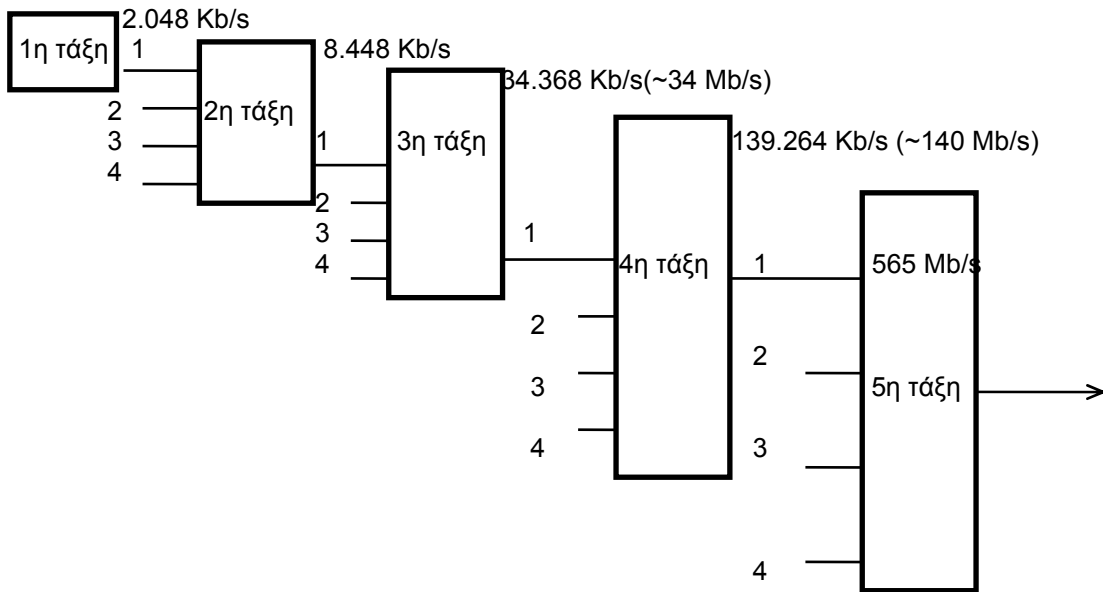
Όπως βλέπουμε στο σχ. 2.5γ στο σύστημα δεύτερης τάξης έχουμε δειγματοληψία και συνδιασμό σε ένα σήμα των τεσσάρων σημάτων πρώτης τάξης με **"bit interleaving"** δηλαδή με **συνδυασμό ενός - ενός των bit των τεσσάρων σημάτων πρώτης τάξης**. Αν είχαμε "time slot interleaving" θα έπρεπε τα bit των time slots να ενταμιευθούν προσωρινά σε "buffers" πριν γίνει ο συνδυασμός των TS.



Σχ. 2.5γ Πολυπλεξία 4 PCM 1ης τάξης σε ένα 2ης τάξης

Στο σχήμα 2.5δ φαίνεται, με βάση το PCM - TDM σύστημα 30 καναλιών φωνής η δυνατότητα σχηματισμού συστημάτων δεύτερης, τρίτης, τέταρτης και πέμπτης τάξεως. Στην πράξη δεν υπάρχουν μεγαλύτερα της 5ης τάξεως PCM. Φαίνονται επίσης και οι ταχύτητες κατά ITU-T κάθε τάξης PCM.

Στο δεύτερο μέρος του σχήματος φαίνονται τα είδη των γραμμών μεταδόσεως που είναι κατάλληλα και χρησιμοποιούνται για την μετάδοση κάθε τάξεως PCM.



Είδος γραμμής μεταδόσεως	τάξεις PCM	Ταχύτης δεδομένων (Kb/s)	Αριθμός τηλεφ. καναλιών
Ζεύγος Καλωδίων	1,2	1η τάξη 2.048	30
Ζεύγος νέου τύπου καλωδίου	1,2,3	2η τάξη 8.448	120
Μικρο-ομοαξονικό καλώδιο	2,3,4	3η τάξη 34.368	480
Ομοαξονικό Καλώδιο	3,4,5	4η τάξη 139.284	1920
Radio Link 12 GHz	2,3,4	5η τάξη 565 Mb/s	7680
Κυματοδηγός 30-120 GHz	4,5		
Οπτικές ίνες	2,3,4,5		

Σχ. 2.5δ Ανάπτυγμα των τάξεων PCM και των καταλλήλων γραμμών μεταδόσεως

Στην περίπτωση των συστημάτων πρώτης τάξης σαν μέσο μεταδόσεως συνήθως χρησιμοποιούνται κατάλληλα ζεύγη αγωγών των υπάρχοντων καλωδίων. Για κάθε σύστημα χρειάζονται όπως γνωρίζουμε δύο ζεύγη (εκπομπή και λήψη). Οι ενδιάμεσοι αναγεννητές των συστημάτων αυτών τοποθετούνται ανάλογα με το είδος του καλωδίου σε αποστάσεις 1,5 Km έως 2 Km.

2.1.11. Άλλα συστήματα ψηφιακής μετάδοσης

Δέλτα Διαμόρφωση

Άλλα συστήματα ψηφιακής διαμόρφωσης είναι αυτά που ονομάζονται διαφορικά PCM (Differential PCM). Σ' αυτά έχουμε πάλι δειγματοληψία κβαντοποίηση και κωδικοποίηση. Στην κωδικοποίηση όμως δεν κωδικοποιείται το ίδιο το δείγμα, αλλά κβαντοποιείται η διαφορά του με το προηγούμενο (κβαντοποιείται η μεταβολή).

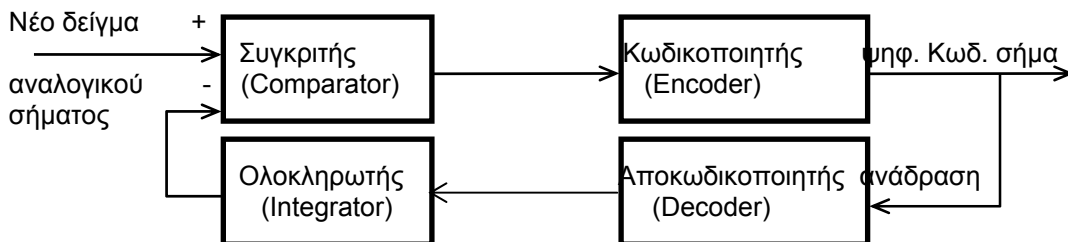
Επειδή στα συστήματα αυτά η συχνότητα δειγματοληψίας είναι πολύ μεγαλύτερη από τις συχνότητες του σήματος η διαφορά των δύο συνεχών δειγμάτων είναι εν γένει μικρή.

Στην περίπτωση που η κωδικοποίηση της διαφορά αυτής γίνεται με κώδικα n-bit τότε η διαμόρφωση αυτή λέγεται n-bit differential PCM, ή n-bit DPCM.

Όταν n=1 τότε η διαμόρφωση αυτή ονομάζεται "Δέλτα Διαμόρφωση" και στα αγγλικά Delta Modulation (DM).

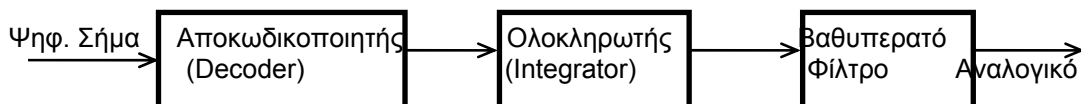
2.1.12 Η Δέλτα Διαμόρφωση αναλυτικά

Στο σχήμα 3.2α φαίνεται παραστατικά η διαμόρφωση Δέλτα. Το κωδικοποιημένο σήμα της εξόδου αποκωδικοποιείται στον "decoder". Από τον "Ολοκληρωτή (Integrator)" στην συνέχεια αναπαράγεται σε κβαντοποιημένη μορφή το προηγούμενο σήμα εισόδου και ενταμιεύεται στον Συγκριτή (Comparator). Στον comparator στην συνέχεια γίνεται η σύγκριση του σήματος αυτού με το αφικνούμενο νέο δείγμα. Η διαφορά τους κβαντοποιείται και κωδικοποιείται στον Encoder.



Σχ. 3.2α Η Δ - διαμόρφωση στην εκπομπή

Στην λήψη έχουμε αποδιαμόρφωση όπως δείχνει το σχήμα 3.2β. Εκτός από τον αποκωδικοποιητή (decoder) και τον ολοκληρωτή (Integrator) χρησιμοποιείται και βαθυπερατό φίλτρο ώστε η κβαντοποιημένη μορφή του σήματος να επανέλθει στην αναλογική.



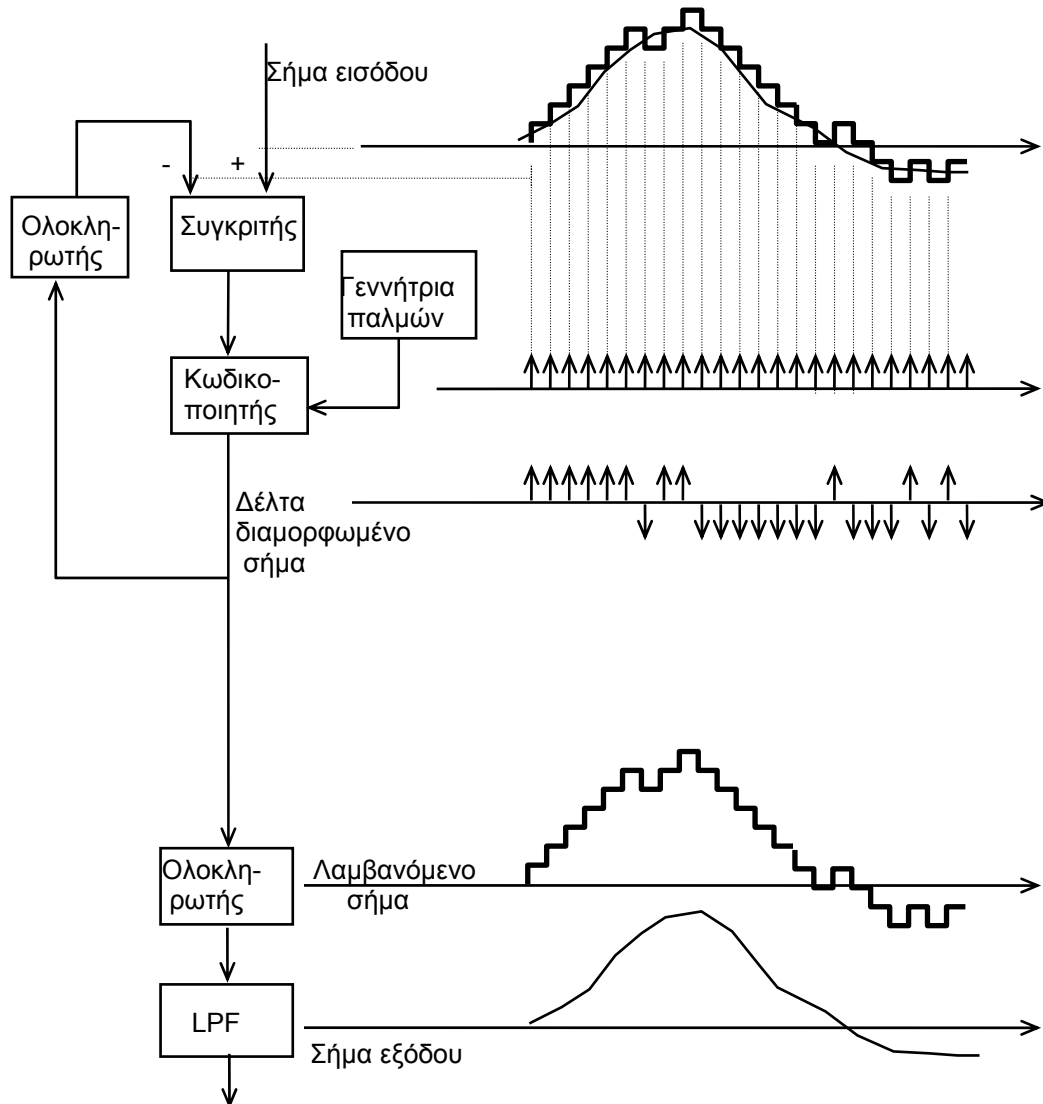
Σχ. 3.2β Η Δ - διαμόρφωση στην λήψη

Η ανάγκη ενταμίευσης του εκπεμπόμενου σήματος επιβάλλει την μη χρησιμοποίηση του διαμορφωτή DPCM για περισσότερες από μία εισόδους και δυσκολεύει την χρησιμοποίησή του σε συστήματα

πολλαπλής μετάδοσης TDM. Για τον λόγο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε ακόμη στην τηλεφωνία.

Στην διαμόρφωση ΔΜ συγκρίνεται μόνο αν είναι θετική ή αρνητική η διαφορά του νέου και παλαιού δείγματος.

Στο σχήμα 3.2γ φαίνεται το σύστημα της διαμόρφωση ΔΜ. Στο σύστημα ο κωδικοποιητής τροφοδοτείται με μία κατάλληλη σειρά παλμών.



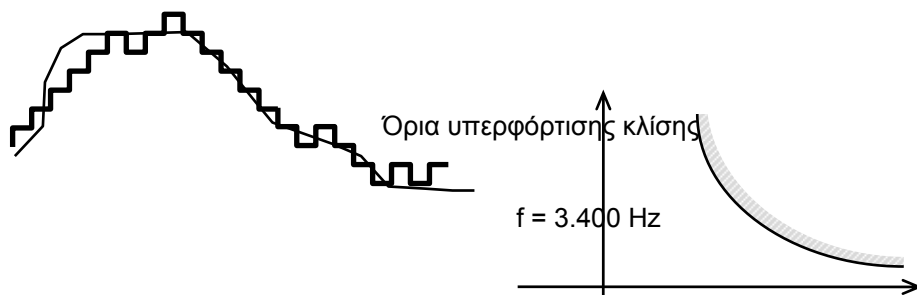
Σχ. 3.2γ Αναλυτική προσέγγιση της Δ - Διαμόρφωσης

Ανάλογα τότε με το αν είναι θετικό ή αρνητικό το αποτέλεσμα της σύγκρισης στον Comparator νέου και παλαιού δείγματος πολλαπλασιάζεται στον encoder κάθε παλμός επί +1 ή -1 αντίστοιχα, πριν μεταδοθεί στην γραμμή. Το διαμορφωμένο κατά ΔΜ (delta modulation) σήμα της γραμμής τροφοδοτεί παράλληλα τον Integrator. Ο Integrator αναπαράγει τότε το αρχικό σήμα με τρόπο ώστε τα αναπαραγόμενα σήμα σε κάθε θετικό παλμό να αυξάνει την τιμή του κατά ορισμένο βήμα και να την μειώνει κατά το ίδιο βήμα σε κάθε αρνητικό παλμό. Η αναπαραγόμενη κάθε φορά τιμή του σήματος

ενταμιεύεται στον Comparator όπου στην συνέχεια συγκρίνεται όπως αναφέραμε με το νέο δείγμα του σήματος. Και πάλι για τον λόγο αυτόν της ενταμίευσης και ο διαμορφωτής ΔΜ έχει μόνο μία είσοδο.

Όπως είναι προφανές από όσα αναφέραμε το αρχικό σήμα αναπαράγεται κατά θετικά ή αρνητικά βήματα. Το κάθε βήμα διαρκεί (όπως φαίνεται στο σχ. 3.2γ τόσο χρόνο όσο είναι το διάστημα μεταξύ δύο παλμών του κωδικοποιημένου σήματος.

Στο σχήμα 3.2δ φαίνεται ότι αν το αρχικό σήμα μεταβάλλεται μεταξύ δύο δειγμάτων περισσότερο απ' ότι είναι η τιμή κάθε βήματος τότε θα έχουμε μία παραμόρφωση του σήματος ή όπως λέγεται θα έχουμε μία υπερφόρτιση του συστήματος διαμόρφωσης. Η υπερφόρτιση αυτή που αναφέραμε και που εξαρτάται από την κλίση (slope) του σήματος, ονομάζεται υπερφόρτιση κλίσης (slope overload).

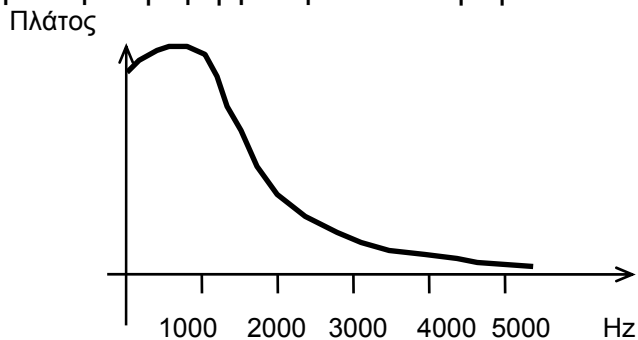


Σχ. 3.2δ Υπερφόρτιση συστήματος Δ - διαμόρφωσης
Σχ. 3.2ε Όρια υπερφόρτισης συστήματος Δ - διαμόρφωσης

Η κλίση μιάς καμπύλης εξαρτάται από την συχνότητα και το πλάτος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2ε για την περίπτωση ενός παραδείγματος Δ - διαμόρφωσης σε χαμηλές συχνότητες μπορούμε να έχουμε χωρίς υπερφόρτιση κωδικοποίηση σημάτων με μεγάλο πλάτος ενώ σε μεγαλύτερες συχνότητες το πλάτος πρέπει να είναι μικρότερο.

Εάν παρατηρήσουμε τώρα το φάσμα της ανθρώπινης ομιλίας και των πλάτος των σημάτων σε συνάρτηση με την συχνότητα βλέπουμε ότι η Δ - διαμόρφωση ταιριάζει στην ανθρώπινη ομιλία και δεν δημιουργείται σημαντική υπερφόρτιση του συστήματος.

Στην διαμόρφωση PCM έχουμε "υπερφόρτιση" μόνο όταν υπερβούμε την μέγιστη τιμή κβαντοποίησης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2ζ στην περίπτωση της διαμόρφωσης PCM έχουμε υπερφόρτιση (στην χρησιμοποιούμενη ζώνη συχνοτήτων 0 έως 3400 Hz) ανεξάρτητη από την συχνότητα και εξαρτώμενη μόνο από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή για κβαντοποίηση.



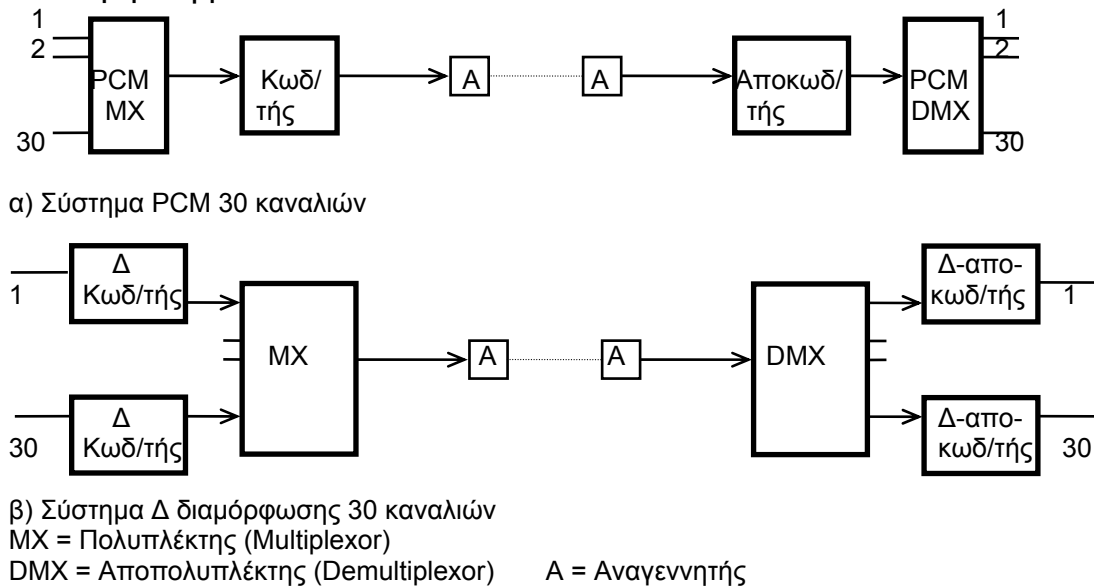
Σχ. 3.2ζ Η υπερφόρτιση για το PCM

Στην διαμόρφωση Δ που περιγράψαμε το βήμα αναπαραγωγής είναι ανεξάρτητο από το μέγεθος του σήματος εισόδου. Η διαμόρφωση αυτή που ονομάζεται γραμμική ΔM (Linear Delta Modulation) απαιτεί πολύ μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας (περίπου 1 MHz) ώστε για ομιλία να έχουμε σχέση σήματος προς θόρυβο SNR του ίδιου μεγέθους με την περίπτωση της διαμόρφωσης PCM.

Γι' αυτόν τον λόγο υπάρχουν διαφοροποιήσεις της διαμόρφωσης Δ . Με αυτές είναι δυνατό να έχουμε συστήματα μονοκάναλα με ταχύτητα 64 Kb/s που έχουν για ομιλία καλύτερο SNR από τα συστήματα PCM.

Παρ' όλο ότι τα συστήματα αυτά είναι πιο περίπλοκα από αυτά της απλής γραμμικής ΔM παραμένουν πολύ ενδιαφέροντα για χρησιμοποίηση. Τα μονοκάναλα αυτά συστήματα με ταχύτητα 64 Kb/s υπερτερούν έναντι των αντιστοίχων PCM με την ίδια ταχύτητα για τους λόγους που εξηγήθηκαν στα παραπάνω σχήματα. Η μη χρησιμοποίηση επίσης στην είσοδο βαθυπερατού φίλτρου (λόγω της μεγάλης ταχύτητας δειγματοληψίας) επιτρέπει την μετάδοση υψηλών συχνοτήτων του φάσματος της ανθρώπινης φωνής. Έτσι έχουμε καλύτερη ποιότητα μετάδοσης. Στην περίπτωση επίσης στρατιωτικών συστημάτων όπου απαιτείται να υπάρχει καταληπτότητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε PCM είτε ΔM με μικρή ταχύτητα, η ΔM πλεονεκτεί.

Τελευταία η ΔM αναπτύσσεται και σε συστήματα με πολλαπλή μετάδοση. Στο σχήμα 3.2θ έχουμε ένα τέτοιο σύστημα 30 καναλιών σε σύγκριση με το PCM 30 καναλιών.



Σχ. 3.2θ Πολλαπλή μετάδοση με Δ - διαμόρφωση

Όπως φαίνεται το σύστημα αυτό πλεονεκτεί έναντι του PCM επειδή δεν χρειάζεται κατωδιαβατά φίλτρα και γενικά επειδή είναι απλούστερο. Μειονεκτεί όμως κατά το ότι χρειάζεται ξεχωριστό διαμορφωτή (Delta encoder) για κάθε κανάλι. Γενικά φαίνεται ότι μπορεί να έχουμε οικονομικά συγκρίσιμα συστήματα ΔM - TDM με τα PCM - TDM.

2.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ & ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

2.2.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για να επικοινωνήσουν δύο ή περισσότερα συστήματα πρέπει να εξασφαλισθεί η φυσική ροή της πληροφορίας μεταξύ τους, καθώς επίσης και λειτουργίες ελέγχου και διαχείρισης της ανταλλαγής πληροφορίας. Έτσι μπορεί να γίνει διαχωρισμός ανάμεσα σε δύο λειτουργίες:

α) Μετάδοση δεδομένων (data transmission), η οποία ορίζεται ως η μετάδοση πληροφορίας μέσω κάποιου φυσικού μέσου χρησιμοποιώντας κάποια μορφή φυσικής αναπαράστασης του σήματος, ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιείται.

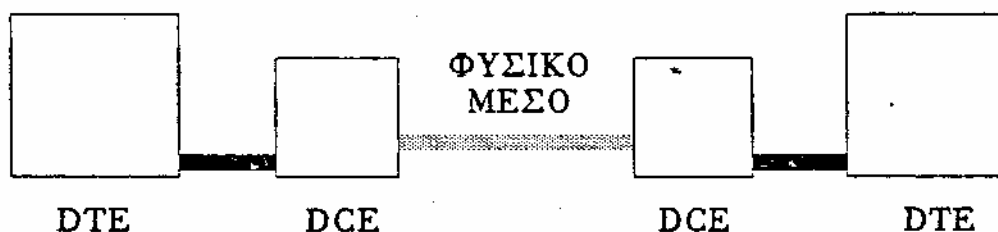
β) Επικοινωνία δεδομένων (data communication), στην οποία δίνουμε μεγαλύτερο εύρος από τη μετάδοση δεδομένων αφού καλύπτει όχι μόνο τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετάδοσης, αλλά και πολλές άλλες παραμέτρους όπως ο εξοπλισμός και το λογισμικό που απαιτούνται για τη μετάδοση δεδομένων, διαδικασίες για έλεγχο και διόρθωση λαθών, πρότυπα για τη σύνδεση του εξοπλισμού των χρηστών στο δίκτυο και μια ποικιλία κανόνων ή "πρωτοκόλλων" με σκοπό την εξασφάλιση της ανταλλαγής πληροφορίας.

Αν η πληροφορία οποιασδήποτε μορφής μεταδίδεται μόνο προς μια κατεύθυνση έχουμε μονόδρομη (simplex) επικοινωνία (π.χ. τηλεόραση, επικοινωνία υπολογιστή-εκτυπωτή).

Έχουμε αμφίδρομη (full duplex) επικοινωνία, όταν η πληροφορία μεταδίδεται ταυτόχρονα και στις δύο κατευθύνσεις (π.χ. τηλεφωνία).

Υπάρχει και ένας τρίτος τρόπος επικοινωνίας, η ημιαμφίδρομη (half duplex), όταν υπάρχει διάδοση και στις δύο κατευθύνσεις, αλλά όχι ταυτόχρονα (π.χ. CB- ραδιοσυσκευή ζώνης συχνοτήτων πολιτών).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τελικός σκοπός είναι η μεταφορά ηλεκτρικών σημάτων στο φυσικό μέσο διάδοσης. Για τον σκοπό αυτό, είναι απαραίτητη η χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού (DCE -Data Communication Equipment) για την επικοινωνία του τερματικού του χρήστη (DTE -Data Terminal Equipment) και του φυσικού μέσου, όπως περιγράφεται στο σχήμα 2.2-1.



Σχ. 2.2-1 (DTE -Data Terminal Equipment
DCE -Data Communication Equipment)

Κάθε κανάλι μετάδοσης προκαλεί παραμόρφωση του σήματος που διαδίδεται σε αυτό και έτσι το σήμα που φτάνει στο δέκτη δεν είναι το ίδιο ακριβώς με αυτό που μεταδόθηκε. Αυτό οφείλεται στις ατέλειες του μέσου και έχει ως αποτέλεσμα:

- **Απόσβεση**, δηλαδή ελάττωση της ισχύος του σήματος. Η απόσβεση εξαρτάται από τη συχνότητα του σήματος.

- **Παραμόρφωση** του σήματος λόγω διαφορετικής συμπεριφοράς του μέσου σε κάθε περιοχή του σήματος.
- **Θόρυβος**, που είναι κάθε ανεπιθύμητη παρεμβολή από ανεξάρτητες πηγές μεταξύ πομπού και δέκτη.

2.2.2 ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Ο φυσικός δρόμος μετάδοσης της πληροφορίας είναι το μέσο μετάδοσης μέσω του οποίου, σήμα κάποιας μορφής φτάνει από τον πομπό στο δέκτη. Το μέσο μετάδοσης μπορεί να πάρει διάφορες μορφές από τις πιο απλές όπως το **συνεστραμμένο ζεύγος (1877)** έως τις πιο σύγχρονες όπως η **οπτική (να (1980))**. Ανάμεσα τους, βρίσκονται οι πολύ συνηθισμένες μέθοδοι μετάδοσης μέσω **ομοαξονικού καλωδίου (1910)**, **ραδιοζεύξης (1930)** και **δορυφορικής σύνδεσης (1965)**.

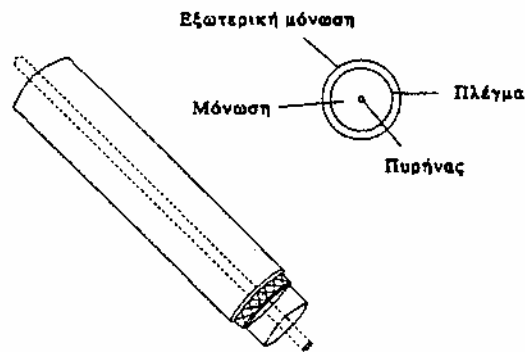
α) Το συνεστραμμένο ζεύγος (twisted pair) είναι η πιο απλή και φτηνή γραμμή μεταφοράς. Αποτελείται από δυο μονωμένα καλώδια, που είναι τυλιγμένα το ένα γύρω από το άλλο. Ο λόγος του τυλίγματος είναι η μείωση του θορύβου, που επηρεάζει το ηλεκτρικό σήμα λόγω εξωτερικών πηγών. Το συνεστραμμένο ζεύγος, περιβάλλεται από μονωτικό υλικό, που αρχικά ήταν χαρτί ενώ τώρα πλαστικό. Η πρώτη χρήση των συνεστραμμένων ζευγών, ήταν η μετάδοση αναλογικού σήματος αλλά αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και για τη μετάδοση ψηφιακού σήματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων και οι τιμές εύρους ζώνης (της τάξης αρκετών εκατοντάδων kHz) και απόσβεσης, εξαρτώνται από τη διάμετρο των καλωδίων. Τυπικές διαμέτροι είναι 0,4, 0,5, 0,6 και 0,7 mm. Αν χρησιμοποιηθεί μεταλλική εξωτερική προστασία, μειώνεται η επίδραση του θορύβου αλλά ελαττώνεται το εύρος ζώνης.

β) Μια συνηθισμένη μορφή καλωδίου περιέχει πολλά παράλληλα καλώδια (από 10 έως 50) σε πλαστικό περίβλημα. Έχει μεγαλύτερο κόστος από το διπλό καλώδιο και το εύρος ζώνης είναι της τάξης των 10 MHz. Οι απώλειες διάδοσης σε αυτό το μέσο είναι πολύ μεγάλες ενώ παράλληλα είναι πολύ ευαίσθητο στον εξωτερικό θόρυβο. Γι' αυτό το λόγο συνήθως χρησιμοποιείται μόνο για την εσωτερική σύνδεση συστημάτων.

γ) Το ομοαξονικό καλώδιο, η μορφή του οποίου φαίνεται στο σχήμα 2.2-2, αποτελείται από έναν αγωγό που βρίσκεται σε ένα χάλκινο σωλήνα ο οποίος χρησιμοποιείται ως μονοπάτι επιστροφής και ηλεκτρική προστασία τgu εσωτερικού αγωγού.

Λόγω της ειδικής κατασκευής του, το ομοαξονικό καλώδιο είναι πολύ ανθεκτικό στον εξωτερικό ηλεκτρικό θόρυβο και έτσι επιτρέπει τη μετάδοση σημάτων μεγάλου εύρους ζώνης. Για παράδειγμα, μπορεί να μεταφέρει μέχρι 10800 αναλογικές τηλεφωνικές διοδεύσεις με πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (FDM-Frequency Domain Multiplex) ενώ όταν μεταφέρει ψηφιακό σήμα πολυπλεγμένο στο χρόνο (TDM - Time Domain Multiplex) ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να είναι της τάξης των 34, 140 ή και 565 Mbps ανάλογα με τη διάμετρο αγωγού περιβλήματος (0,6/2,8 χιλ, 1,2/4,4 χιλ, 2,6/9,5 χιλ

αντίστοιχα).



Σχ. 2.2-2 Ομοαξονικό Καλώδιο

δ) Οι ραδιοζεύξεις (P/H ζεύξεις) χρησιμοποιούν ως μέσο μετάδοσης τον ίδιο τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο ατμοσφαιρικός αέρας δε μπορεί να θεωρηθεί καλά ορισμένο μέσο, όπως τα προηγούμενα, αφού οι ιδιότητες του μεταβάλλονται με το χρόνο και τον τόπο, ενώ δε μπορούν να τεθούν όρια ή καταληκτικά σημεία. Το σήμα μπορεί να είναι αναλογικό ή ψηφιακό, και ανάλογα με τη συχνότητα και τον τρόπο διαμόρφωσης, η απόσταση μπορεί να είναι από λίγα μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα.

Δυο είναι οι παράγοντες που διαχωρίζουν αυτόν τον τρόπο μετάδοσης από τους υπόλοιπους και μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα ή να χρησιμοποιηθούν για εξειδικευμένες μορφές επικοινωνίας :

Η μεταβολή των ιδιοτήτων του μέσου, όπως η απορρόφηση, ο θόρυβος ή η διαδρομή του σήματος, είναι τυχαία και εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες ή άλλα φυσικά "φαινόμενα". Αυτό μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα μετάδοσης (διαλείψεις) ή και διακοπή της ζεύξης. Από την άλλη πλευρά, ιδιαίτερα φαινόμενα, όπως η περίθλαση ή η ανάκλαση στην ιονόσφαιρα χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση συνδέσεων πολύ μεγάλης εμβέλειας.

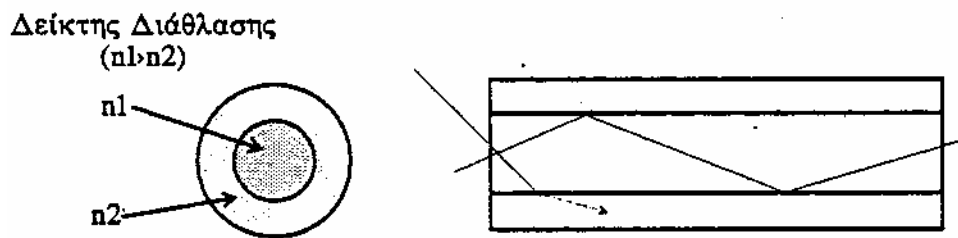
Στην ατμόσφαιρα, ως μέσο μετάδοσης, δε μπορούν να οριστούν τερματικά σημεία. Ετσι ένα υπαρκτό πρόβλημα είναι οι αλληλοπαρεμβολές μεταξύ διαφορετικών ζεύξεων. Για την αποφυγή τους, πέρα από τα μέτρα που λαμβάνει ο κατασκευαστής (φίλτρα, κεραίες υψηλής κατευθυντικότητας), η ITU-R έχει ορίσει τις επιτρεπτές συχνότητες για κάθε εφαρμογή.

Γιά τον ίδιο λόγο, θέμα. ορισμού είναι και η επιτρεπτή χωρητικότητα (τηλεφωνικές διοδεύσεις, ρυθμός ψηφιακής παροχής). Το πλεονέκτημα της έλλειψης ορίων, είναι ότι μέσω P/H ζεύξης συνδέονται απομονωμένες περιοχές και υλοποιούνται οι δορυφορικές συνδέσεις και η κινητή τηλεφωνία.

ε) Τα δορυφορικά συστήματα κάνουν χρήση **γεωστατικών δορυφόρων** ως σταθμών αναμετάδοσης και αποτελούν τη βάση των διεθνών συνδέσεων. Ο ίδιος δορυφόρος μπορεί να δέχεται σήματα από πολλούς σταθμούς εδάφους οι οποίοι εκπέμπουν σε καθορισμένες χρονικές στιγμές (TDMA - Time Div. Multiple Access). Από το σήμα που αναμεταδίδει ο δορυφόρος, κάθε επίγειος σταθμός λήψης κρατάει ό,τι απευθύνεται σε αυτόν

στ) Στην **κινητή τηλεφωνία** κυριαρχεί η ανάγκη ανεξαρτησίας του χρήστη από το μέσο διάδοσης αφού ο χώρος στον οποίο βρίσκεται δεν είναι δεδομένος. Αυτό μόνο μέσω P/H σύνδεσης μπορεί να γίνει.

ζ) Η πιο σύγχρονη εξέλιξη στον τομέα των φυσικών μέσων μετάδοσης, είναι η **οπτική ίνα**. Η ιδέα δημιουργίας της οπτικής ίνας είναι η μετάδοση φωτός αντί ηλεκτρικού σήματος μεταξύ οπτικού πομπού και δέκτη.



Σχ. 2.2-3 Οπτική ίνα

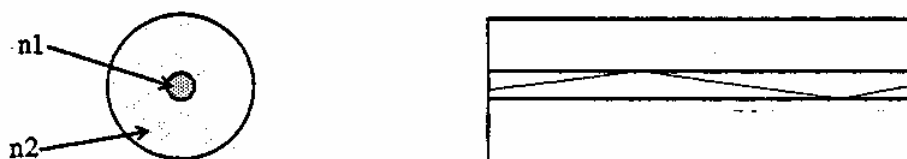
Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2-3, η οπτική ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης αποτελείται από ένα κυλινδρικό πυρήνα με δείκτη διάθλασης n_1 , ο οποίος περιβάλλεται από υλικό με δείκτη διάθλασης n_2 . Κάθε ακτίνα φωτός, που φτάνει στο διαχωριστικό τμήμα των δυο περιοχών, ανακλάται εφ' όσον η πρόσπτωση της γίνει με την κατάλληλη γωνία (μεγάλη) και έτσι παραμένει στην περιοχή του πυρήνα, στον οποίο ταξιδεύει με διαδοχικές ανακλάσεις. Για ειδικές εφαρμογές (λόγω του υψηλού κόστους), χρησιμοποιείται οπτική ίνα με ομαλή μετάβαση ανάμεσα στους δυο δείκτες διάθλασης, όπου η μετάδοση γίνεται με διάθλαση.

Κάποιο ποσοστό του φωτός χάνεται λόγω απορρόφησης ή σκέδασης προκαλώντας εξασθένιση του σήματος. Στις σύγχρονες οπτικές ίνες επιτυγχάνεται η ελάχιστη εξασθένιση, αν χρησιμοποιηθεί φως με μήκος κύματος στην περιοχή των 1300 ή 1550 nm.

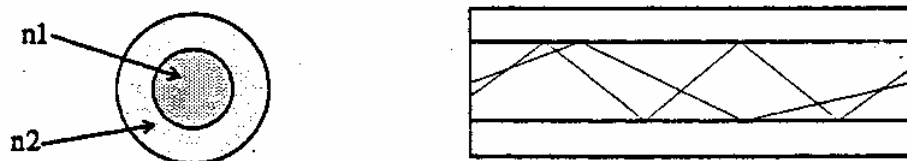
Μπορεί να γίνει διαχωρισμός ανάμεσα σε δυο βασικά είδη οπτικής ίνας ανάλογα με τον αριθμό των οπτικών δρόμων (τρόποι) που μπορούν να διαδοθούν μέσα στην ίνα. Έτσι έχουμε τις :

- Μονότροπες οπτικές ίνες (Singlemode Optical Fibres) σχήμα 2.2-4 στις οποίες υπάρχει μόνο ένας τρόπος διάδοσης και τις
- Πολύτροπες οπτικές ίνες (Multimode Optical Fibres) σχήμα 2.2-5 στις οποίες μπορούν να διαδοθούν περισσότεροι από έναν τρόποι.

Το μέγεθος της πληροφορίας που μπορεί να μεταδοθεί από μια οπτική ίνα εκφράζεται με το σταθερό (για κάθε ίνα) γινόμενο εύρους ζώνης-απόστασης. Τυπικές τιμές του γινομένου αυτού είναι $20 \text{ MHz} \cdot \text{Km}$ για πολύτροπες ίνες και $100 \text{ GHz} \cdot \text{Km}$ για μονότροπες. Αυτό σημαίνει, ότι όσο μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων ταξιδεύει στην ίνα, τόσο μικρότερη απόσταση μπορεί να δκ νύσει χωρίς η παραμόρφωση, που εισάγει η χρωματική διασπορά και η παραμόρφωση πολλών τρόπων, να είναι απαγορευτική.



Σχ. 2.2-4 Μονότροπη Οπτική ίνα



Σχ. 2.2-5 Πολύτροπη Οπτική ίνα

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι κατά πρώτο λόγο η δυνατότητα μεταφοράς μέγα" Λ υ ποσού πληροφορίας και κατόπιν η ανοσία τους στον ηλεκτρικό θόρυβο, ο εύκολος χειρισμός τους, αφού οι διαστάσεις τους είναι πολύ μικρές, η ασφάλεια που προσφέρουν στις επικοινωνίες αλλά και το συνεχώς μειούμενο κόστος.

Στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο του μέλλοντος, οι οπτικές ίνες θα καταλάβουν σημαντική θέση και θα χρησιμοποιούνται όχι μόνο για τη σύνδεση τηλεφωνικών κέντρων ή για ζεύξεις υψηλής χωρητικότητας, αλλά θα καταλήγουν στον καταναλωτή παρέχοντας του μεγάλα ποσά πληροφορίας (π.χ. HDTV-τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας).

Στον Πίνακα 2.2-1 βλέπουμε συγκεντρωτικά στοιχεία για διάφορα μέσα μετάδοσης και τη χρήση τους.

ΜΕΣΟ ΜΑΤΑΔΟΣΗΣ	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	ΧΡΗΣΗ/ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΝΣΥΡΜΑΤΟΙ ΦΟΡΕΙΣ Δισύρματες γραμμές (υπόγειες ή εναέριες)	Καμμία μελλοντική επέκταση/ εγκατάσταση	Έως 12 τηλεφωνικές διοδεύσεις (με χρήση FDM 12)
Τετρασύρματες γραμμές για μεταφορά αναλογικού σήματος	Καμμία μελλοντική επέκταση/ εγκατάσταση	Έως 480 τηλεφωνικές διοδεύσεις (σύστημα FDM 120 ή FDM 480 με χρήση γραμμών 0.9 mm)
Τετρασύρματες γραμμές για μεταφορά ψηφιακού σήματος	Περιορισμένη χρήση στο μέλλον	30 τηλεφωνικές διοδεύσεις (PCM σήμα ρυθμού 2Mbps με χρήση γραμμών 0.9 mm)

ΕΣΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	ΧΡΗΣΗ/ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ
Ομοαξονικό καλώδιο για μεταφορά αναλογικού σήματος	Καμμία μελλοντική επέκταση /εγκατάσταση	Έως και 10800 τηλεφωνικές διοδεύσεις (με ομοαξονικό 2.6/9.5 mm)
Ομοαξονικό καλώδιο για μεταφορά ψηφιακού σήματος	Περιορισμένη χρήση στο μέλλον	Το πολύ έως 8000 τηλεφωνικές διοδεύσεις (PCM σήμα ρυθμού 565 Mbps)
ΌΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ Μονότροπες ίνες (1300 nm)	Ευρεία χρήση στο μέλλον	Χρήση σε ψηφιακά συστήματα ρυθμού από 2 Mbps έως 140 ή 155 Mbps
Μονότροπες ίνες (1550 nm)	Ευρεία χρήση στο μέλλον	Χρήση σε ψηφιακά συστήματα υψηλού ρυθμού (565 Mbps,
ΡΑΔΙΟΖΕΥΞΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΖΩΝΗ HF	Καμμία μελλοντική επέκταση / εγκατάσταση	20 τηλεφωνικές διοδεύσεις
ΖΩΝΗ UHF/VHF	Ευρεία χρήση στο μέλλον	100 τηλεφωνικές διοδεύσεις
ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ Αναλογικά	Καμμία μελλοντική επέκταση / εγκατάσταση	έως 2000 τηλεφωνικές διοδεύσεις
Ψηφιακά	Ευρεία χρήση στο μέλλον	έως 2000 τηλεφωνικές διοδεύσεις (2, 8, 34, 140 Mbps)
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ		
Αναλογικά	Καμμία μελλοντική επέκταση / εγκατάσταση	100 τηλεφωνικές διοδεύσεις
Ψηφιακά	Χρήση σε ειδικές εφαρμογές	100 τηλεφωνικές διοδεύσεις
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ (Χρήση FDMA ή TDMA)		
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ	Ευρεία χρήση στο μέλλον	100 έως 2000 τηλεφωνικές διοδεύσεις
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΣΑΙΑΣ ΚΑΛΥΨΗΣ	Ευρεία χρήση στο μέλλον	500 έως 2000 τηλεφωνικές διοδεύσεις
ΔΙΗΠΕΙΡΩΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	Ευρεία χρήση στο μέλλον	2000 τηλεφωνικές διοδεύσεις

Πίν. 2.2-1 Μέσα Μετάδοσης

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΠΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ

Υ : Δεν είναι συμφέρουσα η εγκατάσταση νέων συστημάτων, αλλά τα είδη υπάρχοντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν

Π : Περιορισμένη χρήση στο μέλλον

Ε : Χρήση σε ειδικές εφαρμογές

Μ : Ευρεία χρήση στο μέλλον

Μ' : Ευρεία χρήση στο μέλλον