# ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής

***Ακαδημαϊκό Έτος 2023-2024***

# 1ο σετ Εργαστηριακών Ασκήσεων

## Μέρος Α΄

## Θεωρία Πληροφορίας

Σκοπός της άσκησης αυτής είναι να κατανοηθούν βασικές έννοιες από την Θεωρία Πληροφορίας. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω της μελέτης σχετικής βιβλιογραφίας αλλά και της υλοποίησης ενός συστήματος κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης μιας διακριτής πηγής. Πιο συγκεκριμένα, θα υλοποιηθεί ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί την κωδικοποίηση Huffman για τη συμπίεση εικόνας. Για την υλοποίηση καθώς και τις πειραματικές μετρήσεις προτείνεται το υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB.

**Πηγή:** Η πηγή που θα χρησιμοποιηθεί στην συγκεκριμένη υλοποίηση είναι μια εικόνα (“parrot.png”) η οποία αναπαρίσταται ως ένα μητρώο ακεραίων $I \in Z^{N \times M}$.

### Ερωτήσεις

Καλείστε να συντάξετε μία τεχνική αναφορά η οποία απαντά στα ακόλουθα ζητούμενα και επεξηγεί συνοπτικά την μεθοδολογία την οποία χρησιμοποιήσατε για να απαντήσετε.

**1.**
   - **a.** Αρχικά, καλείστε να εντοπίστε τα σύμβολα της πηγής (δηλαδή τις διακριτές τιμές τις οποίες λαμβάνουν τα pixels της εικόνας) και να εκτιμήσετε τις πιθανότητες εμφάνισης τους.
   - **b.** Στην συνέχεια, υπολογίστε την κωδικοποίηση Huffman για την συγκεκριμένη πηγή. Να υπολογίσετε: i) την εντροπία της κωδικοποίησης σας, ii) το μέσο μήκος κώδικα και iii) την αποδοτικότητα του κώδικα σας. Σχολιάστε συνοπτικά τα αποτελέσματά σας.

**2.** Θεωρήστε τώρα τη δεύτερης τάξης επέκταση πηγής του ερωτήματος 1.
   - **a.** Καλείστε να εντοπίσετε τα σύμβολα της δεύτερης τάξης επέκτασης πηγής (ζεύγη χαρακτήρων) και για κάθε ζεύγος να εκτιμήσετε την πιθανότητα εμφάνισης του.
   - **b.** Στην συνέχεια, υπολογίστε την κωδικοποίηση Huffman για την συγκεκριμένη πηγή. Να υπολογίσετε: i) την εντροπία της κωδικοποίησης σας, ii) το μέσο

μήκος κώδικα και iii) την αποδοτικότητα του κώδικα σας. Σχολιάστε συνοπτικά τα αποτελέσματά σας.

**c.** Πως συγκρίνονται, τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα του ερωτήματος 1;

**3.**

**a.** Εξηγήστε συνοπτικά γιατί στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν ισχύει ο τύπος: $H(X^2) = 2H(X)$ για τον υπολογισμό της εντροπίας της δεύτερης τάξης επέκτασης πηγής.

**b.** Να παραθέσετε ένα φράγμα της μορφής $a \leq \bar{L} < b$ για το μέσο μήκος κώδικα που υπολογίσατε στα ερωτήματα 1,2.

**4.** Κωδικοποιήστε την πηγή χρησιμοποιώντας των κώδικα Huffman που υπολογίσατε στο ερώτημα 1. Επιβεβαιώστε, την ορθότητα της κωδικοποίησης σας (π.χ. μέσω της αντίστροφής διαδικασίας – αποκωδικοποίησης). Συγκρίνετε τον αριθμό bits της δυαδικής αναπαράστασης της εικόνας σε σχέση με την κωδικοποίηση Huffman υπολογίζοντας τον λόγο συμπίεσης

$$J = \frac{\#\, bits\ κωδικοποίησης\ Huffman}{\#\, bits\ δυαδικής\ αναπαράστασης}.$$

**5.** Επιθυμούμε τώρα να μεταδώσουμε την κωδικοποιημένη ακολουθία που προέκυψε μέσα από ένα Δυαδικό Συμμετρικό Κανάλι για το οποίο δεν γνωρίζουμε την πιθανότητα $p$ σωστής μετάβασης. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε την συνάρτηση «$y = binary\_symmetric\_channel(x)$» η οποία μοντελοποιεί το κανάλι και λαμβάνει ως είσοδο το διάνυσμα του κώδικα σε bit ($x$) και παράγει την αντίστοιχη ακολουθία από bits που παρατηρεί ο δέκτης ($y$). Χρησιμοποιώντας τις δύο παραπάνω ακολουθίες bits ($x, y$) να εκτιμήσετε την παράμετρο $p$ (σε ακρίβεια 2 δεκαδικών ψηφίων) και να υπολογίσετε την χωρητικότητα του καναλιού. Υπολογίστε την αμοιβαία πληροφορία ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του καναλιού.

**Παρατηρήσεις:**

- Επισημαίνεται πως για την υλοποίηση του συγκεκριμένου ερωτήματος προτείνεται η χρήση των συναρτήσεων του MATLAB `huffmandict`, `huffmanenco`, `huffmandeco`.
- Μπορείτε να υπολογίσετε την δυαδική (binary) αναπαράσταση της εικόνας χρησιμοποιώντας την εντολή

```
bI = reshape((dec2bin(typecast(image(:),'uint8'),4)-'0').',1,[])
```

- Για να φορτώσετε το αρχείο της εικόνας στην μνήμη χρησιμοποιήστε την εντολή

```
I = imread('parrot.png');
```

# Μέρος Β’

# Κωδικοποίηση  Διακριτής Πηγής με τη μέθοδο DPCM

### 1.Εισαγωγή

Η κωδικοποίηση **DPCM** (**D**ifferential **P**ulse **C**ode **M**odulation) μπορεί να θεωρηθεί ως μια γενίκευση της κωδικοποίησης Δέλτα όπου το σήμα που κβαντίζεται και αποστέλλεται στο δέκτη είναι η διαφορά ανάμεσα στο τρέχον δείγμα (της χρονικής στιγμής n) και σε μία γραμμική πρόβλεψή του. Δηλαδή, στην κωδικοποίηση DPCM, υπολογίζουμε, σε κάθε χρονική στιγμή,  μια πρόβλεψη για την τιμή του τρέχοντος δείγματος με βάση τις τιμές προηγούμενων δειγμάτων τα οποία έχουν ήδη κωδικοποιηθεί και στη συνέχεια υπολογίζουμε το λάθος της πρόβλεψης αυτής. Το σήμα σφάλματος πρόβλεψης κβαντίζεται και στη συνέχεια κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα δυαδικά ψηφία ανά δείγμα.

### 2.Κωδικοποίηση DPCM

Ο κωδικοποιητής και ο αποκωδικοποιητής ενός συστήματος DPCM παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Προκειμένου να κβαντίσουμε και να κωδικοποιήσουμε την τιμή του τρέχοντος δείγματος υπολογίζουμε αρχικά μια πρόβλεψη για την τιμή του βασιζόμενοι σε κωδικοποιημένες τιμές προηγούμενων δειγμάτων. Η πρόβλεψη του σήματος $x(n)$ συμβολίζεται ως $\hat{y}'(n)$.  Στο Σχήμα παρατηρούμε μια διάταξη μνήμης (τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη) η οποία κρατάει αποθηκευμένες τις ανακατασκευασμένες τιμές των προηγούμενων δειγμάτων με βάση τις οποίες θα υπολογιστεί η πρόβλεψη της τιμής του τρέχοντος δείγματος. Σκοπός μας είναι να ελαχιστοποιήσουμε τη διασπορά του σήματος σφάλματος $y(n) = x(n) - \hat{y}'(n)$ έτσι ώστε αυτό να παρουσιάζει μικρή δυναμική περιοχή και να μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από μικρό αριθμό δυαδικών ψηφίων. Η διαδικασία της κβάντισης του σήματος σφάλματος $y(n)$ οδηγεί στο σήμα $\hat{y}(n)$ το οποίο και αποστέλλεται στο δέκτη.

Στο δέκτη, το σήμα $\hat{y}(n)$ συνδυάζεται με το σήμα $\hat{y}'(n)$ (την πρόβλεψη του $x(n)$).  Δεδομένου ότι οι προηγούμενα ανακατασκευασμένες τιμές καθώς και η μέθοδος πρόβλεψης που χρησιμοποιεί ο πομπός είναι γνωστές στο δέκτη, συνεπάγεται ότι ο πομπός και ο δέκτης είναι σε θέση να υπολογίσουν ακριβώς τις ίδιες τιμές για την πρόβλεψη $\hat{y}'(n)$ . Όπως και στην περίπτωση της κωδικοποίησης Δέλτα, και εδώ ο πομπός συμπεριλαμβάνει ως τμήμα του τη διάταξη του δέκτη η οποία υπολογίζει την ανακατασκευή $\hat{x}(n)$. Τις τιμές αυτές χρησιμοποιεί ο πομπός για να υπολογίσει την πρόβλεψη, και όχι τις πραγματικές τιμές $x(n)$, με σκοπό να μιμηθεί πλήρως τη διάταξη του δέκτη η οποία φυσικά δεν γνωρίζει τις πραγματικές τιμές. Χρησιμοποιώντας τις ανακατασκευασμένες τιμές για τον υπολογισμό της πρόβλεψης και στη συνέχεια του σφάλματος πρόβλεψης, εξασφαλίζουμε (όπως στην περίπτωση της κωδικοποίησης δέλτα) πως δεν έχουμε συσσώρευση του σφάλματος κβάντισης.

Στην απλή περίπτωση όπου βασιζόμαστε μόνο στην πρόβλεψη του προηγούμενου δείγματος οι εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη λειτουργία του συστήματος **DPCM** του Σχήματος 2 είναι οι ακόλουθες:

$$y(n) = x(n) - \hat{y}'(n-1)$$

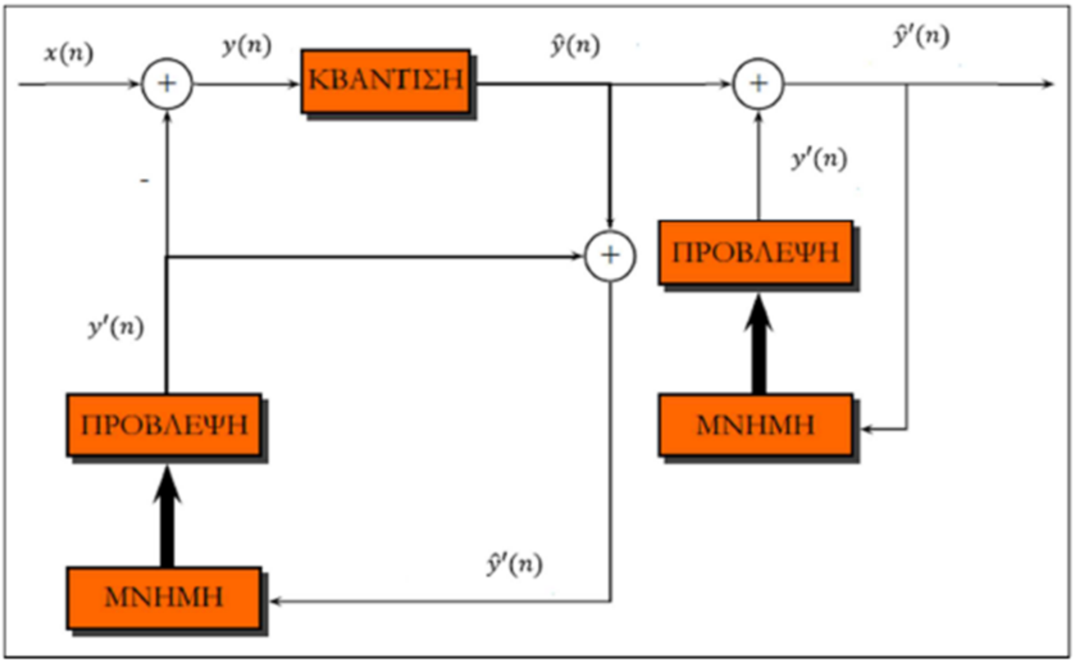
$$\hat{y}(n) = Q\big(y(n)\big)$$

$$\hat{y}'(n) = \hat{y}(n) + \hat{y}'(n-1)$$

όπου $Q(\cdot)$ είναι η συνάρτηση εισόδου-εξόδου του βαθμωτού κβαντιστή (ομοιόμορφου) που χρησιμοποιείται. Από τις παραπάνω σχέσεις λαμβάνουμε για το σφάλμα κβάντισης την έκφραση:

$$y_Q(n) = \hat{x}(n) - x(n) = \hat{y}(n) - y(n)$$

Παρατηρούμε πως αν στις παραπάνω εξισώσεις θέσουμε $\hat{y}'(n) = 0$ δηλαδή ένα σύστημα DPCM το οποίο δεν χρησιμοποιεί πρόβλεψη, τότε το σύστημα αυτό είναι ισοδύναμο με ένα απλό σύστημα κωδικοποίησης PCM.




*Σχήμα 1.*

# 3. Υπολογισμός του Φίλτρου Πρόβλεψης

Σε ένα γενικό σύστημα DPCM, η πρόβλεψη του δείγματος $x(n)$ δίνεται ως ένας γραμμικός συνδυασμός $p$ προηγουμένων τιμών $\hat{y}'(n-i)$ οι οποίες έχουν ήδη κωδικοποιηθεί και στη συνέχεια έχουν ανακατασκευαστεί, δηλαδή:

$$\hat{y}'(n) = \sum_{i=1}^{p} a_i \hat{y}'(n-i)$$

Σκοπός μας είναι να υπολογίσουμε τους συντελεστές $a_i$ με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ανάμεσα στο εκάστοτε τρέχον δείγμα εισόδου και την πρόβλεψή του:

$$MSE = E[e^2(n)] = E\left[x(n) - \sum_{i=1}^{p} a_i \hat{y}'(n-i)\right]$$

Το παραπάνω κριτήριο ωστόσο, είναι δύσκολο να ελαχιστοποιηθεί αφού το $MSE$ εξαρτάται από τους συντελεστές αλλά και από τον κβαντιστή που χρησιμοποιούμε. Επομένως, αποτελεί ένα μη-γραμμικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Για να ξεφύγουμε από αυτή τη δυσκολία, αντικαθιστούμε στην παραπάνω σχέση την ποσότητα $\hat{y}'(n-i)$με το $x(n-i)$ θεωρώντας πως αφού το δεύτερο αποτελεί την κβαντισμένη εκδοχή του πρώτου δεν κάνουμε μεγάλο σφάλμα.

Έτσι, μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε την έκφραση:

$$\widehat{MSE} = E[e^2(n)] = E\left[\left(x(n) - \sum_{i=1}^{p} a_i x(n-i)\right)^2\right]$$

$$\widehat{MSE} = E\left[\big(x(n)\big)^2 - 2x(n)\sum_{i=1}^{p} a_i x(n-i) + \left(\sum_{i=1}^{p} a_i x(n-i)\right)^2\right]$$

$$= E\left[\big(x(n)\big)^2\right] - 2E\left[x(n)\sum_{i=1}^{p} a_i x(n-i)\right] + E\left[\left(\sum_{i=1}^{p} a_i x(n-i)\right)^2\right]$$

$$= E\left[\big(x(n)\big)^2\right] - 2\textstyle\sum_{k=1}^{p} a_i E[x(n)x(n-i)] + E\left[\sum_{i=1}^{p} a_i x(n-i) \sum_{j=1}^{p} a_j x(n-j)\right]$$

$$= E\left[\big(x(n)\big)^2\right] - 2\sum_{k=1}^{p} a_i E[x(n)x(n-i)] + E\left[\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} a_i a_j x(n-i)\, x(n-j)\right]$$

$$= E\left[\left(x(n)\right)^2\right] - 2\sum_{k=1}^{p} a_i E[x(n)x(n-i)] + \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} a_i a_j E[x(n-i)x(n-j)]$$

$$= R_x(0) - 2\sum_{k=1}^{p} a_i R_x(i) + \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} a_i a_j R_x(i-j)$$

Παραγωγίζοντας την προηγούμενη σχέση του σφάλματος ως προς καθένα από τους συντελεστές $a_i$ του *φίλτρου πρόβλεψης* και θέτοντας την παράγωγο ίση με μηδέν, προκύπτει ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων για τους συντελεστές του φίλτρου, δηλαδή,

$$\frac{\partial\, \widehat{MSE}}{\partial a_i} = 0 \Longrightarrow$$

$$\sum_{k=1}^{p} a_i R_x(i-j) = R_x(i), 1 \le i, j \le p$$

$$\boldsymbol{Ra} = \boldsymbol{r} \text{ ή } \boldsymbol{a} = \boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{r}$$

$\boldsymbol{R}$: ο πίνακας αυτοσυσχέτισης διάστασης $\boldsymbol{pxp}$ του οποίου το $(\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j})$ στοιχείο είναι το $\boldsymbol{R_x}(\boldsymbol{i}-\boldsymbol{j})$

$\boldsymbol{r}$: διάνυσμα αυτοσυσχέτισης διάστασης $\boldsymbol{px1}$ με στοιχείο $\boldsymbol{i}$ το $\boldsymbol{R_x}(\boldsymbol{i})$

$\boldsymbol{a}$: διάνυσμα διάστασης $px1$ με τους συντελεστές του φίλτρου πρόβλεψης

$\boldsymbol{R_x}$: η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της τυχαίας διαδικασίας $x(n)$. Λύνοντας το παραπάνω σύνολο εξισώσεων ***Yule-Walker***, βρίσκουμε τους βέλτιστους συντελεστές του φίλτρου πρόβλεψης.

Επιπρόσθετα, για να αντιστοιχεί αυτό το στάσιμο σημείο στο ελάχιστο της συνάρτησης αρκεί ο πίνακας $\boldsymbol{R}$ να είναι θετικά ορισμένος.

Οι στοχαστικές ποσότητες που εμφανίζονται στην παραπάνω έκφραση μπορούν να εκτιμηθούν στατιστικά για μια ακολουθία εισόδου $x(n)$ διαστάσεων $1 \times N$ με βάση τις σχέσεις:

$$\hat{R}_x(i) = \frac{1}{N-p}\sum_{n=p+1}^{N} x(n)x(n-i)\,, 1 \le i \le p$$

$$\hat{R}_x(i-j) = \frac{1}{N-p}\sum_{n=p+1}^{N} x(n-j)x(n-i)\,, 1 \le i, j \le p$$

Ο υπολογισμός του φίλτρου πρόβλεψης γίνεται στο πομπό, και στη συνέχεια οι συντελεστές του φίλτρου πρόβλεψης κβαντίζονται και αποστέλλονται στον δέκτη. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειώσουμε πως και ο πομπός θα πρέπει να χρησιμοποιεί τις κβαντισμένες τιμές των συντελεστών του φίλτρου πρόβλεψης έτσι ώστε πομπός και δέκτης να λειτουργούν σε συμφωνία. Για να υπολογίσετε τις κβαντισμένες τιμές των συντελεστών, χρησιμοποιείστε τον ομοιόμορφο κβαντιστή που θα κατασκευάσετε, θέτοντας $N = 8$ bits και δυναμική περιοχή [-2 2].

## 4. Ομοιόμορφος Κβαντιστής

Επιπλέον, καλείστε να υλοποιήσετε έναν ομοιόμορφο κβαντιστή $\boldsymbol{N}$ δυαδικών ψηφίων, δηλαδή $\boldsymbol{2^N}$επιπέδων ο οποίος θα κβαντίσει το σφάλμα πρόβλεψης το οποίο έχει μικρότερη δυναμική περιοχή σε σχέση με το σήμα εισόδου. Ο κβαντιστής συγκεκριμένα θα κβαντίζει κάθε δείγμα του σφάλματος πρόβλεψης ξεχωριστά και θα υλοποιηθεί ως συνάρτηση της MATLAB.

$$\hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{n}) = \boldsymbol{my\_quantizer}(\boldsymbol{y}(\boldsymbol{n}), \boldsymbol{N}, \boldsymbol{min\_value}, \boldsymbol{max\_value})$$

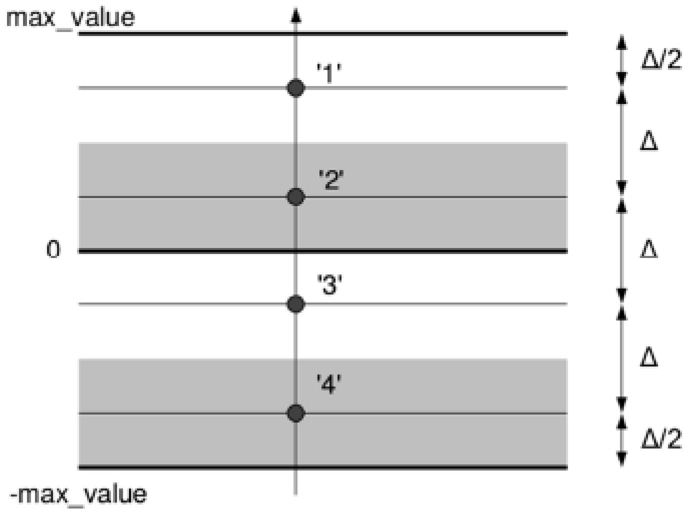
$\boldsymbol{y(n)}$: το τρέχον δείγμα του σφάλματος πρόβλεψης ως είσοδος του κβαντιστή
$\boldsymbol{N}$: ο αριθμός των δυαδικών ψηφίων που θα χρησιμοποιηθούν
$\boldsymbol{max\_value}$: η μέγιστη αποδεκτή τιμή του σφάλματος πρόβλεψης
$\boldsymbol{min\_value}$: η ελάχιστη αποδεκτή τιμή του σφάλματος πρόβλεψης
$\hat{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{n})$: το κβαντισμένο δείγμα του τρέχοντος δείγματος του σφάλματος πρόβλεψης
Τα επίπεδα κβάντισης αναπαρίστανται με τους ακεραίους $1, 2, \ldots, 2^N$όπου το μεγαλύτερο θετικό επίπεδο κβάντισης αντιστοιχεί στον ακέραιο 1. Οι ακέραιοι αυτοί μπορούν να αναπαρασταθούν δυαδικά με $N$ δυαδικά ψηφία.
$\boldsymbol{centers}$: διάνυσμα με τα κέντρα των περιοχών κβάντισης

Ειδικότερα, ο κβαντιστής θα πρέπει να περιορίζει τη δυναμική περιοχή του σφάλματος πρόβλεψης στις τιμές $[min\_value : max\_value]$, θέτοντας τα δείγματα που βρίσκονται εκτός δυναμικής περιοχής στην αντίστοιχη ακραία αποδεκτή τιμή. Στη συνέχεια, ο κβαντιστής υπολογίζει το βήμα κβαντισμού Δ, τα κέντρα της κάθε περιοχής, υπολογίζει σε ποια περιοχή ανήκει το δείγμα εισόδου, και βγάζει ως έξοδο το κωδικοποιημένο δείγμα $\hat{y}(n)$[1] . Το δείγμα

[1] Το κωδικοποιημένο δείγμα στην έξοδο του κβαντιστή θα παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2N , όσες είναι και οι περιοχές κβάντισης. Η κβαντισμένη έκδοση του δείγματος εξόδου θα λαμβάνει την τιμή του κέντρου κβάντισης της περιοχής στην οποία ανήκει το τρέχον δείγμα εισόδου.

αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως δείκτης στο διάνυσμα $centers$ για να πάρουμε το κβαντισμένο δείγμα ως $centers(\hat{y}(n))$.

Ένα παράδειγμα των περιοχών κβάντισης για $N = 2$ bits φαίνεται στο επόμενο σχήμα:




*Σχήμα 2.*

**5. Πηγή Εισόδου**

Η πηγή που καλείστε να κωδικοποιήσετε/αποκωδικοποιήσετε είναι ένα σήμα 20.000 δειγμάτων Τα δείγματα της πηγής με την οποία θα πειραματιστείτε παρουσιάζουν ικανοποιητική «προβλεψιμότητα» δηλαδή ένα τρέχον δείγμα του μπορεί να προβλεφθεί (με τη στατιστική έννοια) με μικρό σφάλμα πρόβλεψης συνδυάζοντας προηγούμενες τιμές του ιδίου σήματος. Τα δείγματα της πηγής με την οποία θα πειραματιστείτε βρίσκονται αποθηκευμένα στο αρχείο με όνομα «`source.mat`». Για να ανακτήσετε τα δεδομένα της πηγής αρκεί να πληκτρολογήσετε:

>> load source.mat

## Ερωτήματα – Μέρος Α

Στα πειράματα που θα εκτελέσετε η δυναμική περιοχή του κβαντιστή να είναι μεταξύ των τιμών

$max\ \_value = 3.5$ , $min\ \_value = -3.5$ .

**1.** Να υλοποιήσετε το παραπάνω σύστημα κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης *DPCM*.

**2. .** Επιλέξτε δύο τιμές του $p \geq 5$ και για $N = 1{,}2{,}3$bits σχεδιάστε στο ίδιο γράφημα το αρχικό σήμα και το σφάλμα πρόβλεψης $y$. Σχολιάστε τα αποτελέσματα. Τί παρατηρείτε;

**3**. Αξιολογείστε την απόδοσή του με γράφημα που να δείχνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα πρόβλεψης ως προς το $N$ και για διάφορες τιμές του $p$. Συγκεκριμένα για πλήθος δυαδικών ψηφίων $N = 1{,}2{,}3$bits τα οποία χρησιμοποιεί ο ομοιόμορφος κβαντιστής για την κωδικοποίηση του σήματος πρόβλεψης και για τάξη προβλέπτη $p = 5{:}\ 10$. Επιπλέον, για κάθε $p$ καταγράψτε στην αναφορά σας και σχολιάστε τις τιμές των συντελεστών του προβλέπτη.

**4**. Για $N = 1{,}2{,}3$ bits να απεικονίσετε το αρχικό και το ανακατασκευασμένο σήμα στο δέκτη για $p = 5{,}10$ που επιλέξατε και να σχολιάσετε τα αποτελέσματα της ανακατασκευής σε σχέση με τα bits κβάντισης.

Χωρίστε τα δείγματα της πηγής εισόδου σε ισομεγέθη μη επικαλυπτόμενα υποσύνολα των 5000 δειγμάτων. Επαναλάβετε τα παραπάνω ερωτήματα για κάθε ένα από τα υποσύνολα. Σχολιάστε τα αποτελέσματα που λάβατε στα υποσύνολα των 5000 δειγμάτων και συγκρίνετε με αυτά των 20000 δειγμάτων. Τι παρατηρείτε;

***Παρατηρήσεις***

- Η αναφορά παραδίδεται ηλεκτρονικά **μόνο μέσω e-class**. Στο τέλος της αναφοράς, παραθέστε τον κώδικα που υλοποιήσατε. Το αρχείο της αναφοράς θα πρέπει να είναι σε μορφή pdf και να έχει ως όνομα τον αριθμό μητρώου σας. Για παράδειγμα αν η άσκηση έχει γίνει από τον φοιτητή με ΑΜ 1234 θα πρέπει το αρχείο να έχει όνομα 1234.pdf. Το αρχείο θα το ανεβάσετε στην ενότητα "εργασίες" του μαθήματος στο e-class.

- Φροντίστε να διαπιστώσετε ότι η άσκηση σας έχει υποβληθεί σωστά στο e-class. Δεν θα γίνουν δεκτές ασκήσεις αργότερα με την δικαιολογία ότι την υποβάλλατε αλλά για κάποιο λόγο η άσκηση δεν υπάρχει στο e-class.

- Η άσκηση είναι ατομική και υποχρεωτική.

- Η παράδοση της άσκησης μπορεί να γίνει μέχρι 15/01/2024.

- Τυχόν απορίες σχετικά με την άσκηση θα λύνονται μέσω του forum του μαθήματος στο eclass. Επιπλέον, θα πραγματοποιούνται ώρες γραφείου ηλεκτρονικά. Οι ώρες «ηλεκτρονικού γραφείου» καθώς και ο σύνδεσμος θα ανακοινωθούν προσεχώς.