



Αρχές Ψηφιακής Τηλεόρασης ***Ενότητα 6 – Κωδικοποίηση καναλιού***

Καθηγητής Δρ. Ευάγγελος Πάλλης
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Περιεχόμενα

- Σύνοψη και μαθησιακά αποτελέσματα/στόχοι
- Εισαγωγή στην Ενότητα 6
- Τυχαιοποίηση - διασπορά ενέργειας
 - Βαθμίδα τυχαιοποίησης
- Εξωτερική κωδικοποίηση (Outer Coding)
 - Κωδικοποίηση
 - Αποκωδικοποίηση
- Εξωτερική διεμπλοκή (Outer Interleaving)
 - Ριπές σφαλμάτων
 - Εξωτερική διεμπλοκή
 - Εξωτερική απεμπλοκή
 - Παράδειγμα διεμπλοκής - απεμπλοκής
- Εσωτερική κωδικοποίηση (Inner Coding)
 - Εσωτερική κωδικοποίηση
 - Παράδειγμα συνελκτικού κωδικοποιητή
 - Συνελκτικός κωδικοποιητής προτύπου του ETSI
 - Διάτρηση
- Εσωτερική διεμπλοκή (Inner Interleaving)
 - Αντιστοίχιση bits σε επιμέρους ροές
- Παραδείγματα
 - Βαθμίδα τυχαιοποίησης
 - Χρήση κώδικα για κωδικοποίηση RS
 - Δημιουργία μοντέλου για υλοποίηση RS

Περιγραφή Ενότητας 6

Σύνοψη

Στην Ενότητα 6 εξετάζουμε τις διαδικασίες και τους μηχανισμούς της κωδικοποίησης καναλιού (channel coding). Η κωδικοποίηση καναλιού λαμβάνει χώρα πριν τη μετάδοση και στοχεύει στην ενίσχυση του σήματος με πλεονάζουσα πληροφορία η οποία χρησιμοποιείται από τον δέκτη για τον εντοπισμό και τη διόρθωση τυχόν σφαλμάτων. Η ύπαρξη της πλεονάζουσας πληροφορίας αυξάνει αναπόφευκτα το σύνολο της πληροφορίας κατά ένα ελέγξιμο ποσοστό. Η κωδικοποίηση καναλιού διακρίνεται σε πέντε βασικά στάδια και υπάρχουν οι αντίστοιχες βαθμίδες στην πλευρά του πομπού: τη διασπορά ενέργειας (τυχαιοποίηση των δεδομένων), την εξωτερική κωδικοποίηση, την εξωτερική διεμπλοκή, την εσωτερική κωδικοποίηση και την εσωτερική διεμπλοκή. Η αντίστροφη λειτουργικότητα βρίσκεται από την πλευρά του δέκτη. Οι όροι διεμπλοκή και απεμπλοκή παραπέμπουν σε μια αντιμετάθεση συμβόλων ή bits με τέτοιο τρόπο ώστε να μετριάζεται το αποτέλεσμα συνεχόμενων σφαλμάτων (π.χ. μιας ριπής σφαλμάτων) και βέβαια να είναι δυνατή η επανατοποθέτηση των συμβόλων ή των bits στον δέκτη, ώστε να γίνεται διαθέσιμη η ροή στην αρχική της μορφή.

Στην Ενότητα αυτή μελετάμε τους σχετικούς μηχανισμούς, δείχνουμε την αναγκαιότητά τους και τα οφέλη που παρέχουν και γίνεται επεξήγηση αυτών των μηχανισμών με τη χρήση παραδειγμάτων, ώστε να γίνει πιο εύκολη η κατανόηση και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων..

Προαπαιτούμενη γνώση

Η Ενότητα 6 είναι σε μεγάλο βαθμό αυτόνομη, αφού δεν εξετάζουμε τα δεδομένα τα οποία κωδικοποιούνται από τους χρησιμοποιούμενους μηχανισμούς. Επιπλέον η διεπαφή με το επόμενο σύνολο βαθμίδων το οποίο έχει να κάνει με τη μετάδοση (βλ. Ενότητα 7) , καθορίζεται με σαφήνεια και δεν επηρεάζει τους μηχανισμούς της κωδικοποίησης καναλιού. Ενδείκνυται, βέβαια, να υπάρχουν πρότερες γνώσεις αναφορικά με τους συρμούς μεταφοράς που δίνουν την είσοδο στις βαθμίδες της κωδικοποίησης καναλιού (βλ. Ενότητα 5), και οι βασικές γνώσεις στην περιοχή των μηχανισμών εντοπισμού και διόρθωσης σφαλμάτων.

Μαθησιακά αποτελέσματα

Με την επιτυχή ολοκλήρωση της Ενότητας 6 ο φοιτητής / τρια θα είναι σε θέση να:

- Κατανοεί τον τρόπο λειτουργίας και οργάνωσης των μηχανισμών κωδικοποίησης καναλιού στα τηλεοπτικά συστήματα και τη χρήση τους για προληπτική διόρθωση σφαλμάτων, με στόχο την εύρωστη εκπομπή και λήψη πληροφοριών εικόνας και ήχου.
- Γνωρίζει τις βασικές αρχές κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης των δεδομένων με κώδικες μπλοκ και συνελκτικούς κώδικες, την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων, καθώς και τους μηχανισμούς προστασίας των δεδομένων με τεχνικές εξωτερικής και εσωτερικής διεμπλοκής.
- Εφαρμόζει μεθόδους και εργαλεία ανάλυσης της κωδικοποίησης καναλιού, εντοπισμού σφαλμάτων, καθώς και τεχνικές διόρθωσης των λαθών.
- Αναλύει και υπολογίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των μηχανισμών κωδικοποίησης καναλιού, και των τεχνικών προληπτικής διόρθωσης των σφαλμάτων με βάση το πρότυπο DVB.
- Προτείνει λύσεις σε θέματα λειτουργίας και συντήρησης των μονάδων κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης του καναλιού, και τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης των σφαλμάτων.

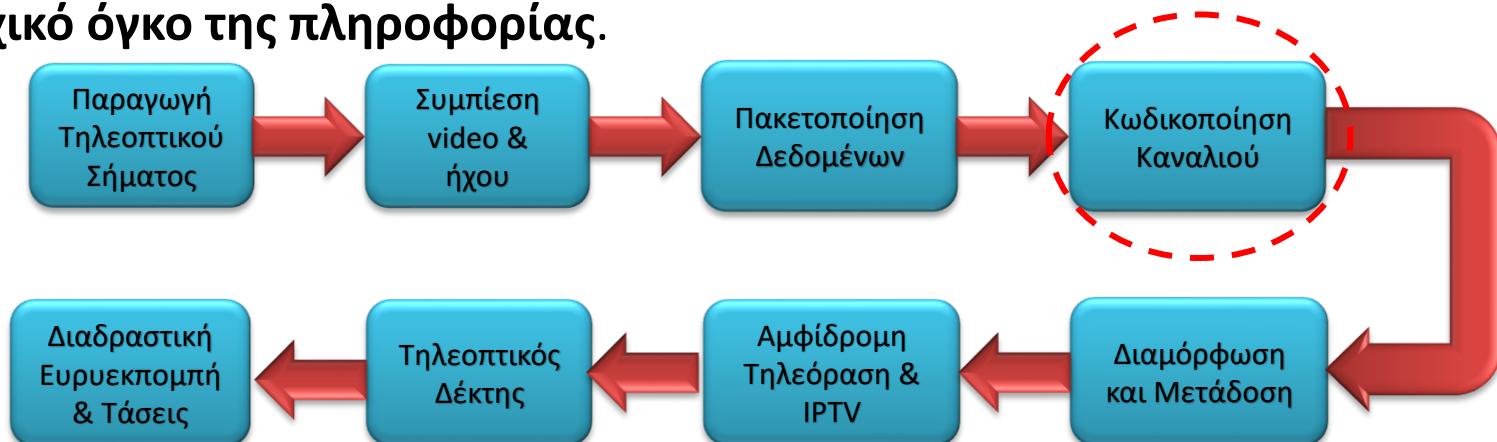
Εισαγωγή

Εισαγωγή στην Ενότητα 6

Με τον όρο κωδικοποίηση καναλιού αναφερόμαστε στην εισαγωγή (πριν τη μετάδοση) πλεονάζουσας πληροφορίας, η οποία χρησιμοποιείται στον δέκτη για να εντοπίσει (και εάν είναι δυνατόν να διορθώσει) σφάλματα τα οποία έχουν συμβεί κατά τη μετάδοση (ή την οποιαδήποτε επεξεργασία).

Ο στόχος είναι να αυξήσουμε την αξιοπιστία του συστήματος και να βελτιώσουμε την ποιότητα του αναπαραγόμενου υλικού στον δέκτη (μέσω της μείωσης των σφαλμάτων που αναπόφευκτα έχουν προκύψει κατά τη μετάδοση).

Λόγω της εισαγωγής της πλεονάζουσας πληροφορίας, η διαδικασία της κωδικοποίησης καναλιού αυξάνει τον όγκο των δεδομένων σε σχέση με τον αρχικό όγκο της πληροφορίας.



Εισαγωγή στην Ενότητα 6

Οι λειτουργίες της κωδικοποίησης καναλιού εντάσσονται στη λογική της **προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων** (Forward Error Correction, FEC).

Τέτοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου είναι πιθανή η εμφάνιση σφαλμάτων, είτε εμπλέκεται μετάδοση της πληροφορίας είτε όχι. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση της αποθήκευσης της πληροφορίας.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η αλληλουχία των ενεργειών κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης καναλιού.



Εισαγωγή στην Ενότητα 6

Οι μηχανισμοί προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων χρησιμοποιούνται εκτενώς για τη μετάδοση αλλά και την αποθήκευση δεδομένων. Ο πιο γνωστός μηχανισμός προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων είναι ο **έλεγχος ισοτιμίας** (parity check).

- Κατά τον έλεγχο ισοτιμίας προστίθεται ένα bit ισοτιμίας ώστε να θέτουμε το συνολικό πλήθος των bits της λέξης ως περιττό ή άρτιο αριθμό. Αν το συνολικό πλήθος των bits με τιμή 1, είναι περιττό μιλάμε για περιττή ισοτιμία, ενώ αν είναι άρτιο μιλάμε για άρτια ισοτιμία (odd και even parity αντίστοιχα). Το είδος της ισοτιμίας συμφωνείται εκ των προτέρων μεταξύ του πομπού και του δέκτη (ή εν γένει του αποστολέα και του παραλήπτη).

Είναι σαφές ότι ο μηχανισμός αυτός είναι πολύ απλός και μπορεί να εντοπίσει **περιττό αριθμό σφαλμάτων**, αφού στην περίπτωση του ζυγού αριθμού σφαλμάτων αυτά αλληλοαναιρούνται. Παρόλο που σήμερα ο έλεγχος ισοτιμίας χρησιμοποιείται για λόγους συμβατότητας μπορεί να μας δώσει το γενικό πλαίσιο λειτουργίας των μηχανισμών προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων.

Εισαγωγή στην Ενότητα 6

Άλλο ένα εξίσου απλό παράδειγμα τέτοιου μηχανισμού είναι η αποστολή της ίδιας πληροφορίας περισσότερες από μία φορές.

- Για παράδειγμα, κάθε bit μπορεί να αποστέλλεται τρεις φορές αντί για μία. Ο δέκτης αποφασίζει την τιμή 0 ή 1 κατά πλειοψηφία. Στην περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται (εντοπίζεται και διορθώνεται) η ύπαρξη ενός μόνο σφάλματος. Από την άλλη, βέβαια, αυξάνεται δραματικά ο όγκος των δεδομένων (στο παράδειγμά μας, τριπλασιάζεται).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μια μέθοδος προστασίας από σφάλματα με τον τριπλασιασμό των δεδομένων. Παρατήρηση: στην περίπτωση δύο σφαλμάτων, ο αλγόριθμος δεν δύναται να τα αντιμετωπίσει (θεωρεί, δηλαδή, ότι έχει σταλεί διαφορετική τιμή).

Τιμή προς αποστολή	Κωδικοποιημένο bit προς αποστολή	Διάυλος	Λαμβανόμενη πληροφορία	Μεταφραζόμενη πληροφορία
0	000	Κανένα σφάλμα	000	0
		Ένα σφάλμα	001	0
		Ένα σφάλμα	010	0
		Ένα σφάλμα	100	0
1	111	Κανένα σφάλμα	111	1
		Ένα σφάλμα	110	1
		Ένα σφάλμα	101	1
		Ένα σφάλμα	011	1

Προστασία δεδομένων με τριπλασιασμό δεδομένων και αντιμετώπιση σφαλμάτων

Εισαγωγή στην Ενότητα 6

Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται στην κωδικοποίηση καναλιού διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα κυρίως με το τμήμα της πληροφορίας όπου εφαρμόζονται, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο προστίθεται η πλεονάζουσα πληροφορία:

- **Κώδικες μπλοκ** (block code)
- **Συνελικτικοί κώδικες** (convolutional code)

Η σημαντικότερες διαφορές μεταξύ αυτών των κατηγοριών είναι:

- Οι κώδικες μπλοκ χωρίζουν την πληροφορία σε **τμήματα, συγκεκριμένου μεγέθους** (μπλοκ), στα οποία γίνεται η κωδικοποίηση για να ληφθούν οι αντίστοιχες κωδικές λέξεις (κωδικολέξη). Στους συνελικτικούς κώδικες η κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση λαμβάνουν χώρα στη **συνολική ροή** (συνήθως σε επίπεδο bit).
- Οι συνελικτικοί κωδικοποιητές έχουν κατάσταση (άρα μνήμη), πράγμα που συνεπάγεται ότι η έξοδος δεν **εξαρτάται** μόνο από την τιμή της εισόδου τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή αλλά και από αντίστοιχες τιμές σε προηγούμενο χρόνο. Αυτό δεν συμβαίνει στους κώδικες τύπου μπλοκ, όπου κάθε κωδικολέξη είναι **ανεξάρτητη** από την προηγούμενη και την επόμενη.

Κριτήριο	Κωδικοποίηση Τμήματος Δεδομένων (blockcode)	Συνελικτική κωδικοποίηση (Convolutional code)
Δεδομένα στα οποία εφαρμόζεται	Τα δεδομένα που ανήκουν στο τρέχον μπλοκ (τμήμα), χωρίς συσχέτιση με προηγούμενα δεδομένα	Τρέχοντα δεδομένα της ροής καθώς αυτά εισέρχονται στον κωδικοποιητή
Μνήμη	Όχι (κάθε μπλοκ πληροφορίας κωδικοποιείται ανεξάρτητα)	Ναι (η κωδικοποίηση των δεδομένων συνήθως εξαρτάται και από τα προηγούμενα δεδομένα)
Συμπεριφορά στις ριπές σφαλμάτων	Μη ικανοποιητική	Μη ικανοποιητική

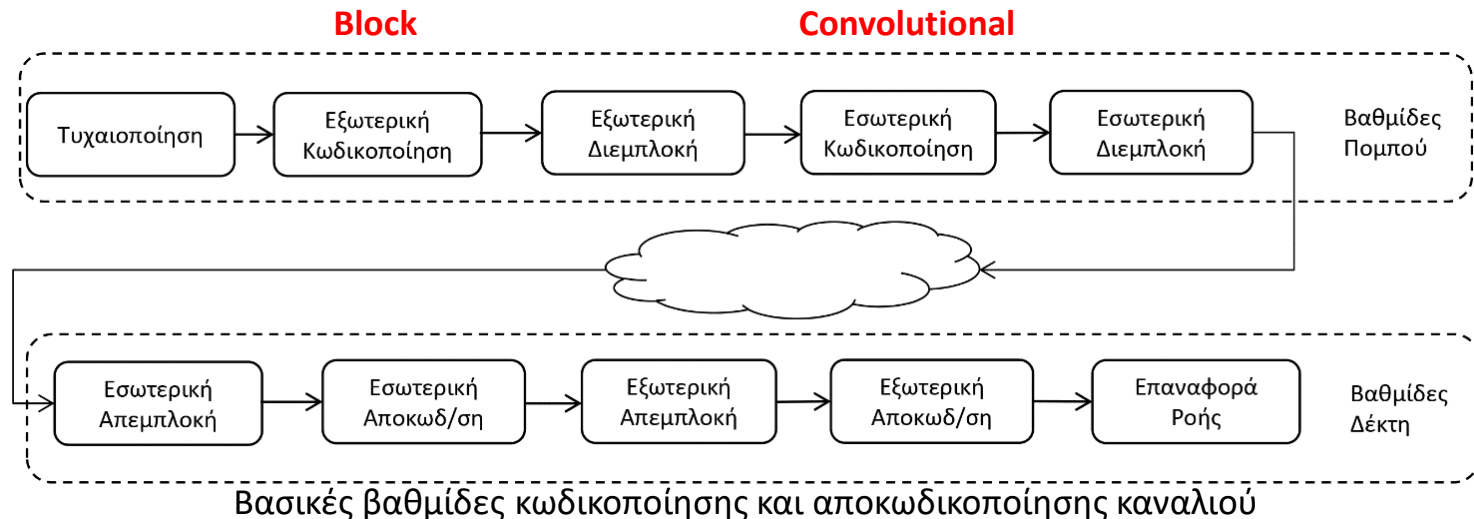
Σύγκριση χαρακτηριστικών, κωδικοποίηση τμήματος δεδομένων και συνελικτικής κωδικοποίησης

Εισαγωγή στην Ενότητα 6

Η απόδοση και των δύο τύπων κωδικοποίησης επηρεάζεται στην περίπτωση που έχουμε ριπές θορύβου.

Για την αντιμετώπιση των ριπών θορύβου λαμβάνει χώρα ένα ανακάτεμα, αντιμετάθεση ή αλλιώς **διεμπλοκή** (interleaving) της πληροφορίας, πριν την αποστολή. Η πληροφορία επανέρχεται στη σωστή σειρά στον αποκωδικοποιητή με τη διαδικασία που ονομάζουμε **απεμπλοκή** (de-interleaving).

- Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, στην περίπτωση της ψηφιακής τηλεόρασης χρησιμοποιούνται και οι δύο τύποι κωδικοποίησης (αρχικά κωδικοποίηση **μπλοκ** και στην συνέχεια **συνελικτικοί κώδικες**), διαδοχικά. Κατά την αποκωδικοποίηση στον δέκτη λαμβάνουν χώρα οι αντίστροφες διαδικασίες.



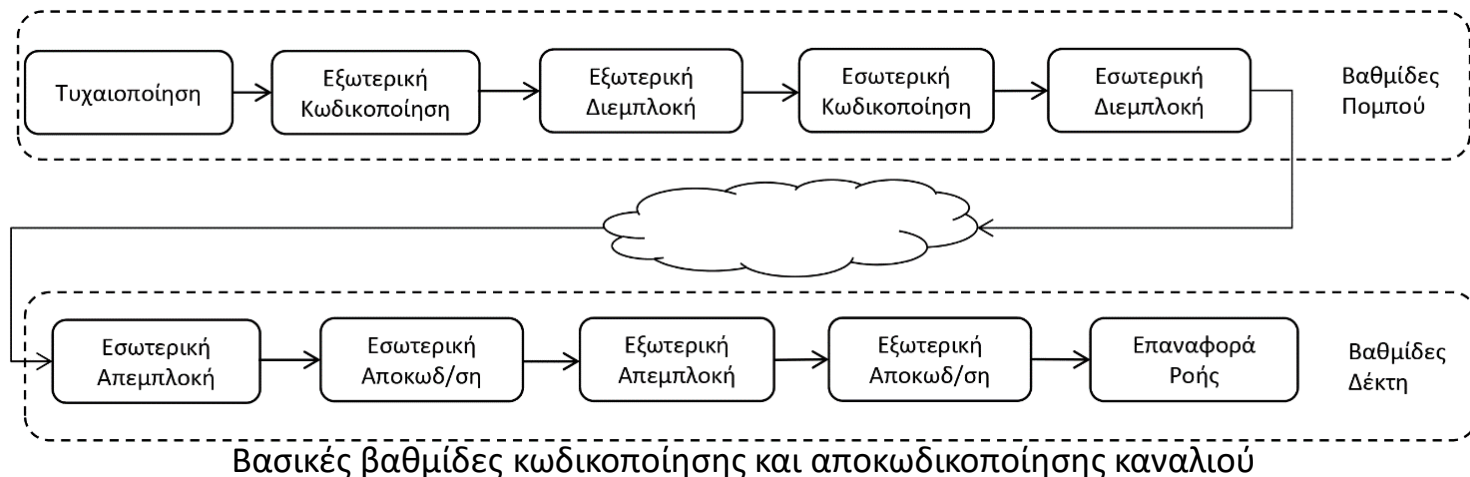
Εισαγωγή στην Ενότητα 6

Πομπός:

- (α) τυχαιοποίηση (randomization) των δεδομένων (η οποία επιτυγχάνει διασπορά της ενέργειας),
- (β) εξωτερική κωδικοποίηση,
- (γ) εξωτερική διεμπλοκή,
- (δ) εσωτερική κωδικοποίηση και
- (ε) εσωτερική διεμπλοκή.

Δέκτης:

- (α) την εσωτερική απεμπλοκή,
- (β) την εσωτερική αποκωδικοποίηση,
- (γ) την εξωτερική απεμπλοκή,
- (δ) την εξωτερική αποκωδικοποίηση και
- (ε) την επαναφορά της ροής



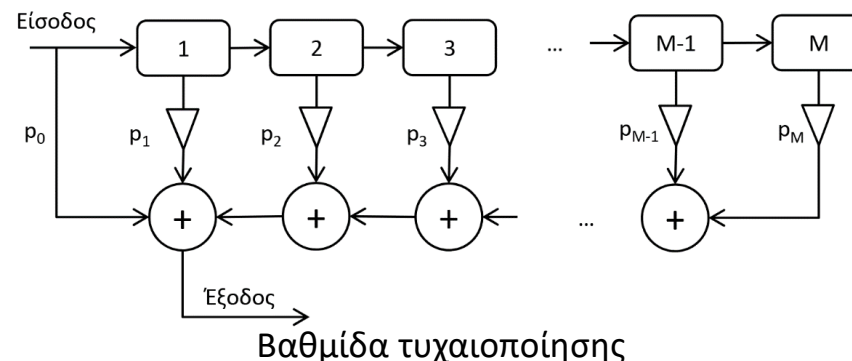
Τυχαιοποίηση - διασπορά ενέργειας

Βαθμίδα τυχαιοποίησης

Η πρώτη βαθμίδα του μηχανισμού της κωδικοποίησης καναλιού έχει να κάνει με τη **διασπορά της ενέργειας** στα δυαδικά δεδομένα.

Η διασπορά της ενέργειας συνίσταται στην αποφυγή μεγάλου συνεχόμενου πλήθους από μηδέν “0” ή ένα “1” στα δεδομένα (ροή bits), πράγμα που ισοδυναμεί με την **τυχαιοποίηση** της σειράς (scrambling) των δεδομένων (δηλ. την εισαγωγή κάποιας τυχειότητας στα δεδομένα).

- Η διασπορά της ενέργειας επιτυγχάνεται με βαθμίδα τυχαιοποίησης η οποία εφαρμόζεται στη ροή από bits, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



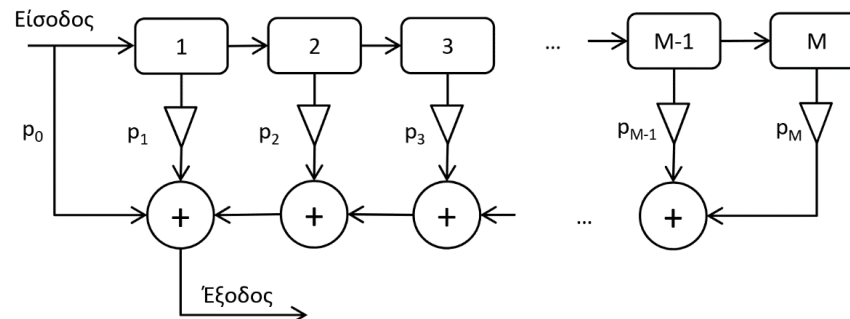
Βαθμίδα τυχαιοποίησης

Η βαθμίδα τυχαιοποίησης αποτελείται από μια σειρά **M καταχωρητών**, αθροιστών και πολλαπλασιαστών. Η βάση υπολογισμού της βαθμίδας είναι N και οι τιμές της εισόδου κυμαίνονται στο διάστημα [0, N-1]. Σε αυτήν την περίπτωση οι αθροιστές έχουν βάση το N (είναι δηλαδή αθροιστές modulo N). Οι συντελεστές p_0, p_1, \dots, p_{M-1} και p_M καθορίζουν ποιες από τις τιμές των καταχωρητών λαμβάνονται υπόψη στα αθροίσματα.

Το άθροισμα, δηλαδή, καθορίζεται από το αντίστοιχο **πολυώνυμο γεννήτορα**, το οποίο ορίζεται με χρήση των ανωτέρω συντελεστών:

$$p_0 + p_1 z^{-1} + \dots + p_{M-1} z^{M-1} + p_M z^{-M} \quad (1)$$

Καθώς εισέρχεται το σήμα εισόδου στη βαθμίδα, το περιεχόμενο των καταχωρητών μετατοπίζεται προς τα δεξιά και γίνονται οι αντίστοιχοι υπολογισμοί της εξόδου. Άλλη μία παράμετρος η οποία έχει σημασία στους σχετικούς υπολογισμούς είναι η αρχική κατάσταση των καταχωρητών.

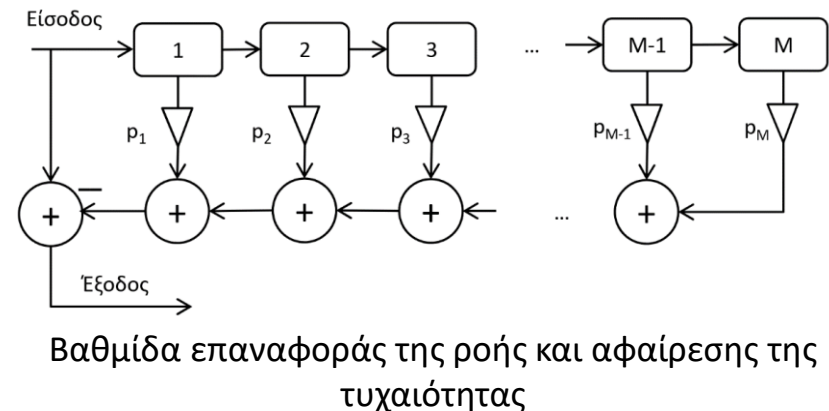
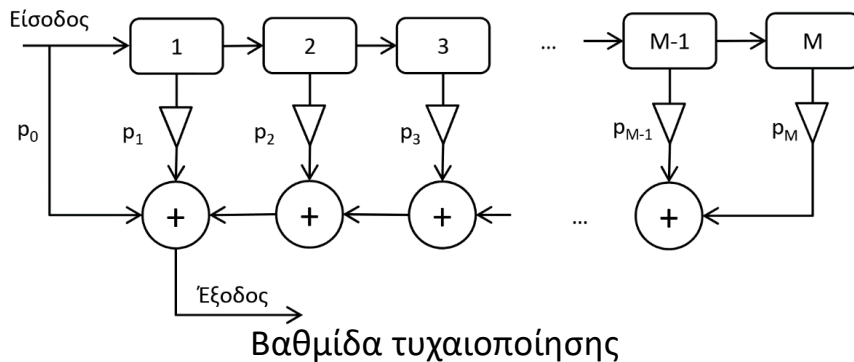


Βαθμίδα τυχαιοποίησης

Βαθμίδα τυχαιοποίησης

Η αντίστροφη διαδικασία γίνεται στον δέκτη στη βαθμίδα επαναφοράς της ροής (descrambler) ώστε να επανακτηθεί η αρχική ροή.

Στη διαδικασία που ακολουθείται (βλ. το παρακάτω σχήμα στα δεξιά), παρατηρούμε την ομοιότητα των δύο βαθμίδων με σημείο διαφοροποίησης τη μετατροπή του αθροίσματος σε **διαφορά**.



Βαθμίδα τυχαιοποίησης

Στην περίπτωση της ψηφιακής τηλεόρασης, η είσοδος του συστήματος κωδικοποίησης καναλιού είναι ο **Συρμός Μεταφοράς** (MPEG2 Transport Stream, MPEG2-TS).

- Τα πακέτα του συρμού, όπως είδαμε στην Ενότητα 5, είναι σταθερού μήκους, συγκεκριμένα 188 Bytes. Το **πρώτο Byte** κάθε πακέτου είναι το Byte συγχρονισμού και έχει την **τιμή 0x47**.

Η βαθμίδα τυχαιοποίησης (scrambler) αποτελείται από μια ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία των 16-bit (**Pseudo Random Binary Sequence, PRBS**) με ένα πολυώνυμο γεννήτορα 15^{ου} βαθμού με τους επόμενους συντελεστές:

$$\left. \begin{array}{l} p_0=1 \\ p_{14}=1 \\ p_{15}=1 \end{array} \right\} \quad (2)$$

Βαθμίδα τυχαιοποίησης

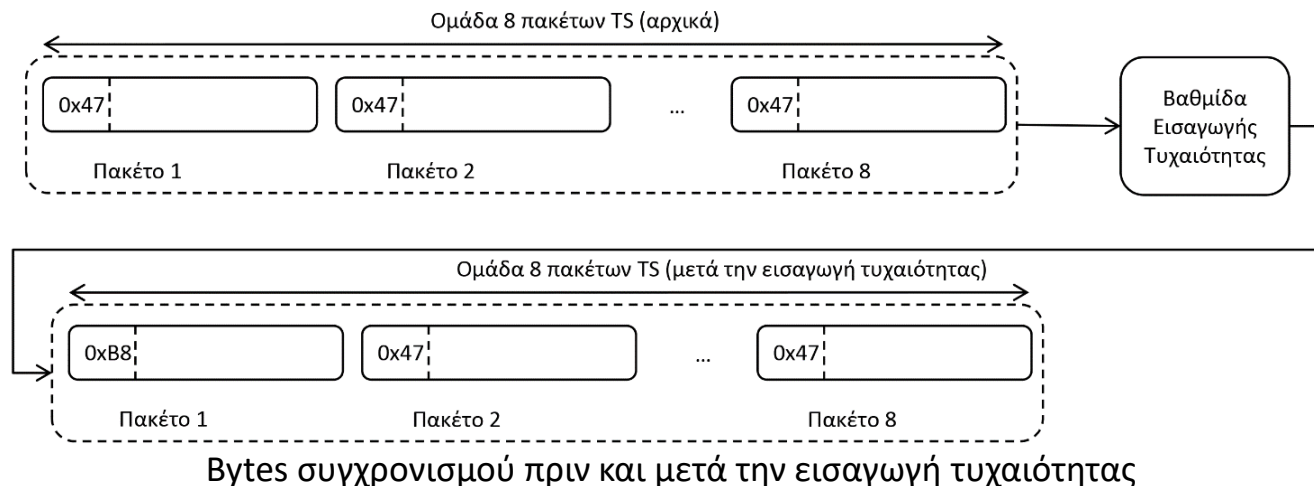
Στον καταχωρητή PRBS φορτώνεται η αρχική ακολουθία «1001010 1000 0000» και αρχικοποιείται εκ νέου με την έναρξη κάθε ομάδας 8 πακέτων MPEG2-TS.

Η τιμή του πρώτου Byte συγχρονισμού στην ομάδα των 8 πακέτων αντιστρέφεται δυαδικά (χωρίς, δηλαδή, να επηρεάζεται από τη λειτουργία της βαθμίδας) **από 0x47 σε 0xB8**. Η συγκεκριμένη αυτή τιμή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των τυχαιοποιημένων ομάδων πακέτων.

- Η δυαδική αντιστροφή του Byte συγχρονισμού απεικονίζεται παρακάτω:

$$0x47 = 0100\ 0111_{<2>} \rightarrow 10111000_{<2>} = 0xB8 \quad (3)$$

Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη τιμή (0xB8) **επαναλαμβάνεται** περιοδικά μετά από **8 TS πακέτα**, δηλαδή μετά από $8 \times 188 - 1 = 1.503$ Bytes.



Εξωτερική κωδικοποίηση – outer coding

Εξωτερική κωδικοποίηση

Η προληπτική διόρθωση σφαλμάτων (Forward Error Correction) με την προσθήκη πλεονάζουσας πληροφορίας στο σήμα από τον πομπό, δίνει τη δυνατότητα στον δέκτη να εντοπίσει και να διορθώσει σφάλματα τα οποία έχουν συμβεί κατά τη μετάδοση.

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη κωδικοποίηση FEC είναι η Reed Solomon, αφού ισορροπεί αρμονικά ανάμεσα στην απόδοση και στην πολυπλοκότητα.

- Η μεν **απόδοση** σχετίζεται με το πλήθος της πλεονάζουσας πληροφορίας που απαιτείται (και η οποία συνεπάγεται την αύξηση του όγκου), η δε **πολυπλοκότητα** σχετίζεται με τη δυσκολία στην κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση.

Η κωδικοποίηση Reed Solomon χρησιμοποιείται στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση (DVB-T, ATSC) και γίνεται (κυρίως) με τη χρήση hardware για καλύτερη απόδοση.

Εξωτερική κωδικοποίηση

Η κωδικοποίηση **Reed Solomon** είναι κωδικοποίηση τύπου **μπλοκ**, όπου η πληροφορία χωρίζεται σε τμήματα συγκεκριμένου μήκους. Σε κάθε ένα από αυτά τα τμήματα προστίθεται ένα τμήμα προστασίας (parity information) και αυτό μαζί με την αρχική πληροφορία σχηματίζει ένα νέο μπλοκ το οποίο αποστέλλεται και κωδικοποιείται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα.

Στην περίπτωση που η αρχική πληροφορία δεν υφίσταται κάποια αλλαγή στο νέο ενισχυμένο μπλοκ, δηλαδή απλώς προστίθεται το τμήμα των δεδομένων που αφορά τον εντοπισμό και τη διόρθωση των σφαλμάτων είτε στο αρχικό τμήμα του μπλοκ είτε στο τέλος αυτού, τότε ο κώδικας ονομάζεται **συστηματικός**. Αυτό σημαίνει ότι (πέρα από τον έλεγχο και τη διόρθωση των τυχόν σφαλμάτων) κατά την αποκωδικοποίηση το πλεονάζον αυτό τμήμα πληροφορίας αφαιρείται.

- Ο αλγόριθμος **Reed Solomon** είναι **συστηματικός**.
- Ο **RS** είναι **επιπλέον γραμμικός**, δηλαδή η προσθήκη δύο κωδικών λέξεων τμημάτων δημιουργεί μια νέα κωδική λέξη.
- Επίσης ο **RS** είναι **κυκλικός**, με την έννοια ότι αν γίνει κυκλική μετατόπιση των συμβόλων η λέξη που θα προκύψει θα είναι επίσης μια κωδική λέξη.
- Η κωδικοποίηση RS ανήκει στην οικογένεια κωδικοποιήσεων Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH), και διακρίνεται γιατί έχει σύμβολα των πολλαπλών bit, πράγμα που τον κάνει **ιδιαίτερα αποδοτικό στο να διαχειρίζεται λάθη ριπής (burst errors)**, διότι, παρόλο που ένα σύμβολο μπορεί να έχει όλα τα bit λάθος, αυτό προσμετράται μόνο ως ένα λανθασμένο σύμβολο στα πλαίσια των δυνατοτήτων διόρθωσης του κώδικα.

Αν σε μια κωδική λέξη έστω και ένα από τα περιεχόμενα bits είναι εσφαλμένα, αυτό λογίζεται ως μια εσφαλμένη κωδική λέξη.

Εξωτερική κωδικοποίηση

Ορισμοί

Λέμε ότι μια κωδικοποίηση Reed Solomon (RS) έχει χαρακτηριστικά (n, k) όπου:

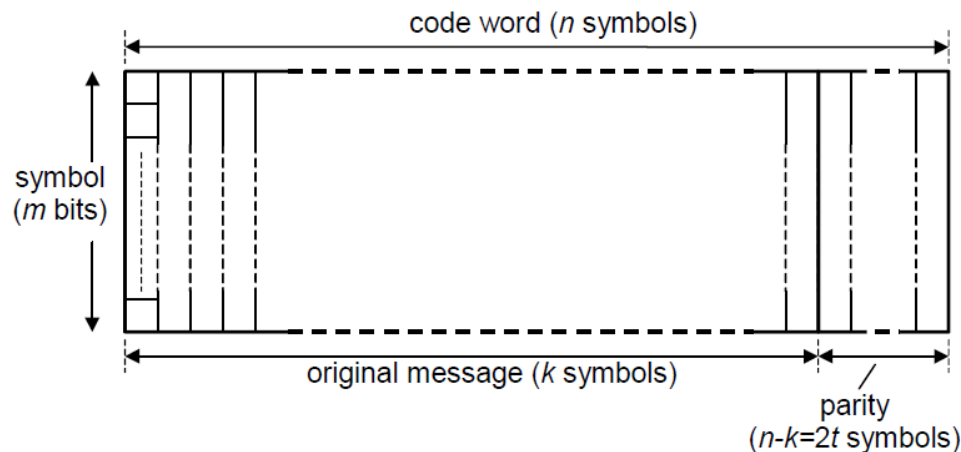
- n : το μήκος κωδικής λέξης (codeword), η οποία συμπεριλαμβάνει την αρχική πληροφορία αλλά και την πλεονάζουσα.
- k : πλήθος συμβόλων πληροφορίας στη κωδική λέξη.
- m : πλήθος bits σε ένα σύμβολο πληροφορίας.

Εν γένει πρέπει να ισχύει:

$$n \leq 2^m - 1 \quad (4)$$

Με βάση τα παραπάνω εκ του συνόλου των συμβόλων (n) σε μία κωδική λέξη, τα k είναι ωφέλιμα (αντιστοιχούν, δηλαδή, στην πληροφορία).

- Άρα το πλήθος των συμβόλων διόρθωσης σφαλμάτων (parity) είναι $n-k$.



Εξωτερική κωδικοποίηση

Το πλήθος των εσφαλμένων συμβόλων τα οποία μπορούν να διορθωθούν είναι t όπου δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$t = \begin{cases} \frac{n-k}{2} \\ \frac{n-k-1}{2} \end{cases} \quad (5)$$

Το πρώτο σκέλος της εξίσωσης ισχύει στην περίπτωση που η διαφορά $n-k$ είναι ζυγός αριθμός, ενώ το δεύτερο στην περίπτωση που η διαφορά είναι περιττός αριθμός.

Εξωτερική κωδικοποίηση

Ο κώδικας Reed Solomon βασίζεται σε μια εξειδικευμένη περιοχή των μαθηματικών γνωστή ως πεδία Galois (Galois fields) ή κλειστά σύνολα.

- Ένα κλειστό σύνολο έχει την ιδιότητα ότι όλες οι αριθμητικές πράξεις (πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμός και διαίρεση) στα στοιχεία του συνόλου δίνουν αποτέλεσμα μέσα στο σύνολο.

Η λογική του αλγορίθμου είναι (συνοπτικά) η εξής:

- Γνωρίζουμε ότι K σημεία ορίζουν ένα πολυώνυμο (μιας μεταβλητής) μεγίστου βαθμού $K-1$. Ο αποστολέας ορίζει ένα πολυώνυμο βαθμού $K-1$, από ένα πεπερασμένο σύνολο πολυωνύμων.
- Στη συνέχεια γίνεται υπερδειγματοληψία: Το πολυώνυμο κωδικοποιείται από την αποτίμηση τιμών σε διάφορα σημεία, περισσότερα από αυτά που είναι απαραίτητα για να καθοριστεί ποιο είναι αυτό το πολυώνυμο.
- Οι τιμές αυτές, οι οποίες είναι περισσότερες από K , αποστέλλονται από τον πομπό στον δέκτη, και αποτελούν την πλεονάζουσα πληροφορία η οποία προστίθεται από τον αλγόριθμο RS.
- Κατά τη μετάδοση ενδεχομένως γίνονται λάθη τα οποία μπορεί να αφορούν τον κύριο όγκο των δεδομένων (το αρχικό δηλαδή μήνυμα) ή και στα πλεονάζοντα δεδομένα.
- Εάν έχουν αποσταλεί αρκετές τιμές, ο δέκτης μπορεί να συμπεράνει το πολυώνυμο και να εξαγάγει τις αρχικές τιμές, διορθώνοντας έτσι τα σφάλματα που έλαβαν χώρα.

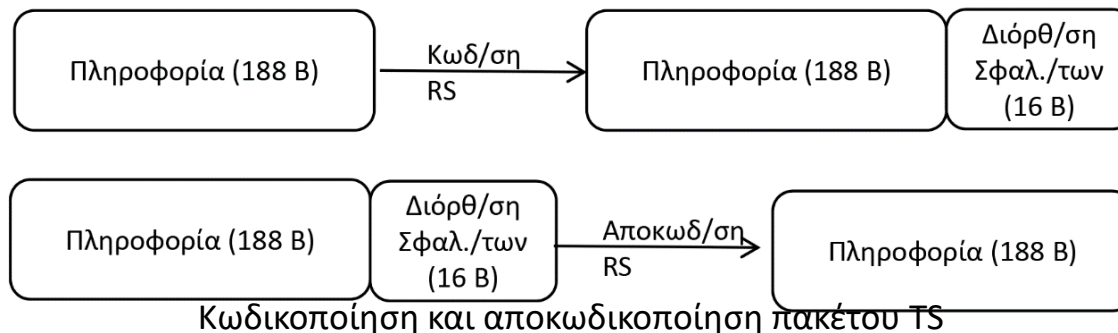
Εξωτερική κωδικοποίηση

Το πρότυπο που καθορίζει την κωδικοποίηση καναλιού στο DVB-T έχει ορίσει συγκεκριμένες τιμές για τις παραμέτρους που είδαμε στην προηγούμενη διαφάνεια.

- Συγκεκριμένα, η πληροφορία αποτελείται από 188 Bytes, στα οποία προστίθενται τα 16 Bytes για τη διόρθωση σφαλμάτων. Αυτό σημαίνει ότι το πλήθος των σφαλμάτων που είναι δυνατόν να διορθωθούν είναι 8 Bytes.
- Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαδικασία κατά την εκπομπή (πάνω διάγραμμα) και κατά την λήψη (κάτω διάγραμμα).

Στην περίπτωση του DVB, στο πακέτο του Συρμού Μεταφοράς των 188 Bytes προηγούνται 51 Bytes τα οποία δεν έχουν πληροφορία (Null Bytes), δημιουργώντας ένα σύνολο 239 Bytes. **Σε αυτό το σύνολο των 239 Bytes είναι που υπολογίζεται ο κώδικας Reed Solomon των 16 Bytes.** Το επιπλέον 51 Bytes δεν αποστέλλονται και αφού η τιμή τους είναι γνωστή μπορούν να δημιουργηθούν εκ νέου στον δέκτη. Αυτό σημαίνει ότι ο κώδικας RS στην πράξη υπολογίζεται για τα υπόλοιπα 188 Bytes. Η επιλογή των παραμέτρων εκ μέρους του DVB-T έγινε για συμβατότητα με τις επιλογές που είχαν γίνει από το DVB-S (ψηφιακή μετάδοση σε δορυφορικά συστήματα).

Η πιθανότητα ενός λάθους στα κωδικοποιημένα δεδομένα είναι (συχνά) πολύ χαμηλότερη σε σχέση με την πιθανότητα λάθους στην περίπτωση μη χρήσης αυτής. Αυτό είναι στην ουσία το κέρδος της κωδικοποίησης.



Εξωτερική αποκωδικοποίηση

- Κατά την αποκωδικοποίηση μιας κωδικής λέξης, υπάρχουν 3 πιθανές περιπτώσεις.
- Η πρώτη περίπτωση έχει να κάνει με το να μην υπάρχουν σφάλματα ή το πλήθος των σφαλμάτων να είναι επαρκώς μικρό ώστε να μπορεί να διορθωθούν. Στην περίπτωση αυτή η **αρχικά μεταδιδόμενη κωδική λέξη μπορεί να ανακτηθεί** όπως ακριβώς εστάλη από τον πομπό.
 - Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε πάλι σφάλματα, το πλήθος των οποίων υπερβαίνει το επιτρεπτό οπότε δεν είναι δυνατή η διόρθωσή τους. Ο αποκωδικοποιητής θα ανιχνεύσει ότι **δεν μπορεί να ανακτήσει τον αρχικό κώδικα** και θα δηλώσει το γεγονός. Συγκεκριμένα, θα θέσει την τιμή 1 στο πεδίο Transport Error Indicator (TEI) στην επικεφαλίδα του πακέτου TS.
 - Υπάρχει, επίσης, μια τρίτη περίπτωση στην οποία έχουμε πάλι σφάλματα των οποίων το πλήθος είναι μεγαλύτερο από το επιτρεπτό (όπως και στη δεύτερη περίπτωση), αλλά εδώ ο αποκωδικοποιητής δεν είναι σε θέση να αντιληφθεί το σφάλμα. Αυτό σημαίνει ότι προβαίνει στην αποκωδικοποίηση και **ανακτά μια εσφαλμένη κωδική λέξη** χωρίς κάποια περαιτέρω ένδειξη.

Εξωτερική διεμπλοκή – outer interleaving

Ριπές σφαλμάτων

Κατά τη μετάδοση υπάρχει πιθανότητα έξαρσης λαθών τα οποία ενδεχομένως να μην μπορούν να διορθωθούν από τον RS. Σε μια τέτοια περίπτωση θα προτιμούσαμε τα σφάλματα να είναι τοποθετημένα διεσπαρμένα και όχι συνεχόμενα (κατά ριπές), αφού θα υπήρχαν περισσότερες πιθανότητες ο αλγόριθμος να μπορεί να διορθώσει τα σφάλματα (και κυρίως στην περίπτωση που το πλήθος των συνεχόμενων σφαλμάτων ξεπερνάει το ήμισυ των δεδομένων για τη διόρθωση σφαλμάτων που εισάγει ο αλγόριθμος).

- Η τεχνική του **interleaving** (διεμπλοκή) χρησιμοποιείται για να προσθέσει **τυχειότητα** στις θέσεις των σφαλμάτων, ιδίως στην περίπτωση που αυτά παρουσιάζουν πυκνώματα σε μία διάσταση (τυπικά στον χρόνο). Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης είναι οι **ριπές σφαλμάτων** ή η απώλεια μιας συχνότητας στη μετάδοση με διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Εάν καταφέρουμε να διασπείρουμε αυτά τα σφάλματα, υπάρχουν περισσότερες δυνατότητες να διορθωθούν (με τους τυπικούς αλγόριθμους προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων).
- Έτσι στον πομπό, τα κωδικοποιημένα bits αναδιατάσσονται με συγκεκριμένο τρόπο, ενώ στον δέκτη επανέρχονται στην αρχική τους θέση με την αντίστροφη διαδικασία πριν την αποκωδικοποίηση.

Συγκεκριμένα η διεμπλοκή (interleaving) είναι μια περιοδική και αναστρέψιμη αντιμετάθεση συμβόλων ή bits. Τα σύμβολα ή τα bits επανέρχονται στη σωστή σειρά στον δέκτη.

Ριπές σφαλμάτων

Ορισμοί

- Περίοδος (period): Η περίοδος του διεμπλοκέα είναι **το πιο σύντομο χρονικό διάστημα εντός του οποίου ο αλγόριθμος αναδιάταξης των συμβόλων (ή bits) επαναλαμβάνεται**. Συχνά η περίοδος αντιστοιχεί στο μέγεθος μιας κωδικής λέξης (codeword). Η περίοδος καθορίζεται από τη δομή του διεμπλοκέα και μας δίνει το σύνολο των συμβόλων (ή bits) στο οποίο εφαρμόζεται κάθε φορά ο αλγόριθμος της αντιμετάθεσης.
- Βάθος (depth): Ως βάθος του διεμπλοκέα ορίζουμε **την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο συμβόλων (ή bits) στην έξοδο του διεμπλοκέα**, όταν τα σύμβολα (ή bits) αυτά ήταν συνεχόμενα στην είσοδο αυτού. Το βάθος του διεμπλοκέα είναι σημαντικό στην αντιμετώπιση ριπών σφαλμάτων. Συγκεκριμένα, εάν μια ριπή σφαλμάτων έχει μήκος μικρότερο από το βάθος του διεμπλοκέα, τότε δεν θα υπάρχουν συνεχόμενα εσφαλμένα σύμβολα στην έξοδο του διεμπλοκέα (που να οφείλονται βέβαια σε αυτήν τη ριπή σφαλμάτων).

Ριπές σφαλμάτων

Η διαδικασία της διεμπλοκής και απεμπλοκής των δεδομένων φαίνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα.

Παρατηρούμε ότι

η εισερχόμενη ροή συμβόλων / bits είναι η

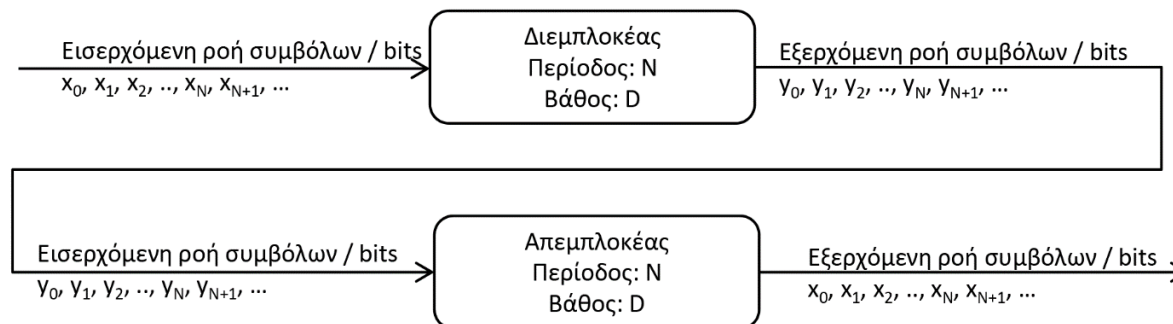
$$X_0, X_1, X_2, \dots, X_N, X_{N+1}, \dots$$

η εξερχόμενη ροή συμβόλων / bits είναι η

$$Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_N, Y_{N+1}, \dots$$

Διακρίνουμε δύο είδη τέτοιων βαθμίδων:

- **Μπλοκ διεμπλοκής**, (block interleaving) ο οποίος χρησιμοποιείται μετά τη συνελικτική κωδικοποίηση.
- **Συνελικτικός διεμπλοκής**, (convolutional interleaving) ο οποίος χρησιμοποιείται σε αυτό το στάδιο και θα τον εξετάσουμε αμέσως μετά.



Διεμπλοκή και απεμπλοκή δεδομένων

Εξωτερική διεμπλοκή – *convolutional interleaving*

Ο διεμπλοκέας αποτελείται από ένα σύνολο **καταχωρητών ολίσθησης με μια σταθερή καθυστέρηση**. Οι καθυστερήσεις αυτές συνήθως είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας ελάχιστης καθυστέρησης, χωρίς θεωρητικά να αποκλείεται και η υποστήριξη αυθαίρετων τιμών για την καθυστέρηση κάθε κλάδου.

Η λειτουργία της εξωτερικής διεμπλοκής αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Κάθε εισερχόμενο σύμβολο (ή bit) εγγράφεται στον τρέχοντα καταχωρητή (δηλαδή το επόμενο σύμβολο θα καταχωρηθεί στον επόμενο καταχωρητή και ούτω κάθε εξής).
- Με την καταχώρηση του εισερχόμενου συμβόλου, το παλαιότερο σύμβολο στον τρέχοντα καταχωρητή εγγράφεται στην έξοδο.

Η ανωτέρω διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί το σύνολο των συμβόλων.

Στην έξοδο ακολουθείται η αντίστοιχη διαδικασία, μόνο που ο απεμπλοκέας αποτελείται από κλάδους με καθυστερήσεις στην ανάστροφη σειρά (σε σχέση με τον διεμπλοκέα).

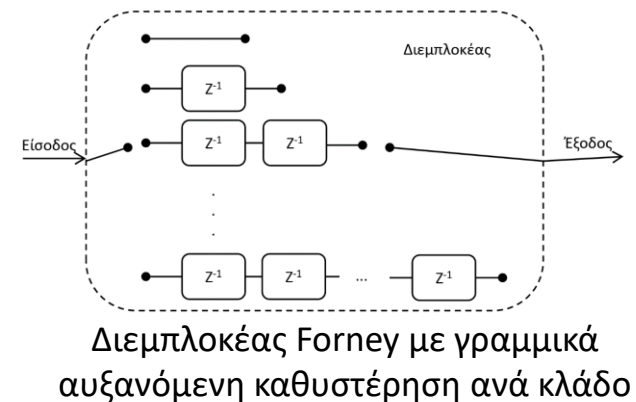
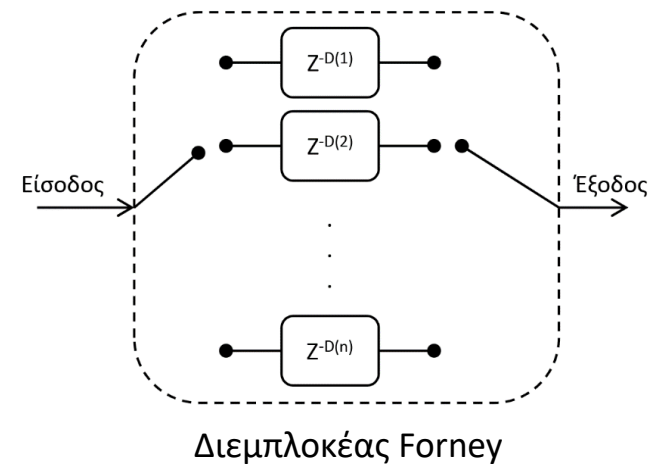
Εξωτερική διεμπλοκή – *convolutional interleaving*

Η υλοποίηση ενός συνελικτικού διεμπλοκέα μπορεί να γίνει με τη χρήση δύο περιστρεφόμενων διακοπών, ένα στην είσοδο και έναν στην έξοδό του.

- Το πλήθος διακλαδώσεων (συνήθως 12) συνδέονται κυκλικά και δρουν ως καταχωρητές ολίσθησης τύπου FIFO.
- Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα κάποια σύμβολα, (π.χ. σύμβολα που αφορούν τον συγχρονισμό) να διέρχονται χωρίς καθυστέρηση.

Στο πάνω σχήμα φαίνεται ένας γενικός διεμπλοκέας, με αυθαίρετες καθυστερήσεις σε κάθε κλάδο (1, 2, .. n), και ο οποίος ονομάζεται διεμπλοκέας **Forney**.

Στην περίπτωση που οι καθυστερήσεις αυξάνονται γραμμικά σε κάθε κλάδο, έχουμε **διεμπλοκέας Forney με γραμμικά αυξανόμενη καθυστέρηση ανά κλάδο** (βλ. κάτω σχήμα).



Εξωτερική διεμπλοκή – *convolutional interleaving*

Στον διεμπλοκέα Forney με γραμμικά αυξανόμενη καθυστέρηση ανά κλάδο παρατηρούμε ότι είναι δυνατόν από μια διακλάδωση (π.χ. την πρώτη) να μην έχουμε **καθόλου καθυστέρηση**, μέσα από την οποία **διέρχονται τα bytes συγχρονισμού** ώστε να μην έχουν κάποια καθυστέρηση.

Σε αυτόν τον τύπο διεμπλοκέα Forney, μετά τη διέλευση ενός πλήθους από σύμβολα από τον διεμπλοκέα και την επαναφορά της αρχικής διάταξης από τον απεμπλοκέα, υπεισέρχεται κάποια καθυστέρηση, μεταξύ της αρχικής και της τελικής αλληλουχίας συμβόλων. Γενικά, η σχέση υπολογισμού για αυτή την καθυστέρηση δίδεται από την σχέση:

$$\text{Καθυστέρηση} = \text{Πλήθος καταχωρητών} * \text{Μέγιστη καθυστέρηση καταχωρητή} \quad (6)$$

Στην περίπτωση που έχουμε απλό διεμπλοκέα Forney (βλ. πάνω σχήμα της προηγούμενης διαφάνειας), τότε η σχέση υπολογισμού της καθυστέρησης απλοποιείται:

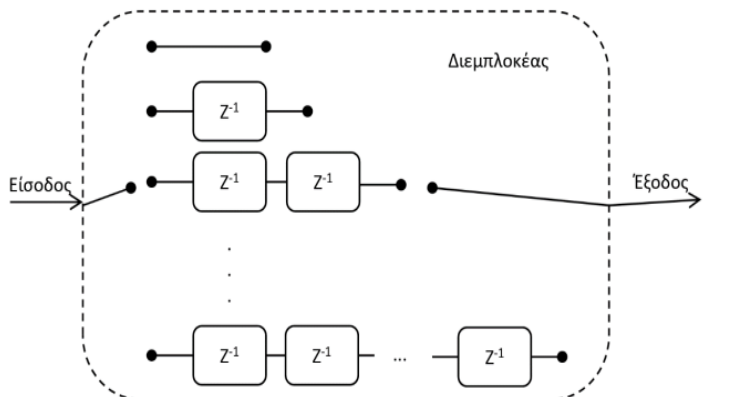
$$\text{Καθυστέρηση} = T * (\text{Πλήθος καταχωρητών} * (\text{Πλήθος καταχωρητών} - 1)) \quad (7)$$

Θεωρούμε ότι N είναι το πλήθος των καταχωρητών και T η καθυστέρηση σε κάθε καταχωρητή. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει αθροίζοντας την καθυστέρηση που υπεισέρχεται σε κάθε κλάδο, τόσο στον διεμπλοκέα όσο και στον απεμπλοκέα. Τα αθροίσματα αυτά αποτελούν άθροισμα όρων αριθμητικής προόδου και η σχέση προκύπτει με βάση τη σχέση υπολογισμού του αθροίσματος.

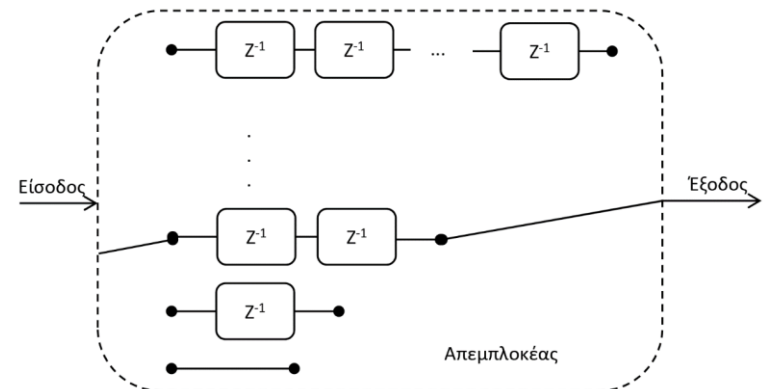
Εξωτερική απεμπλοκή – *convolutional de-interleaving*

Ο απεμπλοκέας έχει μορφή αντίστοιχη με τον διεμπλοκέα με αντίστροφη σειρά όμως των κλάδων. Συνολικά, το πλήθος των κλάδων είναι ίσο στον διεμπλοκέα και τον απεμπλοκέα όπως και η προκαλούμενη καθυστέρηση (βλ. σχήμα).

- Στην περίπτωση του DVB-T, ο διεμπλοκέας αποτελείται από 12 κλάδους και η αύξηση της καθυστέρησης σε κάθε έναν από αυτούς είναι $M=17$.



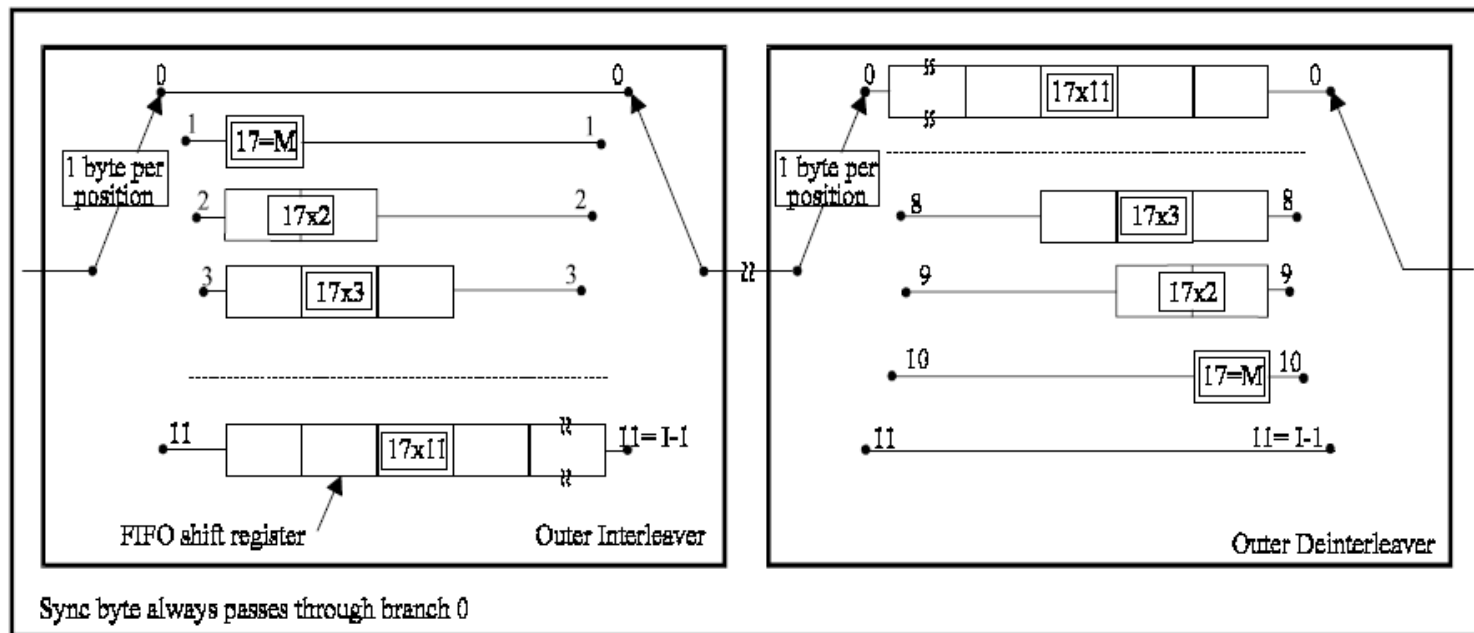
Διεμπλοκέας Forney με γραμμικά αυξανόμενη καθυστέρηση ανά κλάδο



Απεμπλοκέας Forney με γραμμικά αυξανόμενη καθυστέρηση ανά κλάδο

Εξωτερική απεμπλοκή – *convolutional de-interleaving*

Στην περίπτωση του DVB-T, ο διεμπλοκέας αποτελείται από 12 κλάδους και η αύξηση της καθυστέρησης σε κάθε έναν από αυτούς είναι $M=17$.



Εννοιολογικό διάγραμμα του outer interleaver και του deinterleaver στο DVB-T

Παράδειγμα διεμπλοκής - απεμπλοκής

Ας θεωρήσουμε ένα ζευγάρι απλών διεμπλοκών Forney, έκαστος με τρεις κλάδους, με 1, 2 και 3 καθυστερήσεις αντίστοιχα. Ας θεωρήσουμε, επίσης, ότι εισέρχεται συρμός δεδομένων αποτελούμενος από 15 Bytes. Στο πλαίσιο του παραδείγματος θα δούμε την αντιμετάθεση που υφίστανται τα δεδομένα εισόδου και τον τρόπο που αυτά επανέρχονται στην αρχική του κατάσταση, καθώς και την προκαλούμενη καθυστέρηση.

- Έχουμε, λοιπόν, τα επόμενα:

Είσοδος: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

- Επεξεργαζόμαστε τα δεδομένα σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας που επεξηγήσαμε παραπάνω στους τρεις κλάδους του διεμπλοκέα. Η έξοδος του διεμπλοκέα είναι και η είσοδος στη βαθμίδα επαναφοράς. Εφαρμόζοντας την αντίστοιχη λογική στον απεμπλοκέα λαμβάνουμε τα αρχικά δεδομένα.

Έξοδος: 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

- Παρατηρούμε ότι προηγούνται 6 μηδενικές τιμές, οι οποίες αφορούν στην καθυστέρηση. Για απλότητα, χωρίς όμως βλάβη της γενικότητας, θεωρήσαμε τις αρχικές τιμές στους καταχωρητές των βαθμίδων να είναι μηδενικές.

Εσωτερική κωδικοποίηση – inner coding

Εσωτερική κωδικοποίηση

Η εσωτερική κωδικοποίηση (inner coding) αποσκοπεί στη διόρθωση λαθών και δρα **συμπληρωματικά ως προς την κωδικοποίηση κατά Reed Solomon** (outer coding – block based). Χρησιμοποιείται στο ψηφιακό βίντεο, στις ασύρματες και δορυφορικές επικοινωνίες. Η εσωτερική κωδικοποίηση ακολουθεί την εξωτερική διεμπλοκή. Πρόκειται περί **συνελικτικής κωδικοποίησης** (convolutional encoding).

- Για τη μεν κωδικοποίηση χρησιμοποιείται ο κωδικοποιητής **Trellis** για την αποκωδικοποίηση ο αποκωδικοποιητής **Viterbi**.
- Επειδή η εσωτερική κωδικοποίηση κατά κανόνα δύναται να διπλασιάσει το πλήθος των δεδομένων, είναι δυνατόν να γίνει **διάτρηση** (puncturing) ώστε να μειωθεί ο ρυθμός.

Η λογική του συνελικτικού κωδικοποιητή είναι η χρήση καταχωρητών, κάθε ένας εκ των οποίων μπορεί να αποθηκεύσει ένα bit. Υπενθυμίζεται το αποτέλεσμα της πράξης σε μία πύλη XOR, δύο εισόδων:

Είσοδος 1	Είσοδος 2	Έξοδος
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Πύλη XOR

Εσωτερική κωδικοποίηση

Οι συνελκτικοί κωδικοποιητές είναι δυνατόν να χρησιμοποιούν ανάδραση ή όχι. Η μη χρήση ανάδρασης τους κάνει πιο απλούς στη δομή. Από συστημική άποψη οι κωδικοποιητές **χωρίς ανάδραση** μπορούν να θεωρηθούν ψηφιακά φίλτρα πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (**FIR, Finite Impulse Response**). Οι κωδικοποιητές **με ανάδραση** είναι ψηφιακά φίλτρα μη πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (**IIR, Infinite Impulse Response**). Ένας άλλος τρόπος να θεωρήσουμε τον κωδικοποιητή είναι ως μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων.

Η έξοδος προκύπτει από τις πράξεις που εκτελούνται στους αθροιστές και με χρήση των τιμών που είναι αποθηκευμένες στους καταχωρητές. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί κάποια bits να τροφοδοτούν απευθείας την έξοδο. Το πλήθος των bits της εξόδου προκύπτει από το πλήθος της εισόδου επί το πλήθος των αθροιστών. Αυτό σημαίνει ότι στην τυπική περίπτωση που έχουμε δύο αθροιστές ο ρυθμός (σε bits per second) της εξόδου θα είναι διπλάσιος σε σχέση με αυτόν της εισόδου.

Εσωτερική κωδικοποίηση

Ο συνελκτικός κωδικοποιητής χαρακτηρίζεται από το πλήθος των μηνμών που διαθέτει, το οποίο καθορίζει και το πλήθος των πιθανών καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρεθεί ο κωδικοποιητής.

Ορισμοί:

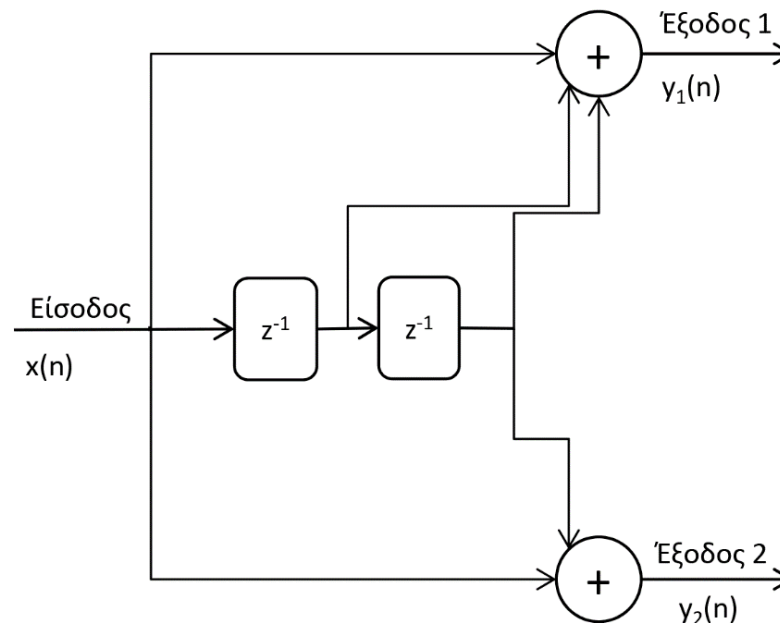
- **Ρυθμός κώδικα** (code rate) k/n , όπου k ο ρυθμός των εισερχόμενων δεδομένων στον κωδικοποιητή (σε bits / sec) και n ο ρυθμός των δεδομένων που εξέρχονται από τον κωδικοποιητή (σε bits / sec). Ο ρυθμός κώδικα εξαρτάται από το πλήθος των εξόδων του κωδικοποιητή. Η είσοδος θεωρούμε ότι αποτελείται από μία και μόνο ροή. Η βασική τιμή του ρυθμού κώδικα είναι $1/2$ (ένα προς δύο).
- **Μήκος περιορισμού** (constraint length) M , το οποίο αντιστοιχεί στις θέσεις μνήμης, δηλαδή, στο πλήθος bits που είναι αποθηκευμένα και επηρεάζουν την έξοδο του κωδικοποιητή. Το μήκος περιορισμού καθορίζει και τις καταστάσεις τις οποίες μπορεί να λάβει ο κωδικοποιητής.

Όπως και στην περίπτωση του κώδικα Reed Solomon, εάν τα δεδομένα της εισόδου χρησιμοποιούνται ως έχουν στην έξοδο, η κωδικοποίηση ονομάζεται **συστηματική**. Δεδομένου ότι ο εσωτερικός κωδικοποιητής ο οποίος προβλέπεται από το πρότυπο είναι αρκετά σύνθετος ώστε να δούμε απευθείας τον μηχανισμό λειτουργίας του, θα εξετάσουμε ένα πιο απλό και ευκολότερα παρουσιάσιμο παράδειγμα.

Η συνελκτική κωδικοποίηση δεν εφαρμόζεται σε τμήματα (μπλοκ) δεδομένων αλλά σε συνεχόμενη ροή bit. Οπότε η δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων εκ μέρους του κώδικα αφορά σφάλματα που λαμβάνουν χώρα κοντά το ένα με το άλλο. Στην περίπτωση μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ των σφαλμάτων αυτά μπορούν να διορθωθούν σχετικά εύκολα. Για αυτό και στην περίπτωση αυτή πρέπει να γίνει διεμπλοκή των bits, την οποία θα εξετάσουμε σε επόμενες διαφάνειες αυτής της Ενότητας.

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

Το παράδειγμα που θα εξετάσουμε έχει ρυθμό κώδικα $k/n=1/2$ και μήκος περιορισμού $M=2$. Παρατηρούμε ότι από συστημική πλευρά είναι ένα Γραμμικό Χρονικά Αναλλοίωτο Σύστημα (Linear Time Invariant, LTI) και συγκεκριμένα ένα φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (Finite Impulse Response, FIR). Ο κωδικοποιητής απεικονίζεται στο σχήμα.



Κωδικοποιητής με $M=2$

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

Ο κωδικοποιητής περιγράφεται με τις επόμενες σχέσεις.

- Αρχικά στο πεδίο του χρόνου προκύπτουν οι εξής σχέσεις (το n αντιστοιχεί στον διακριτό χρόνο, αφού τα συστήματα είναι διακριτού χρόνου).

$$\left. \begin{aligned} y_1(n) &= x(n) + x(n-1) + x(n-2) \\ y_1(n) &= x(n) + x(n-2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

- Λαμβάνουμε τον μετασχηματισμό Z στις δύο παραπάνω σχέσεις, όπου έστω $X(z)$ και $Y(z)$ οι μετασχηματισμοί Z της εισόδου και της εξόδου αντίστοιχα.

$$\left. \begin{aligned} Y_1(z) &= X(z) + z^{-1}X(z) + z^{-2}X(z) \\ Y_2(z) &= X(z) + z^{-2}X(z) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

- Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι οι επόμενες:

$$\left. \begin{aligned} H_1(z) &= 1 + z^{-1} + z^{-2} \\ H_2(z) &= 1 + z^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

Προκειμένου να εξηγήσουμε τη λειτουργία του κωδικοποιητή και αντίστοιχα του αποκωδικοποιητή, θα κατασκευάσουμε αρχικά τον **πίνακα καταστάσεων** (ή, αλλιώς, τον πίνακα μετάβασης καταστάσεων), καθώς και τον **πίνακα εξόδων**.

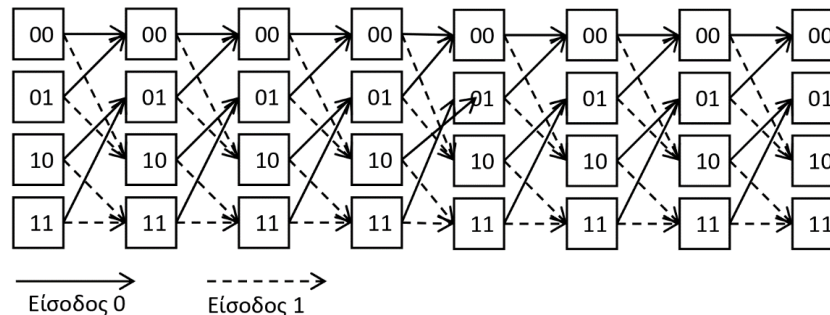
- Ο **πίνακας καταστάσεων** (βλ. πάνω αριστερή εικόνα), δείχνει τη μεταβολή των καταστάσεων του **αποκωδικοποιητή** καθώς εισέρχονται είσοδοι με διαφορετικές τιμές. Με βάση τον πίνακα καταστάσεων μπορούμε να φτιάξουμε το διάγραμμα Trellis (**διάγραμμα καταστάσεων**) το οποίο δείχνει την αλληλουχία των καταστάσεων, όπως φαίνεται στην κάτω κεντρική εικόνα.
- Ο **πίνακας εξόδων** (βλ. πάνω δεξιά εικόνα), δείχνει τις εξόδους του **κωδικοποιητή** για τις διαφορετικές εισόδους που δέχεται, και προκύπτει από τις προηγούμενες εξισώσεις (8, 9, 10).

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Επόμενη Κατάσταση	
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Πίνακας καταστάσεων

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Εξόδοι	
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0

Πίνακας εξόδων



Διάγραμμα Trellis

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

Μια κωδικοποίηση παρίσταται στον αποκωδικοποιητή ως αλληλουχία βημάτων στο διάγραμμα Trellis.

- Εάν δεν έχει προκύψει κάποιο σφάλμα κατά τη μετάδοση των δεδομένων, τότε τα δεδομένα που εισέρχονται στον αποκωδικοποιητή ταιριάζουν απόλυτα με κάποιο από τα μονοπάτια, οπότε μπορεί να γίνει με ξεκάθαρο τρόπο η αποκωδικοποίηση.
- Στην περίπτωση όμως που έχουν υπεισέλθει σφάλματα, το μονοπάτι δεν θα ταιριάζει απόλυτα. Θα υπάρχουν διαφοροποιήσεις οι οποίες ορίζουν τις αποστάσεις. Η δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων του αλγορίθμου υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση, όπου d είναι η ελάχιστη απόσταση Hamming μεταξύ των διαφορετικών μονοπατιών.

$$t=(d-1)/2 \quad (11)$$

Ο αλγόριθμος αποκωδικοποίησης ταιριάζει τη λαμβανόμενη ακολουθία με τα διάφορα πιθανά μονοπάτια προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσει τις αποστάσεις (τις διαφοροποιήσεις, δηλαδή, μεταξύ τους).

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

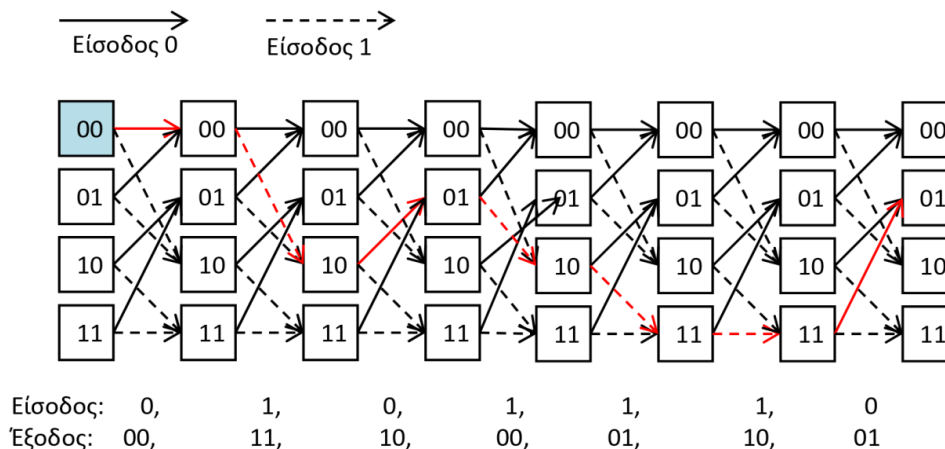
Θεωρώντας αρχική κατάσταση στο (0, 0) και είσοδο (0, 1, 0, 1, 1, 1, 0)
θα δημιουργήσουμε το διάγραμμα Trellis και τις αντίστοιχες εξόδους.

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Επόμενη Κατάσταση	
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Πίνακας καταστάσεων

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Έξοδοι	
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0

Πίνακας εξόδων



Διάγραμμα Trellis

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

Η λειτουργία του αποκωδικοποιητή βασίζεται στις εξής αρχές.

- Ο αποκωδικοποιητής **γνωρίζει** το διάγραμμα καταστάσεων.
- **Υπολογίζει** την ομοιότητα, την απόσταση Hamming, μεταξύ του λαμβανόμενου σήματος κάποια χρονική στιγμή και των μονοπατιών που οδηγούν σε κάθε κατάσταση την ίδια χρονική στιγμή.
- **Αποκλείει** τα μονοπάτια που απέχουν από την πιο πιθανά σωστή επιλογή.

Η πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης μειώνεται όσο πιο σύντομα αποκλείονται τα ανεπιθύμητα μονοπάτια.

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

Ας θεωρήσουμε ότι στο παράδειγμά μας αντί να πάρουμε την πραγματική έξοδο του κωδικοποιητή, η οποία είναι

00, 11, 10, 00

λαμβάνουμε εσφαλμένη είσοδο

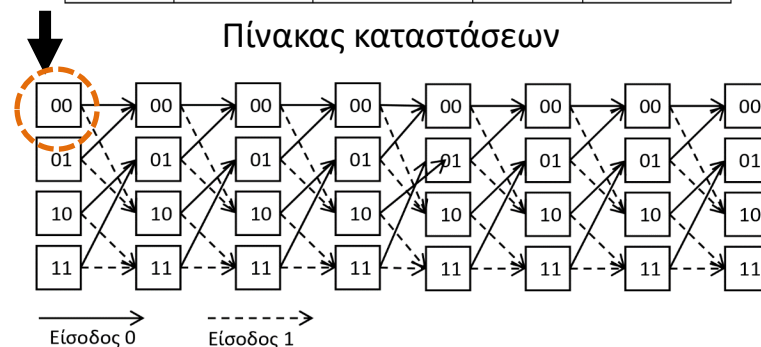
00, 11, **1**, 00

Για $n=0$ θεωρούμε ότι είμαστε στη μηδενική κατάσταση. Τη χρονική στιγμή $n=1$ ο αποκωδικοποιητής μπορεί να μεταβεί σε 2 καταστάσεις

- την κατάσταση 00, με έξοδο 00 και
- την κατάσταση 10 με έξοδο 11

Ο αποκωδικοποιητής έλαβε το 00, οπότε οι αποστάσεις είναι 0 και 2 αντίστοιχα.

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Επόμενη Κατάσταση	
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1



Διάγραμμα Trellis

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Έξοδοι	
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0

Πίνακας εξόδων

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

Τη χρονική στιγμή $n=2$ ο αποκωδικοποιητής μπορεί να μεταβεί σε 4 καταστάσεις

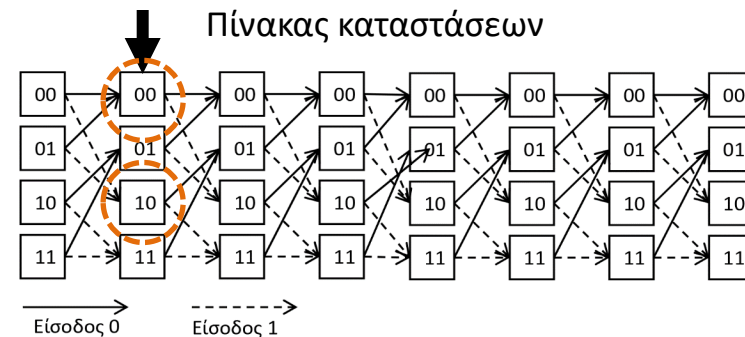
- Για προηγούμενη κατάσταση 00
 - την κατάσταση 00, με έξοδο 00 και
 - την κατάσταση 10 με έξοδο 11
- Για προηγούμενη κατάσταση 10
 - την κατάσταση 01, με έξοδο 10 και
 - την κατάσταση 11 με έξοδο 01

Ο αποκωδικοποιητής έλαβε το 11, οπότε οι αποστάσεις (αθροιζόμενες) είναι 0+2, 0+0, 1+2, 1+2 αντίστοιχα.

Ο αλγόριθμος υπολογίζει τις αποστάσεις και διατηρεί, π.χ., ανά δύο χρονικές στιγμές αυτές με τη μικρότερη απόσταση, δηλαδή την 10.

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Επόμενη Κατάσταση	
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Πίνακας καταστάσεων



Διάγραμμα Trellis

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Έξοδοι	
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0

Πίνακας εξόδων

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

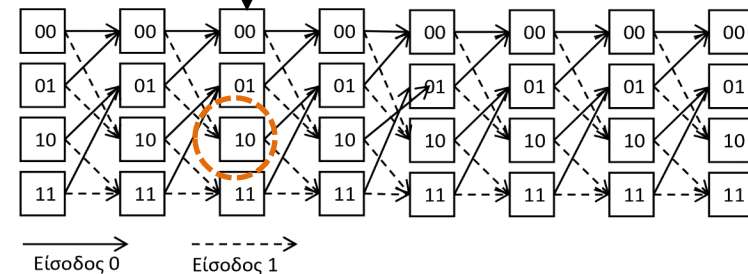
Τη χρονική στιγμή $n=3$ ο αποκωδικοποιητής είναι στη 10 και μπορεί να μεταβεί σε δύο καταστάσεις:

- την 11, με έξοδο 01 και
- την 01 με έξοδο 10

Ο αποκωδικοποιητής έστω ότι έλαβε το **11**, αντί για το 10, οπότε οι αποστάσεις είναι 1 και 1 αντίστοιχα 1 και 1.

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Επόμενη Κατάσταση	
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Πίνακας καταστάσεων



Διάγραμμα Trellis

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Έξοδοι	
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0

Πίνακας εξόδων

Παράδειγμα συνελικτικού κωδικοποιητή

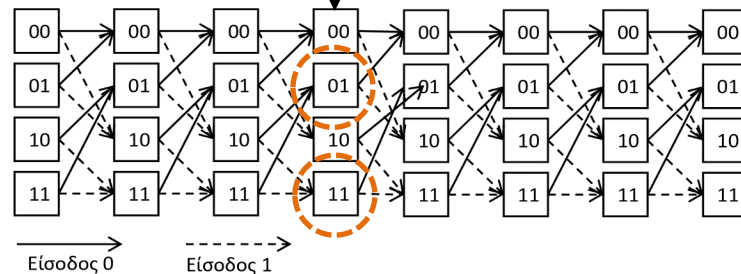
Τη χρονική στιγμή $n=4$ ο αποκωδικοποιητής μπορεί να μεταβεί σε 4 καταστάσεις:

- Για προηγούμενη κατάσταση 11
 - την κατάσταση 11, με έξοδο 10 και
 - την κατάσταση 01 με έξοδο 01
- Για προηγούμενη κατάσταση 01
 - την 10, με έξοδο 00 και
 - την 00 με έξοδο 11

Ο αποκωδικοποιητής έλαβε το 00, οπότε οι αποστάσεις είναι 1+1, 1+1, 0+1, 2+1 αντίστοιχα. Επιλέγει την κατάσταση 10 και ως προηγούμενη κατάσταση την 01.

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Επόμενη Κατάσταση	
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	1
1	1	1	1	1

Πίνακας καταστάσεων



Διάγραμμα Trellis

Είσοδος	Τρέχουσα Κατάσταση		Έξοδοι	
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0

Πίνακας εξόδων

Συνελικτικός κωδικοποιητής προτύπου του ETSI (DVB)

Ο τυπικός συνελικτικός κωδικοποιητής ο οποίος περιγράφεται στο σχετικό πρότυπο του DVB φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Η ύπαρξη 6 μνημών δημιουργεί 64 καταστάσεις.

- Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι:

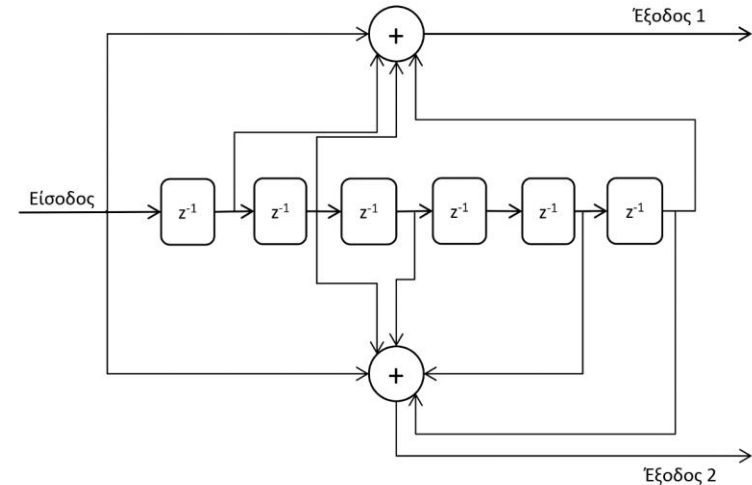
$$\left. \begin{aligned} Y_1(z) &= X(z) + z^{-1}X(z) + z^{-2}X(z) + z^{-3}X(z) + z^{-6}X(z) \\ Y_2(z) &= X(z) + z^{-2}X(z) + z^{-3}X(z) + z^{-5}X(z) + z^{-6}X(z) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

- Οι παραπάνω σχέσεις εισόδου και εξόδου δίνουν τις επόμενες συναρτήσεις μεταφοράς

$$\left. \begin{aligned} H_1(z) &= 1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-6} \\ H_2(z) &= 1 + z^{-2} + z^{-3} + z^{-5} + z^{-6} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

- Στο πεδίο του χρόνου προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\left. \begin{aligned} y_1(n) &= x(n) + x(n-1) + x(n-2) + x(n-3) + x(n-6) \\ y_2(n) &= x(n) + x(n-2) + x(n-3) + x(n-5) + x(n-6) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$



Εσωτερικός κωδικοποιητής σύμφωνα με το πρότυπο της ψηφιακής τηλεόρασης

Διάτρηση – puncturing

Η **διάτρηση** (puncturing) είναι μια τεχνική για τη δημιουργία ενός συνελικτικού κώδικα ρυθμού m/n από τον βασικό ρυθμό $1/2$, π.χ. $2/3$, $3/4$, $5/6$, $7/8$. Εφαρμόζεται με βάση συγκεκριμένα πρότυπα, βάσει των οποίων επιλέγονται κάποια από τα bits της εξόδου (που αντιστοιχούν στις θέσεις με “1” του παρακάτω πίνακα, οι τιμές στις θέσεις “0” αγνοούνται). Ο ρυθμός της διάτρησης επεξηγείται με τη βοήθεια του πίνακα, όπως για παράδειγμα, για τον κώδικα $2/3$ ο μετατροπέας εξάγει τα bits $X_1Y_1Y_2$ και παραλείπεται το X_2 .

Ρυθμοί κωδικοποίησης (Code rate)	Πρότυπο Διάτρησης	Μεταδιδόμενη αλληλουχία
1/2	X: 1 Y: 1	X_1Y_1
2/3	X: 1 0 Y: 1 1	$X_1Y_1 Y_2$
3/4	X: 1 0 1 Y: 1 1 0	$X_1Y_1 Y_2X_3$
5/6	X: 1 0 1 0 1 Y: 1 1 0 1 0	$X_1Y_1 Y_2 X_3Y_4 X_5$
7/8	X: 1 0 0 0 1 0 1 Y: 1 1 1 1 0 1 0	$X_1Y_1 Y_2Y_3 Y_4X_5 Y_6X_7$

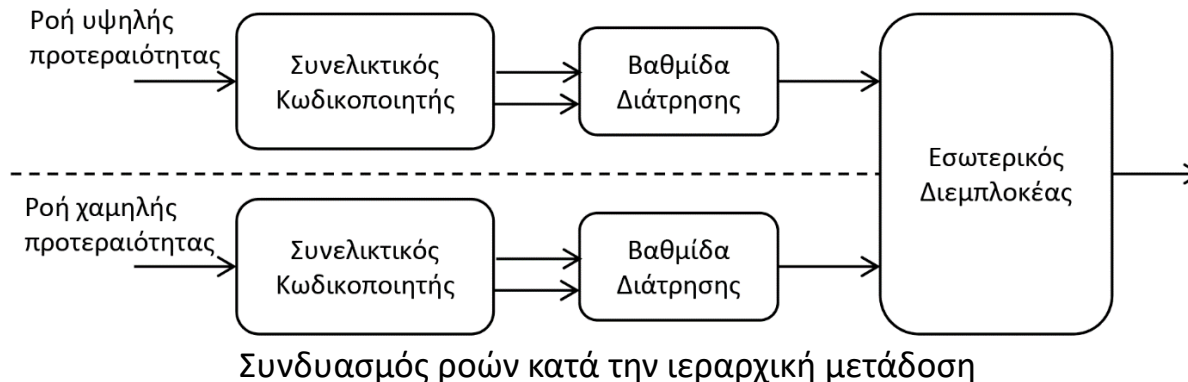
Λειτουργίας διάτρησης

Εσωτερική διεμπλοκή – inner interleaving

Εσωτερική διεμπλοκή

Η εσωτερική διεμπλοκή (inner interleaving) λαμβάνει ως είσοδο τη ροή που έχει υποστεί διάτρηση και δημιουργεί μία αντιμετάθεση στη ροή των bits, αλλά και των συμβόλων. Η αντιστοίχιση συμβόλων και bits εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), την οποία θα δούμε στην Ενότητα 7.

- Ο εσωτερικός διεμπλοκέας είναι το σημείο όπου συνδυάζονται οι ροές που αποτελούν την **ιεραρχική μετάδοση** (hierarchical mode). Η ιεραρχική μετάδοση προβλέπει την ύπαρξη δύο ροών, αυτή της υψηλής προτεραιότητας (high priority) και της χαμηλής προτεραιότητας (low priority). Η πρώτη προσφέρει καλύτερη προστασία από τον θόρυβο και έχει χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης (λόγω του αυξημένου ποσοστού από πληροφορία προληπτικής διόρθωσης σφαλμάτων). Για τον σκοπό αυτό η ροή υψηλής προτεραιότητας μπορεί να καλύψει μεγαλύτερες γεωγραφικές περιοχές.
- Στη βαθμίδα του εσωτερικού διεμπλοκέα είναι που οι δύο αυτές ροές συγκλίνουν σε μια ενιαία ροή συμβόλων, η οποία και διαμορφώνεται στη συνέχεια (βλ. το παρακάτω σχήμα).



Εσωτερική διεμπλοκή

Ο εσωτερικός διεμπλοκέας στη συνέχεια κάνει αποπολυπλεξία της ροής σε επιμέρους διακλαδώσεις το πλήθος των οποίων εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης (π.χ. QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Το πλήθος των διακλαδώσεων ταυτίζεται με το πλήθος των bits ανά σύμβολο για κάθε διαμόρφωση. Συγκεκριμένα, είναι 2 για την QPSK, 4 για τη 16-QAM και 6 για τη 64 QAM.

- Οι επιμέρους αυτές ροές υφίστανται σε πρώτη φάση αντιμετάθεση σε επίπεδο bits και σε δεύτερη φάση αντιμετάθεση σε επίπεδο συμβόλων, αφού βέβαια γίνει η αντιστοίχιση των ομάδων bits σε σύμβολα. Συγκεκριμένα, ο εσωτερικός διεμπλοκέας αποτελείται από δύο διακριτές βαθμίδες: τον διεμπλοκέα ψηφίων (bitinterleaver) και τον διεμπλοκέα συμβόλων (symbolinterleaver).

Παράδειγμα εσωτερικής διεμπλοκής

•An example with a text: We want to transmit the message “T h i s A n E x a m p l e O f I n t e r l e a v i n g I n D V B” (32 bytes). During the transmission, an error occurs at the 5th byte with a burst error duration of 8 bytes.

ThisAnExampleOfInterleavingInDVB

<Message – *No interleaving*

This_____eOfInterleavingInDVB

<Burst errors – *Error correction impossible*

ThisAnExampleOfInterleavingInDVB

<Message

TpOhAEfrilVlxDaaBltnlsvegnnmen

<Interleaving at the transmitter

TpOh_____lxDaaBltnlsvegnnmen

<Burst errors

Th_s_n_xampleO_Inte_leav_ngInD_B

<Reverse interleaving at the receiver

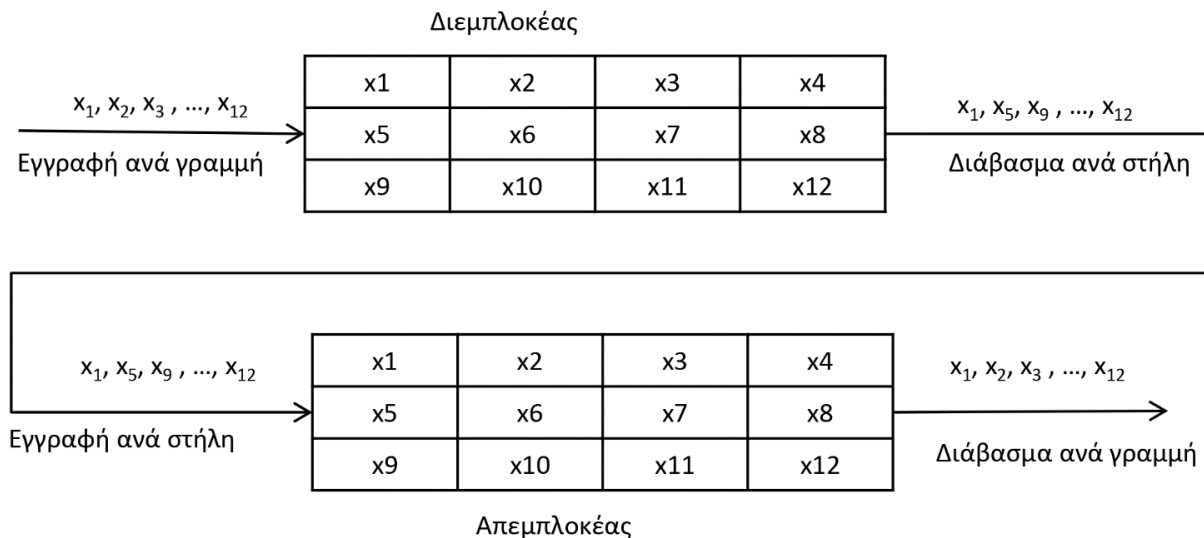
ThisAnExampleOfInterleavingInDVB

<Correction of *Διόρθωση individual errors*
and Message reconstruction

Αντιστοίχιση *bits* σε επιμέρους ροές

Ο διεμπλοκέας bit απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, σύμφωνα με το οποίο η είσοδος εγγράφεται στον διεμπλοκέα, ο οποίος υλοποιείται ως ένας καταχωρητής, κατά γραμμή και διαβάζεται κατά στήλη.

- Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η έξοδος του διεμπλοκέα, η οποία δίνεται ως είσοδος στον απεμπλοκέα,
- Ο απεμπλοκέας λειτουργεί με την αντίστροφη λογική. Συγκεκριμένα στον απεμπλοκέα η είσοδος γράφεται ανά στήλη και διαβάζεται ανά γραμμή. Έτσι η έξοδος του διεμπλοκέα επανέρχεται στην αρχική της μορφή.



Διεμπλοκέας και απεμπλοκέας bits με χρήση πίνακα

Επαναληπτικές ασκήσεις – Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Άσκηση

Ποιο είναι το μέγιστο πλήθος συμβόλων σε μια κωδική λέξη στον κώδικα Reed Solomon;

Απάντηση / Λύση

Το μέγιστο μήκος μιας κωδικής λέξης (πλήθος συμβόλων) για κώδικα με σύμβολα 8-bit ($s=8$) είναι 255 σύμβολα. Στο DVB χρησιμοποιείται ο RS (204, 188).

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Άσκηση

Επεξηγήστε κατά πόσο ο αλγόριθμος RS είναι συστηματικός και ποιον πλεονασμό δημιουργεί. Από τι εξαρτάται η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς για κωδικοποίηση / αποκωδικοποίηση; Πόσα λάθη μπορούν να διορθωθούν με τον κώδικα RS (1024, 788);

Απάντηση / Λύση

Ο κώδικας RS είναι συστηματικός, αφού η πληροφορία διόρθωσης σφαλμάτων απλώς προστίθεται πριν ή μετά τα προς μετάδοση δεδομένα. Ο κώδικας είναι συστηματικός καθώς τα δεδομένα παραμένουν αμετάβλητα και απλώς προστίθενται τα σύμβολα ισοτιμίας. Τα σύμβολα ισοτιμίας μπορεί να προστεθούν χωρίς καμία βλάβη του κώδικα και στην αρχή των δεδομένων.

Ο κώδικας RS των 16 Bytes που προστίθενται στα 188 Bytes δημιουργεί έναν πλεονασμό $(204-188)/188=8.5\%$ κατά τον οποίο αυξάνεται ο όγκος του πακέτου.

Η υπολογιστική ισχύς σχετίζεται με τον αριθμό των συμβόλων ισοτιμίας ανά κωδική λέξη. Μεγάλος αριθμός λαθών που μπορούν να διορθωθούν χρειάζεται και μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Μπορούν να διορθωθούν **$(1024-788)/2$ σφάλματα**.

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Άσκηση

Ένα σύστημα ψηφιακής επικοινωνίας είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί με BER της τάξης του 10^{-9} , (ένα bit λάθους κάθε 10^9 bits). Πώς μπορούμε να το εξασφαλίσουμε εάν ο τρέχων δίαυλος έχει υποδεέστερο ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων;

Απάντηση / Λύση

Η μείωση του ρυθμού σφαλμάτων μπορεί να επιτευχθεί με:

- αύξηση της ισχύος εκπομπής
- την προσθήκη κωδικοποίησης όπως η Reed Solomon (ή άλλου τύπου διόρθωσης). Η κωδικοποίηση επιτρέπει στο σύστημα να επιτύχει το επιθυμητό BER με χαμηλότερη ισχύ εκπομπής.

Κριτήριο αξιολόγησης 4

Άσκηση

Σε ένα συρμό μεταφοράς MPEG-2 TS των 10 Mbits/s προσθέτουμε κώδικα Reed-Solomon.

- i. Πόσος είναι ο τελικός ρυθμός μετάδοσης της κωδικοποιημένης ροής που προκύπτει (σε Mbits/s);
- ii. Εάν κατά την μετάδοση το Bit Error Rate (BER) είναι ίσο με $2 \cdot 10^{-3}$ και θεωρήσουμε ότι έχουμε ομοιόμορφη κατανομή των λαθών (uniform distribution of errors) στα Transport Packets, είναι ικανός ο αποκωδικοποιητής R-S να επανακτήσει τον αρχικό συρμό μεταφοράς (Transport Stream);

Δίδεται ότι το byte error rate (ByER) μπορεί να βρεθεί από το ποσοστό των λανθασμένων bits (bit error rate - BER) κάνοντας χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$\text{ByER} = 1 - (1 - \text{BER})^8$$

Κριτήριο αξιολόγησης 4

Απάντηση / Λύση

- i. Τα 10 Mbits/s αντιστοιχούν σε $10/8 \text{ Mbytes/s} = 1,25 \text{ Mbytes/s}$. Εφόσον το κάθε Transport Packet έχει μέγεθος 188 bytes, ο ρυθμός μετάδοσης θα είναι $(1,25 \cdot 10^6 \text{ bytes/s}) / (188 \text{ bytes/packet}) = 6648,9 \text{ packets/sec}$. Μετά την κωδικοποίηση, το μέγεθος κάθε πακέτου αυξάνει από 188 to 204 bytes, αφού ο RS προσθέτει πλεονάζοντα bytes. Με αυτόν τον τρόπο, τα 6648,9 packets/sec θα αντιστοιχούν σε $(6648,9 \text{ packets/sec}) \cdot (204 \text{ bytes/packet}) = 1,356 \text{ Mbytes/sec} = \mathbf{10,84 \text{ Mbits/s}}$.
- ii. Προκειμένου να υπολογίσουμε τον μέσο όρο των λανθασμένων bytes μέσα σε ένα transport packet, χρειάζεται να γνωρίζουμε το byte error rate. Αυτό το υπολογίζουμε ως εξής:

$$\text{ByER} = 1 - (1 - \text{BER})^8 = 1 - (1 - 2 \cdot 10^{-3})^8 = 1,58 \cdot 10^{-2}$$

Κάθε προστατευμένο πακέτο έχει μέγεθος 204 bytes. Θεωρώντας ότι έχουμε ομοιόμορφη κατανομή των λαθών, κάθε προστατευμένο πακέτο θα δεχθεί (κατά μέσο όρο) $204 \cdot (1,58 \cdot 10^{-2}) = 3,22 \text{ erroneous bytes}$. Εφόσον ο αλγόριθμος του R-S μπορεί να προστατέψει μέχρι 8 bytes σε κάθε κωδικοποιημένο πακέτο, συνεπάγεται ότι **το αρχικό Transport Stream μπορεί να ανακτηθεί πλήρως**.

Κριτήριο αξιολόγησης 5

Άσκηση

Τροφοδοτούμε ένα πομπό DVB με συρμό μεταφοράς MPEG-2 Transport Stream που έχει ρυθμό 15 Mbits/s. Σε αυτό τον συρμό μεταφοράς προσθέτουμε κώδικα Reed-Solomon, και στην συνέχεια συνελικτικό κώδικα ρυθμού $2/3$. Ποιος είναι ο τελικός ρυθμός μετάδοσης της κωδικοποιημένης / προστατευμένης ροής;

Κριτήριο αξιολόγησης 5

Απάντηση / Λύση

Τα 15 Mbits/s αντιστοιχούν σε $15/8$ Mbytes/s = 1,875 Mbytes/s.

Εφόσον κάθε Transport Packet έχει μήκος 188 bytes, ο ρυθμός μετάδοσης είναι ίσος με $(1,875 \cdot 10^6 \text{ bytes/s}) / (188 \text{ bytes/packet}) = 9973,4 \text{ packets/sec}$.

Μετά την προσθήκη του κώδικα Reed-Solomon, το μήκος κάθε πακέτου θα αυξηθεί από τα 188 στα 204 bytes. Έτσι, τα 9973,4 packets/sec θα αντιστοιχούν σε $(9973,4 \text{ packets/sec}) \cdot (204 \text{ bytes/packet}) = 2,034 \text{ Mbytes/sec} = \mathbf{16,27 \text{ Mbits/s}}$.

Ο συνελικτικός κωδικοποιητής 3 bits για κάθε 2 bits εισόδου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης να ανέλθει στα $16,27 \text{ Mbits/s} \cdot (3/2) = \mathbf{24,40 \text{ Mbits/s}}$.

Βιβλιογραφία και βασικές πηγές

Βιβλιογραφία και βασικές πηγές

Προτεινόμενη βιβλιογραφία

1. Παπαδάκης, Α., 2015. Ψηφιακή τηλεόραση. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/5005>
2. ETSI - European Telecommunications Standards Institute. Digital broadcasting systems for television, sound and data services; Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. European Telecommunication Standard ETS 300 744, 1997.
3. C.K.P. Clark. Reed Solomon Error Correction. Research and Development BBC, White Paper, WHP 031. Research and Development BBC, 2002.
4. Matlab Documentation Mathworks. Παραδείγματα χρήσης του αλγορίθμου Reed Solomon με χρήση κώδικα και μοντέλων του Simulink <http://www.mathworks.com/help/comm/ref/rsenc.html>. Mathworks, 2015.
5. G. D. Forney. Burst-Correcting Codes for the Classic Bursty Channel. IEEE Transactions on Communications, vol. 19, 1971.
6. J. L. Ramsey. Realization of Optimum Interleavers. IEEE Transactions on Information Theory, IT-16 (3), 338-345, 1970
7. Matlab Documentation Mathworks. Παραδείγματα χρήσης του διεμπλοκέα με χρήση κώδικα και μοντέλων του Simulink <http://www.mathworks.com/help/comm/ug/interleaving.html>. Mathworks, 2015.
8. European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Rec. 301 210, Digital Video Broadcasting (DVB), Framing structure, channel coding and modulation. European Telecommunications Standards Institute, 1999.
9. European Telecommunications Standards Institute (ETSI). EN 300 744, Digital Video Broadcasting (DVB), Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. European Telecommunications Standards Institute, 2009.

Συναφή επιστημονικά περιοδικά

1. IEEE Communications Magazine, ComSoc
2. IEEE Transactions on Broadcasting
3. International Journal of Digital Television, Intellect