

Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών
Συστημάτων



Μ.Δ.Ε. «Τεχνολογίες και Διοίκηση Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων»

Κατεύθυνση: Τεχνολογίες Δικτύων Επικοινωνιών και
Υπολογιστών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ :

«ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ
ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΤΥΠΟΥ
DVB-H»

Κοκκίνης Χρυσάνθος
icsdm04021@icsd.aegean.gr

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ. Κορμέντζας Γεώργιος

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή στην παρούσα εργασία, Δρ Κορμέντζα Γεώργιο για την άρτια συνεργασία.

Επίσης, πολλές ευχαριστίες στον καθηγητή Δρ Πάλλη Ευάγγελο, τον Μαστοράκη Γεώργιο και το υπόλοιπο προσωπικό του εργαστηρίου ΠΑΣΙΦΑΗ στο ΤΕΙ Ηρακλείου Κρήτης, στο οποίο υλοποιήθηκε όλο το πρακτικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χωρίς την τεχνογνωσία και τον εξοπλισμό του εργαστηρίου σε DVB δίκτυα, το πνεύμα συνεργασίας αλλά και το πολύ καλό περιβάλλον εργασίας, το τελικό αποτέλεσμα δεν θα ήταν το ίδιο.

Τέλος, πολλά ευχαριστώ και στον Σιδέρη Αργύρη, ερευνητή στο εργαστήριο ΠΑΣΙΦΑΗ για την βοήθεια σε κάποια κομμάτια του λογισμικού και στο στήσιμο του εργαστηριακού DVB-H δικτύου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 6

ΤΕΡΜΑΤΙΚΑ ΧΕΙΡΟΣ.....	6
ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΩΝ DVB-H ΔΙΚΤΥΩΝ.....	7

DVB-T 9

ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ DVB-T.....	9
<i>Προσαρμογή και τυχαιοποίηση της πολυπλεξίας των TS πακέτων</i>	10
<i>Εξωτερική κωδικοποίηση και διαστρωμάτωση</i>	10
<i>Εσωτερική κωδικοποίηση</i>	12
<i>Εσωτερική διαστρωμάτωση</i>	13
<i>Απεικόνιση και διαμόρφωση</i>	15
<i>Μετάδοση με την τεχνική OFDM</i>	15
ΣΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑ DVB-T.....	16
ΕΠΙΠΕΔΟ ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ DVB-T.....	16
<i>Data piping</i>	17
<i>Data streaming</i>	17
<i>Data carousels</i>	17
<i>Multi Protocol Encapsulation</i>	17

DVB-H 17

ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ DVB-H.....	19
<i>Τρόπος μετάδοσης με 4K φέροντα</i>	19
<i>In-depth interleaver</i>	20
ΣΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑ DVB-H.....	21
ΕΠΙΠΕΔΟ ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ DVB-H [1] [2].....	22
<i>Πακέτα MPE (MultiProtocol Encapsulation Packets)</i>	23
<i>Time slicing</i>	24
<i>Μηχανισμός MPE-FEC</i>	25
ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ.....	26
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	27

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ IP ENCAPSULATOR / DE-ENCAPSULATOR 28

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ DVB-H ΔΙΚΤΥΟΥ.....	28
<i>PC για κωδικοποίηση DVB-H δεδομένων</i>	28
<i>PC για μετάδοση DVB-H δεδομένων με ενσωματωμένη κάρτα PCI-to-ASI</i>	29
<i>DVB-H modulator</i>	29
<i>Ενισχυτής UHF Σήματος και Κεραία μετάδοσης UHF</i>	30
<i>Δέκτης DVB-H και DVB-H de-modulator</i>	30
<i>PC για λήψη DVB-H δεδομένων</i>	30
<i>PC για απο-κωδικοποίηση DVB-H δεδομένων</i>	31
ΛΕΙΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ IP ENCAPSULATOR.....	32
<i>Περιγραφή λειτουργιών του IP Encapsulator</i>	34
ΛΕΙΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ IP DE-ENCAPSULATOR.....	44
<i>Περιγραφή λειτουργιών του IP de-encapsulator</i>	46

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ IP ENCAPSULATOR ΚΑΙ IP DE-ENCAPSULATOR 50

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ TIME-SLICING 51

ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (SEND DELAY).....	51
ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (SEND JITTER).....	53
ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΘΕ ΡΙΠΗΣ (PROCESS DELAY).....	53
ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΘΕ ΡΙΠΗΣ (PROCESS JITTER).....	55
ΧΡΟΝΟΣ ΠΟΥ Ο ΔΕΚΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΕΙ ΑΝΕΝΕΡΓΟΣ (OFF-TIME).....	56
ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΠΟΥ Ο ΔΕΚΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΕΙ ΑΝΕΝΕΡΓΟΣ (OFF-TIME JITTER).....	57
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (POWER SAVING).....	58

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ MPE-FEC 59

ΩΦΕΛΙΜΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΘΗΚΕ ΣΕ ΜΙΑ ΡΙΠΗ (THROUGHPUT).....	59
<i>Throughput με ενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC</i>	60
<i>Throughput με απενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC</i>	61
ΠΛΕΟΝΑΖΟΥΣΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΘΗΚΕ ΣΕ ΜΙΑ ΡΙΠΗ (OVERHEAD).....	62
<i>Overhead με ενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC</i>	63
<i>Overhead με απενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC</i>	63
IP ΠΑΚΕΤΑ ΜΕ ΛΑΘΗ.....	64
<i>IP πακέτα με λάθη με ενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC</i>	65
<i>IP πακέτα με λάθη με απενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC</i>	65
IP ΠΑΚΕΤΑ ΠΟΥ ΔΙΟΡΘΩΘΗΚΑΝ.....	66
<i>IP πακέτα που διορθώθηκαν με ενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC</i>	66

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ TIME-SLICING ΚΑΙ MPE-FEC 68

ΑΝΑΦΟΡΕΣ: 69

Περίληψη

Το πρότυπο DVB-H δημιουργήθηκε το 2004 από τον ευρωπαϊκό οργανισμό προτυποποίησης ETSI με σκοπό την μετάδοση με ευρεία εκπομπή (broadcasting) ψηφιακής τηλεόρασης καθώς και IP υπηρεσιών σε τερματικά χειρός κινούμενα σε περιβάλλοντα υψηλού θορύβου. Η ύπαρξη τέτοιων τερματικών δημιουργεί ιδιαίτερες απαιτήσεις για το DVB δίκτυο λόγω της μεγάλης κινητικότητας των τερματικών και των υψηλού θορύβου περιβαλλόντων στα οποία κινούνται. Το πρότυπο DVB-H αφορά το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων του μοντέλου του OSI και βασίζεται εν πολλοίς στο πρότυπο DVB-T καθώς χρησιμοποιεί αρκετούς από τους βασικούς μηχανισμούς μετάδοσης του. Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ των δύο προτύπων εστιάζονται στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων, στο οποίο το πρότυπο DVB-H εισάγει τους μηχανισμούς Time-Slicing για εξοικονόμηση ενέργειας στο τερματικό χειρός και MPE-FEC για την καλύτερη απόδοση σε περιβάλλοντα θορύβου. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί υλοποιήθηκαν σε λογισμικό και ενσωματώθηκαν σε ένα πρότυπο εργαστηριακό DVB-H δίκτυο, ενώ παράλληλα αξιολογήθηκε η συμπεριφορά τους σε μεταφορά πραγματικών δεδομένων.

Στο παρόν κείμενο, αρχικά περιγράφεται το πρότυπο DVB-T και οι νέες ή διαφορετικές λειτουργίες που εισάγει το πρότυπο DVB-H. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια λεπτομερής περιγραφή των μηχανισμών Time-Slicing και MPE-FEC. Μετά, περιγράφεται λεπτομερώς το λογισμικό που υλοποιήθηκε και η αρχιτεκτονική του εργαστηριακού δικτύου. Τέλος, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν στο DVB-H δίκτυο.

Abstract

The ETSI DVB-H standard was created in 2004 in order to achieve digital television broadcasting, and IP data broadcasting in general, to handheld terminals. Handheld terminals are light-weight battery powered moving devices. These kinds of terminals require special attention from the DVB network due to their mobility and the noisy environments in which they move. The DVB-H standard is implemented in the physical and data link OSI layers and is based in the DVB-T standard. Their main differences are located in the data link layer, in which the DVB-H introduces the Time-Slicing and the MPE-FEC mechanisms. These two mechanisms achieve power saving for the handheld terminal and better network performance in noisy environments. The data link mechanisms were implemented and used in a model DVB-H network in which their behaviour was evaluated in real data broadcasting.

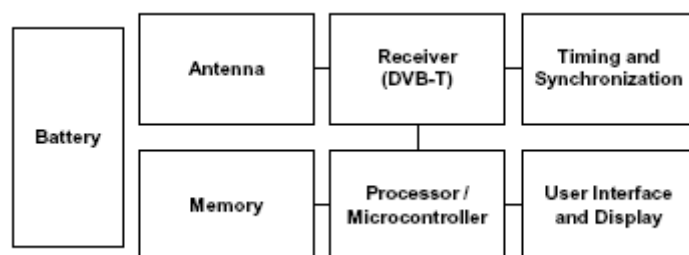
In this paper, firstly we present the DVB-T and DVB-H standards. Later on, we present the Time-Slicing and MPE-FEC mechanisms. In the final section, we describe the implemented software and the DVB-H network architecture implemented in the lab, along with several measurements that were done in this network

Εισαγωγή

Το πρότυπο DVB-H αποτελεί μέλος της οικογένειας προτύπων DVB, η οποία αναπτύχθηκε από τον ευρωπαϊκό οργανισμό προτυποποίησης ETSI. Η οικογένεια προτύπων DVB (Digital Video Broadcasting) παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την αποτελεσματική και αξιόπιστη ευρεία εκπομπή ψηφιακού πολυμεσικού περιεχομένου (video). Ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο, διαφοροποιούνται και τα μέλη της οικογένειας DVB. Συγκεκριμένα, ο ETSI έχει ορίσει τα πρότυπα DVB-S για μετάδοση ψηφιακής τηλεόρασης μέσω δορυφόρου (Digital Video Broadcasting- Satellite), το DVB-C για μετάδοση μέσω ομοαξονικού καλωδίου (Digital Video Broadcasting-Cable), το DVB-T για μετάδοση επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης (Digital Video Broadcasting-Terrestrial) καθώς βέβαια και το νεότερο μέλος της οικογένειας DVB, το DVB-H για μετάδοση σε ασύρματα κινητά τερματικά (Digital Video Broadcasting-Handheld).

Τερματικά Χειρός

Το DVB-H βασίζεται στο πρότυπο DVB-T. Το DVB-T είναι ένα πρότυπο το οποίο βρίσκεται σε εμπορική χρήση εδώ και αρκετά χρόνια, και έχει καθιερωθεί ως το επικρατέστερο πρότυπο ψηφιακής τηλεόρασης. Έχει αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά του στην μετάδοση ψηφιακού πολυμεσικού περιεχομένου σε σταθερά τερματικά όπως τηλεοράσεις και σταθμούς εργασίας, καθώς και σε κινητά τερματικά όπως οι φορητοί υπολογιστές. Παρόλα αυτά, η απόδοση και η αξιοπιστία του, φθίνουν όταν ο χρήστης χρησιμοποιεί τερματικό χειρός. Το πρότυπο ορίζει ως τερματικό χειρός (Handheld terminal), ένα τερματικό το οποίο είναι κινούμενο, ασύρματο, έχει περιορισμένες διαστάσεις, τροφοδοτείται από μπαταρίες και έχει οθόνη περιορισμένης ανάλυσης. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κινητά τηλέφωνα, συσκευές PDA, ακόμα και φορητοί υπολογιστές.



Σχήμα 1: περιγραφή ενός handheld τερματικού

Τα τερματικά χειρός έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Τροφοδοτούνται από μπαταρίες, οπότε το σύστημα μετάδοσης θα πρέπει να τους προσφέρει την δυνατότητα να απενεργοποιούν περιοδικά κάποια από τα κυκλώματα λήψης, έτσι ώστε να εξοικονομείται ενέργεια.

- Αφορούν χρήστες με πολύ μεγάλη κινητικότητα, οπότε θα πρέπει να διευκολύνεται η παροχή υπηρεσιών DVB κατά την διαδικασία αλλαγής κυψέλης μετάδοσης.
- Χρησιμοποιούνται σε διάφορες καταστάσεις (μέσα ή έξω από κτίρια, κινούμενα σχετικά αργά ή με μεγάλες ταχύτητες), άρα το σύστημα μετάδοσης πρέπει να παρέχει ευελιξία και κλιμάκωση για να μπορεί να παρέχει υπηρεσίες σε διαφορετικές ταχύτητες αλλά και να βελτιστοποιεί την εμβέλεια μετάδοσης.
- Τα περιβάλλοντα στα οποία χρησιμοποιούνται, χαρακτηρίζονται συνήθως από υψηλά επίπεδα θορύβου, οπότε το σύστημα μετάδοσης θα πρέπει να παρέχει τα μέσα ώστε να μπορούν να λάβουν σωστά τα ψηφιακά σήματα.
- Η οικογένεια DVB παρέχει έναν γενικό παγκόσμιο τρόπο εξυπηρέτησης κινητών τερματικών, άρα θα πρέπει να έχει την ευελιξία να λειτουργεί σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και με διαφορετικό εύρος ζώνης.

Λόγω των παραπάνω ιδιαιτεροτήτων των τερματικών χειρός, προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας ενός προτύπου, το οποίο να βασίζεται στο αξιόπιστο και δοκιμασμένο πλαίσιο μετάδοσης ψηφιακού πολυμεσικού περιεχομένου του DVB-T, αλλά ταυτόχρονα να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τα προβλήματα που ανακύπτουν από την χρήση τερματικών χειρός. Με το σκεπτικό αυτό, ο οργανισμός ETSI παρουσίασε το 2005 το πρότυπο DVB-H. Το DVB-H χρησιμοποιεί επιπλέον μεθόδους για να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και πιο αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων σε συνθήκες κίνησης και υψηλού θορύβου. Επιπλέον, ο σχεδιασμός του DVB-H επιτρέπει το handover των τερματικών μεταξύ γειτονικών κυψελών, χωρίς απώλεια δεδομένων, αν και το πρότυπο δεν ορίζει ρητά κάποια συγκεκριμένη διαδικασία για την υπηρεσία αυτή.

Αρχιτεκτονική των DVB-H δικτύων

Το DVB-H λόγω των χαρακτηριστικών των τερματικών στα οποία απευθύνεται, οφείλει να παρέχει υψηλής ποιότητας σήμα. Για την επίτευξη του στόχου αυτού μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετές αρχιτεκτονικές ανάλογα με τις διαθέσιμες συχνοτήτες και το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο ισχύος.

Όσον αφορά τις συχνοτήτες, πρέπει να αναφερθεί ότι το πρότυπο δημιουργήθηκε με σκοπό να μπορεί να εφαρμοστεί σε παγκόσμιο επίπεδο, συνεπώς και σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων λόγω εθνικών νομοθεσιών και περιορισμών. Ιδανικές περιοχές συχνοτήτων θεωρούνται η ζώνη IV των UHF μεταξύ 470 και 650 MHz, λόγω μεγάλης εμβέλειας και λιγότερων παρεμβολών, αλλά και η ζώνη L στα 1,5 GHz λόγω κυρίως του τυπικού μεγέθους κεραίας των handheld τερματικών.

Οι κυριότερες τοπολογίες του DVB-H είναι τα δίκτυα μονής συχνότητας (SFN – Single Frequency Networks) και τα δίκτυα πολλαπλών συχνοτήτων (MFN- Multiple Frequency Networks). Τα SFN αποτελούν την πλέον οικονομική λύση διότι χρησιμοποιείται μόνο μια συχνότητα. Μπορούν να καλύψουν μια περιοχή 60 χιλιομέτρων περίπου. Αντίθετα, τα MFN είναι ιδανικά για εθνική κάλυψη, και το πλήθος των χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων είναι από 3 έως 6. Στην MFN

αρχιτεκτονική, δημιουργούνται κυψέλες, παρόμοιες με αυτές των δικτύων GSM και UMTS. Μέσα σε κάθε κυψέλη το τερματικό χειρός επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ παράλληλα παρακολουθεί την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Σε περίπτωση που το τερματικό εντοπίσει μια γειτονική κυψέλη όπου το σήμα είναι καλύτερο, έχει την δυνατότητα να μεταφερθεί σε αυτήν (handover) χωρίς να διακοπεί η παρεχόμενη από το δίκτυο υπηρεσία και να υπάρξει απώλεια δεδομένων.

Το DVB-H χρησιμοποιεί την τεχνική μετάδοσης φυσικού επιπέδου COFDM. Το εύρος των καναλιών που χρησιμοποιεί η τεχνική COFDM ποικίλει. Αρχικά το πρότυπο αναφερόταν σε κανάλια εύρους 6,7 ή 8 MHz, ενώ τελευταία ο οργανισμός ETSI ορίζει και κανάλια εύρους 5 MHz. Η επιλογή των τιμών αυτών, έχει τις ρίζες της στο εύρος ζώνης της αναλογικής τηλεόρασης και έγινε για την απαραίτητη συμβατότητα προς τα πίσω, και την ομαλή μετάβαση από τα αναλογικά στα ψηφιακά δίκτυα τηλεόρασης.

Το εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης, ορίζεται τις περισσότερες φορές από την νομοθεσία της εκάστοτε χώρας, και δεν επιλέγεται από τον σχεδιαστή του DVB-H δικτύου. Αποτελεί όμως ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής του DVB-H δικτύου, καθώς γενικά ισχύει ότι όσο μειώνεται το εύρος ζώνης του καναλιού, μειώνεται και η συνολική απόδοση του δικτύου.

Το DVB-H παρέχει πληθώρα επιλογών σε ένα σχεδιαστή δικτύου για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής αρχιτεκτονικής. Ανάλογα με την επιλογή της ζώνης συχνοτήτων, το εύρος ζώνης του καναλιού και την επιλογή SFN ή MFN δικτύου, ο σχεδιαστής μπορεί να τροποποιήσει τις παραμέτρους του DVB-H για να επιτύχει την καλύτερη δυνατή απόδοση και αξιοπιστία του δικτύου. Οι παράμετροι αυτοί θα μελετηθούν παρακάτω.

Τέλος, σημαντικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής ενός DVB-H δικτύου είναι η πιθανή συνύπαρξη του με ένα DVB-T δίκτυο. Έχει αναφερθεί παραπάνω, ότι το DVB-H δανείζεται αρκετά στοιχεία από το DVB-T. Επίσης, η πολύχρονη χρησιμοποίηση του DVB-T και η μεγάλη αποδοχή του, συνεπάγεται την ύπαρξη αρκετών DVB-T δικτύων. Τα παραπάνω, συμβάλλουν στην χρήση του DVB-H ως πρόσθετη υπηρεσία σε handheld τερματικά, η οποία θα παρέχεται από την υπάρχουσα DVB-T υποδομή. Ο οργανισμός ETSI έχει προτυποποιήσει την πολύπλεξη δεδομένων DVB-H και πλαισίων MPEG-2 του DVB-T. Η υλοποίηση αυτή δεν εκμεταλλεύεται πλήρως τις δυνατότητες του νέου προτύπου. Προκειμένου να παρέχονται DVB-H υπηρεσίες από ένα DVB-T δίκτυο, θα πρέπει να μην χρησιμοποιούνται κάποιες από τις προαιρετικές μεθόδους του DVB-H. Για παράδειγμα δεν μπορούν να αποστέλλονται δεδομένα με την μέθοδο 4K, διότι αυτή δεν υποστηρίζεται από το DVB-T. Παρόλα αυτά, η παροχή υπηρεσιών DVB-H από DVB-T δίκτυα αποτελεί μια άριστη μεταβατική λύση.

Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή δεν υπάρχει ήδη υποδομή για DVB-T, ή η υπάρχουσα δεν επαρκεί για τερματικά χειρός, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενός αποκλειστικού DVB-H δικτύου, που θα μπορεί να εκμεταλλευτεί πλήρως τις νέες δυνατότητες του προτύπου, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

DVB-T

Το πρότυπο DVB-H βασίζεται εν πολλοίς στο πρότυπο DVB-T. Χρησιμοποιεί τις μεθόδους μετάδοσης του DVB-T στο φυσικό επίπεδο, με κάποιες διαφοροποιήσεις, την κυρίαρχη μέθοδο ενθυλάκωσης δεδομένων στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων, και την ίδια υποδομή στην σηματοδότηση. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμη μια αναφορά στον τρόπο λειτουργίας του προτύπου DVB-T, ως σημείο αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό, θα γίνουν καλύτερα κατανοητές οι διαφορές του DVB-T με το DVB-H, και θα περιγραφεί αποτελεσματικότερα η λειτουργία του τελευταίου.

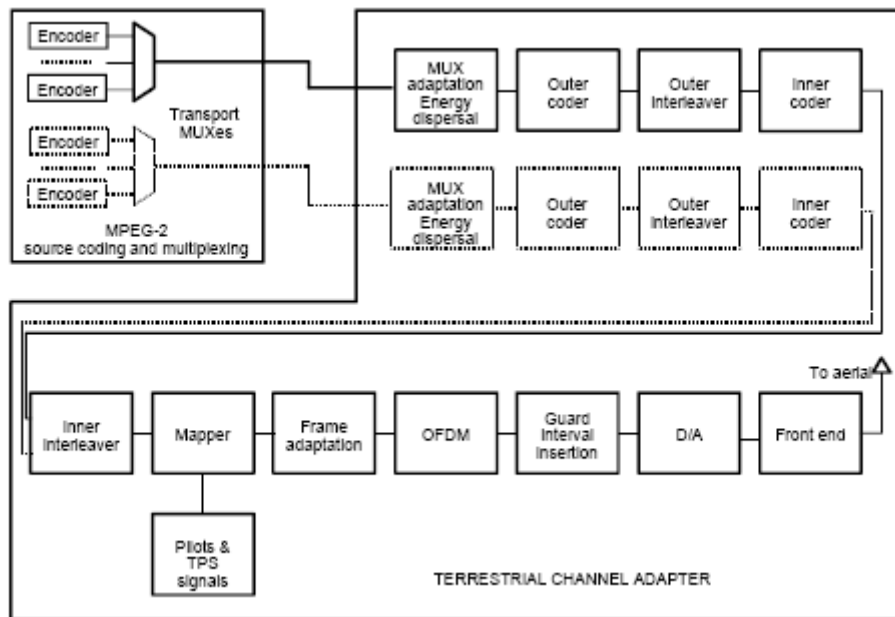
Το πρότυπο DVB-T ορίζει ένα δίκτυο ικανό να μεταδώσει υψηλής ποιότητας ήχο, πολυμεσικό περιεχόμενο (video) και δεδομένα σε ήδη υπάρχοντα από την αναλογική τηλεόραση κανάλια, εύρους 6, 7 ή 8 MHz. Επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από 4,98 έως 31,67 Mbps. Βασίζεται στην τεχνική μετάδοσης COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex). Η τεχνική COFDM αναφέρεται σε μετάδοση πληροφορίας με βάση τους κανόνες του OFDM, η οποία όμως προηγουμένως έχει κωδικοποιηθεί με κάποια διαδικασία (στην περίπτωση του DVB-T με εξωτερική κωδικοποίηση Reed Solomon). Πρόσφέρει την δυνατότητα ύπαρξης δύο πολυπλεγμένων ροών δεδομένων με διαφορετική ιεράρχηση (Low και High Priority Stream) για την μετάδοση δεδομένων με διαφορετικές παραμέτρους. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται μια μεγαλύτερη προστασία για την ροή υψηλής προτεραιότητας εις βάρος της δεύτερης ροής. Το πρότυπο DVB-T έχει πρωταρχικό σκοπό την μετάδοση ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος στο ασύρματο κανάλι. Αυτό γίνεται εφικτό με διαδικασίες του φυσικού επιπέδου. Σημαντική επέκταση του προτύπου όμως, είναι και η μετάδοση οποιασδήποτε μορφής δεδομένων, η οποία επιτυγχάνεται με μεθόδους του επιπέδου ζεύξης δεδομένων. Η σηματοδότηση του προτύπου θεωρείται απαραίτητη, καθώς ενημερώνει τον δέκτη για τις παραμέτρους που έχει επιλέξει ο πομπός.

Φυσικό επίπεδο DVB-T

Στο φυσικό επίπεδο του DVB-T εκτελούνται οι παρακάτω διαδικασίες στην ροή δεδομένων :

- Προσαρμογή και τυχαιοποίηση της πολυπλεξίας των TS πακέτων για καλύτερη κατανομή της ενέργειας του τελικού σήματος.
- Εξωτερική κωδικοποίηση - κώδικας Reed-Solomon (RS)
- Εξωτερική διαστρωμάτωση – περιελκτική διαστρωμάτωση (convolutional interleaving)
- Εσωτερική κωδικοποίηση – διάτρητος περιελκτικός κώδικας (punctured convolutional code)
- Εσωτερική διαστρωμάτωση – Κανονική ή σε βάθος διαστρωμάτωση
- Απεικόνιση και διαμόρφωση
- Μετάδοση με την τεχνική OFDM

Οι λειτουργίες του φυσικού επιπέδου καθώς και η θέση που έχουν κατά την διαδικασία μετάδοσης, φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα. Κατά την διαδικασία λήψης, ακολουθείται η ακριβώς αντίστροφη διαδικασία.



Σχήμα 2: Η διαδικασία μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο του DVB-T

Προσαρμογή και τυχαιοποίηση της πολυπλεξίας των TS πακέτων

Η διαδικασία αυτή αποτελεί το πρώτο στάδιο του φυσικού επιπέδου του DVB-T. Δέχεται ροές εισόδου οι οποίες αποτελούνται από πακέτα σταθερού μεγέθους. Τα πακέτα αυτά ονομάζονται πακέτα ροής μεταφοράς (Transport Stream Packets – TS) και έχουν μέγεθος 188 bytes, από τα οποία το πρώτο χρησιμοποιείται για συγχρονισμό και έχει πάντα τιμή $(0x47)_{\text{HEX}}$. Στο στάδιο αυτό, αρχικά στη ροή δεδομένων και στην έξοδο μιας γεννήτριας ψευδο-τυχαίων δυαδικών αριθμών με βάση το πολυώνυμο $1 + x^{14} + x^{15}$ εκτελείται η λογική πράξη XOR. Η διαδικασία αυτή τυχαιοποιεί το τελικό σήμα και κατανέμει ομοιόμορφα την ενέργεια του. Έπειτα, ακολουθεί η προσαρμογή των TS πακέτων. Προκειμένου ο δέκτης να αντιληφθεί, ότι η λαμβανόμενη ροή TS πακέτων έχει υποστεί τυχαιοποίηση, το πρώτο byte συγχρονισμού ανά 8 TS πακέτα μετατρέπεται από $(0x47)_{\text{HEX}}$ σε $B8(\text{HEX})$. Η αντίθετη ακριβώς διαδικασία εκτελείται στον δέκτη, ο οποίος με βάση το ίδιο πολυώνυμο επαναφέρει στην κανονική της μορφή την ροή δεδομένων.

Εξωτερική κωδικοποίηση και διαστρωμάτωση

Στην εξωτερική κωδικοποίηση σε κάθε TS πακέτο εφαρμόζεται ο κώδικας διόρθωσης σφαλμάτων Reed-Solomon $RS(204,188,t=8)$. Κατά την διαδικασία αυτή, σε κάθε πακέτο των 188 bytes, προστείνονται 16 επιπλέον bytes, ικανά να διορθώσουν στον δέκτη μέχρι και 8 bytes με λάθη.

Το πολυώνυμο δημιουργίας του κώδικα διόρθωσης είναι το:

$$g(x) = (x+\lambda^0)(x+\lambda^1)(x+\lambda^2)\dots(x+\lambda^{15})$$

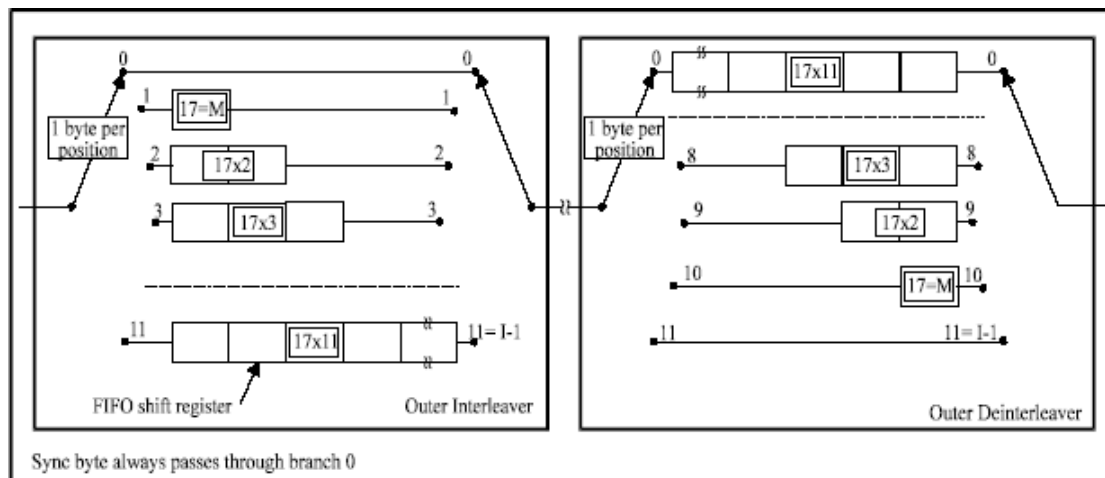
όπου $\lambda=02_{\text{HEX}}$

ενώ το πολυώνυμο δημιουργίας του πεδίου Galois είναι το:

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

Από την πλευρά του δέκτη, πακέτα μήκους 204 bytes εισάγονται στον αποκωδικοποιητή. Χρησιμοποιώντας τα ίδια πολυώνυμα και τα 16 επιπλέον bytes, ο decoder προσπαθεί να διορθώσει τυχόν λάθη. Σε περίπτωση όπου τα λάθη υπερβαίνουν τα 8, ο RS decoder δεν διορθώνει τίποτα, και απλά παραδίδει το πακέτο στα επόμενα επίπεδα.

Μετά την κωδικοποίηση ακολουθεί η διαστρωμάτωση (interleaving). Η διαστρωμάτωση είναι μια απαραίτητη διαδικασία, εφόσον χρησιμοποιείται η κωδικοποίηση RS. Σύμφωνα με την λειτουργία του κώδικα RS, είναι εφικτό να διορθωθούν μέχρι και 8 bytes λαθών σε μια ακολουθία 188 bytes. Συνήθως όμως, τα λάθη που εισάγονται από το ασύρματο κανάλι, παρουσιάζονται σε ριπές και όχι σε τυχαίες θέσεις. Το γεγονός αυτό μπορεί να καταστήσει αναποτελεσματική την διόρθωση λαθών με κώδικα RS, διότι οι ριπές λαθών υπερβαίνουν κατά πολύ το κατώφλι των 8 bytes του RS. Συνεπώς, είναι απαραίτητη μια διαδικασία, η οποία να διασπείρει τα συνεχόμενα λάθη που μπορεί να συμβούν σε περισσότερα από ένα TS πακέτα, με τρόπο τέτοιο ώστε να φαίνονται ως σκόρπια λάθη, ικανά να διορθωθούν από τον RS. Την λειτουργία αυτή εκτελεί ο εξωτερικός διαστρωματωτής (outer interleaver) και ο αντίστοιχος απο-διαστρωματωτής (outer de-interleaver). Η λειτουργία τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3: Λειτουργία των interleaver και de-interleaver

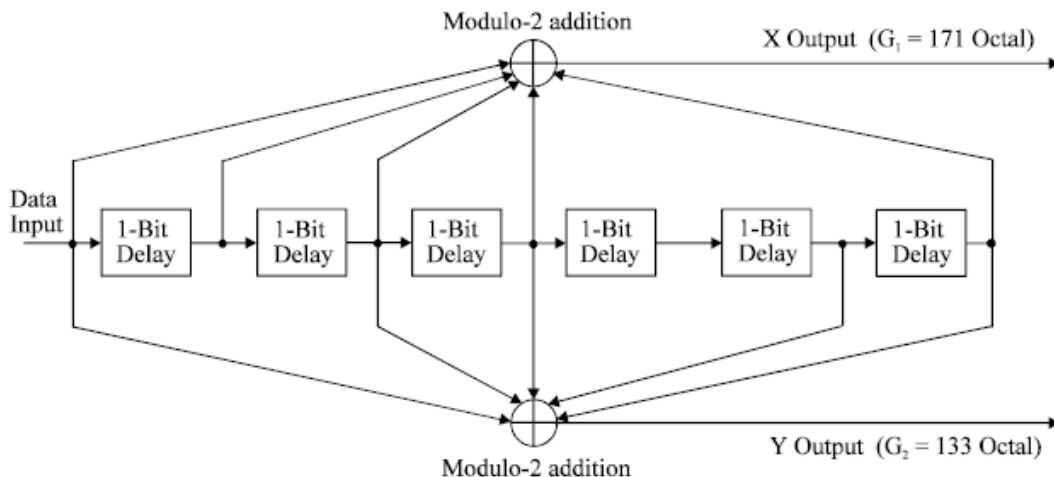
Ουσιαστικά, ο convolutional interleaver δέχεται ως είσοδο μια συνεχόμενη ροή δεδομένων, αποθηκεύει προσωρινά τα δεδομένα και τα εξάγει σε μια διαφορετική όχι όμως τυχαία σειρά. Αποτελείται από $I=12$ κλαδιά καθένα απ'τα οποία αποτελεί έναν FIFO shift register. Το κάθε κλαδί έχει κελιά μήκους 1 byte και πλήθος κελιών $j \times M$ όπου $M=17$ ($M=N/I$, $N=204$ bytes) και $j=0,1,2,\dots,11$.

Εσωτερική κωδικοποίηση

Το DVB-T διαθέτει έναν επιπλέον μηχανισμό κωδικοποίησης, τον οποίο ονομάζει εσωτερική κωδικοποίηση. Η εσωτερική κωδικοποίηση είναι ιδανική για την διόρθωση τυχαίων λαθών που εισάγει το κανάλι (white noise). Μαζί με την εξωτερική κωδικοποίηση RS, η οποία αντιμετωπίζει ριπές λαθών, προστατεύει την μεταδιδόμενη πληροφορία από κάθε είδους θόρυβο που μπορεί να προκύψει. Η κωδικοποίηση αυτή βασίζεται σε έναν περιελκτικό κώδικα με ποσοστό κωδικοποίησης 1/2 και 64 καταστάσεις. Τα πολυώνυμα γεννήτορες του κώδικα είναι τα $G_1=171_{oct}$ για την έξοδο X και $G_2=133_{oct}$ για την έξοδο Y.

Στην εσωτερική κωδικοποίηση, κάθε bit στην είσοδο μετατρέπεται σε δύο bits στην έξοδο. Έτσι προκύπτει το ποσοστό κωδικοποίησης 1/2. Για να παράξει την έξοδο, ο κωδικοποιητής χρησιμοποιεί 64 τιμές του σήματος στην είσοδο. Μία τωρινή και 63 προηγούμενες. Αυτές οι τιμές ονομάζονται καταστάσεις. Κάθε δυάδα εξόδου (X και Y) προκύπτει αν εκτελεστεί η λογική πράξη XOR σε ένα μοτίβο (pattern) από τωρινές και προηγούμενες τιμές των δεδομένων εισόδου. Αυτά τα μοτίβα μπορούν να αναπαρασταθούν σαν δυαδικοί αριθμοί και καλούνται πολυώνυμα δημιουργίας G. Στα συγκεκριμένα πολυώνυμα $G_1=171$ (1111001) και $G_2=133$ (1011011), η τιμή 1 σημαίνει ότι το bit αυτής της κατάστασης χρησιμοποιείται στην λογική πράξη XOR, ενώ η τιμή 0 σημαίνει ότι δεν χρησιμοποιείται.

Ο εσωτερικός κωδικοποιητής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4: Λειτουργία του inner coder

Πέρα από το ποσοστό κωδικοποίησης 1/2, ο μητρικός κώδικας μπορεί να επιτύχει και μικρότερο ποσοστό κωδικοποίησης (2/3, 3/4, 5/6, 7/8), αν εφαρμοστεί ένα κατάλληλο μοτίβο μείωσης (puncturing pattern), γνωστό και στον πομπό και στον δέκτη. Το μοτίβο μείωσης έχει επίσης δυαδική αναπαράσταση, με την ίδια σημασία όπως και στα πολυώνυμα δημιουργίας. Το παρακάτω σχήμα περιγράφει την διαδικασία μείωσης του κώδικα.

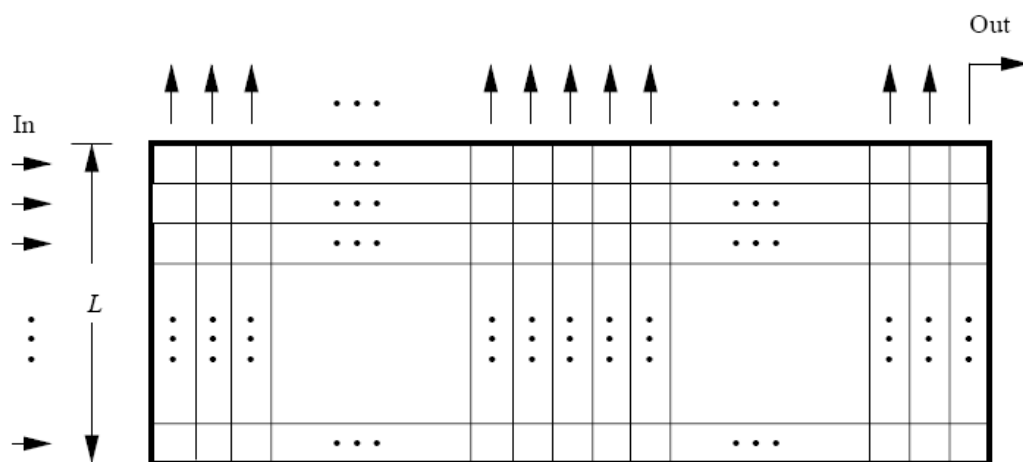
Code Rates r	Puncturing pattern	Transmitted sequence (after parallel-to-serial conversion)
1/2	X: 1 Y: 1	$X_1 Y_1$
2/3	X: 1 0 Y: 1 1	$X_1 Y_1 Y_2$
3/4	X: 1 0 1 Y: 1 1 0	$X_1 Y_1 Y_2 X_3$
5/6	X: 1 0 1 0 1 Y: 1 1 0 1 0	$X_1 Y_1 Y_2 X_3 Y_4 X_5$
7/8	X: 1 0 0 0 1 0 1 Y: 1 1 1 1 0 1 0	$X_1 Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 X_5 Y_6 X_7$

Σχήμα 5: Μοτίβα μείωσης στην εσωτερική κωδικοποίηση

Στον δέκτη, η εσωτερική απο-κωδικοποίηση των δεδομένων εκτελείται από τον απο-κωδικοποιητή Viterbi. Ο Viterbi είναι ο ενδεδειγμένος απο-κωδικοποιητής στην περίπτωση που χρησιμοποιείται περιελκτικός κώδικας στην πλευρά του πομπού. Αυτός αρχικά λαμβάνει την ροή δεδομένων η οποία έχει υποστεί puncturing, προσθέτει το πλήθος των bits που έχουν αφαιρεθεί, καθώς το ποσοστό κωδικοποίησης (code rate) γίνεται γνωστό μέσω της σηματοδότησης, και τέλος χρησιμοποιεί κανόνες πιθανής επιλογής (soft decision patterns) προκειμένου να ανακατασκευάσει την πιο πιθανή ροή bit που έχει μεταδωθεί. Όσο μεγαλύτερο είναι το code rate, τόσο η έξοδος του Viterbi decoder προσεγγίζει την ροή δεδομένων που έχει αποσταλεί.

Εσωτερική διαστρωμάτωση

Ο εσωτερικός διαστρωματωτής αποτελείται από τον διαστρωματωτή βασισμένο σε bits (bit-wise interleaver) και τον διαστρωματωτή συμβόλων (symbol interleaver). Και οι δύο διαδικασίες είναι block based, το οποίο σημαίνει ότι περιέχουν μια εσωτερική δομή προσωρινής αποθήκευσης σε μορφή πίνακα, στην οποία τα δεδομένα εισόδου αποθηκεύονται γραμμή γραμμή, και όταν ο πίνακας γεμίσει, εξέρχονται από αυτόν από στήλη σε στήλη.



Σχήμα 6: Αρχή λειτουργίας του block interleaver

Bit-wise interleaver

Ο διαστρωματωτής βασισμένος σε bit, αρχικά απο-πολυπλέκει την ροή εισόδου σε v ροές, όπου $v=2$ αν ακολούθως χρησιμοποιείται διαμόρφωση σήματος QPSK, $v=4$ αν χρησιμοποιείται διαμόρφωση 16-QAM και $v=6$ αν χρησιμοποιείται διαμόρφωση 64-QAM. Η κάθε ροή που προκύπτει, επεξεργάζεται από έναν ξεχωριστό bit interleaver. Το μέγεθος του κάθε block interleaver είναι πάντα 126 bits, αλλά ανάλογα την τιμή του v , αλλάζει η ακολουθία διαστρωμάτωσης.

Η τεχνική μετάδοσης OFDM η οποία αναλύεται παρακάτω, επιτρέπει στον σχεδιαστή δικτύου να επιλέξει μεταξύ άλλων το πλήθος των φερόντων σημάτων το οποίο απαιτείται για την μετάδοση ενός OFDM πλαισίου. Οι επιλογές στο DVB-T δίκτυο είναι η μετάδοση με 2000 φέροντα (2K mode) και 8000 φέροντα (8K mode). Από αυτά τα φέροντα, στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται 1512 φέροντα για μετάδοση πληροφορίας και στην δεύτερη 6048 φέροντα. Κάθε φέρον μεταδίδει ένα bit πληροφορίας. Συνεπώς, η ακολουθία διαστρωμάτωσης για το 2K mode αποτελείται από 12 επαναλήψεις διαστρωμάτωσης ($12 \times 126 = 1512$ bits), ενώ για το 8K mode είναι 48 επαναλήψεις ($48 \times 126 = 6048$ bits).

Οι έξοδοι των v διαστρωματωτών ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν σύμβολα δεδομένων, τέτοια ώστε κάθε σύμβολο των v bits να αποτελείται από ακριβώς ένα bit από τον κάθε interleaver. Συνεπώς, η έξοδος του bit wise interleaver είναι μια λέξη μήκους v bits.

Symbol interleaver

Ο διαστρωματωτής συμβόλων έχει ως σκοπό την αναπαράσταση των λέξεων μήκους v bits στα φέροντα του OFDM που χρησιμοποιούνται για μεταφορά πληροφορίας (δηλαδή 1512 και 6048 για το 2K και 8K mode αντίστοιχα). Τα 2000 ή 8000 φέροντα του OFDM αποτελούνται από φέροντα για μεταφορά δεδομένων, φέροντα σηματοδοσίας και φέροντα «πιλότους», τα οποία βοηθούν στον συγχρονισμό του OFDM πλαισίου. Ο symbol interleaver διαμοιράζει τις λέξεις πληροφορίας των v bits στα κατάλληλα φέροντα. Η διαδικασία περιγράφεται καλύτερα στο παρακάτω σχήμα.

Input to mapping block $Y_{q'} = Y_{0q'}, Y_{1q'}, Y_{2q'}, Y_{3q'}, Y_{4q'}, Y_{5q}'$	Carrier number k
pilot	0
0, 381, 631, 256, 128, 509	1
4 602, 4 983, 5 233, 4 858, 4 730, 5 111	2
36, 417, 667, 292, 164, 545	3
4 656, 5 037, 5 287, 4 912, 4 784, 5 165	4
48, 429, 679, 304, 176, 557	5
2 376, 2 757, 3 007, 2 632, 2 504, 2 885	6
780, 1 161, 1 411, 1 036, 908, 1 289	7
6 906, 7 287, 7 537, 7 162, 7 034, 7 415	8
4 590, 4 971, 5 221, 4 846, 4 718, 5 099	9
5 286, 4 911, 5 161, 4 786, 4 658, 5 039	10
2 364, 2 745, 2 995, 2 620, 2 492, 2 873	11
pilot	12
4 788, 5 169, 4 663, 5 044, 4 916, 4 541	13
.....	
4 194, 3 819, 4 069, 4 450, 4 322, 3 947	1 691
pilot	1 692
7 782, 8 163, 7 657, 8 038, 7 910, 8 291	1 693
6 624, 6 249, 6 499, 6 124, 6 752, 6 377	1 694
3 402, 3 027, 3 277, 3 658, 3 530, 3 155	1 695
546, 171, 421, 46, 674, 299	1 696
8 574, 8 955, 8 449, 8 830, 8 702, 8 327	1 697
8 376, 8 757, 9 007, 8 632, 8 504, 8 885	1 698
1 680, 2 061, 1 555, 1 936, 1 808, 2 189	1 699
7 620, 8 001, 8 251, 7 876, 7 748, 8 129	1 700
5 700, 5 325, 5 575, 5 956, 5 828, 5 453	1 701
8 826, 8 451, 8 701, 8 326, 8 954, 8 579	1 702
8 724, 8 349, 8 599, 8 980, 8 852, 8 477	1 703
pilot	1 704

Σχήμα 7 : Κατανομή των bit πληροφορίας στα OFDM φέροντα (2K mode)

Απεικόνιση και διαμόρφωση

Στο στάδιο αυτό όλα τα φέροντα δεδομένων του OFDM διαμορφώνονται είτε με QPSK, είτε με 16-QAM, είτε με 64-QAM. Ανάλογα με την επίλογη της τεχνικής διαμόρφωσης, επιτυγχάνεται μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εις βάρος της αντοχής του τελικού σήματος στον θόρυβο του καναλιού. Πιο ανθεκτική στο θόρυβο, αλλά και με το μικρότερο ρυθμό μετάδοσης είναι η τεχνική QPSK, ενώ αντιθέτως, η λιγότερο ανθεκτική σε θόρυβο, αλλά με τον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης είναι η 64-QAM. Επίσης, στο στάδιο αυτό εισάγεται και η πληροφορία σηματοδοσίας του DVB-T στα αντίστοιχα φέροντα σηματοδοσίας.

Μετάδοση με την τεχνική OFDM

Το στάδιο αυτό αποτελεί το τελευταίο, πριν τα δεδομένα αποσταλούν στο ασύρματο κανάλι. Η τεχνική OFDM διαχέει την μεταδιδόμενη πληροφορία σε ένα πλήθος φερόντων, τα οποία έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους 90 μοίρες. Το μεταδιδόμενο σήμα οργανώνεται σε OFDM πλαίσια. Κάθε πλαίσιο έχει διάρκεια T_F και αποτελείται από 68 OFDM σύμβολα. Τέσσερα πλαίσια αποτελούν ένα υπερ-πλαίσιο. Κάθε σύμβολο αποτελείται από 6817 φέροντα για το 8K mode και 1705 φέροντα για το 2K mode και μεταδίδεται με περίοδο T_s . Η περίοδος αυτή διαχωρίζεται σε ένα χρονικό διάστημα όπου μεταδίδεται η πληροφορία και ένα διάστημα προστασίας (guard

interval). Όσο πιο μεγάλο είναι το guard interval, τόσο πιο ανθεκτικό είναι το μεταδιδόμενο σήμα, με αντίτιμο το χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Οι τιμές του guard interval, ορίζονται ως προς την περίοδο του συμβόλου T_s και είναι $1/4$, $1/8$, $1/16$, $1/32$.

Σηματοδοσία DVB-T

Η σηματοδοσία του προτύπου DVB-T ονομάζεται TPS (Transmission Parameter Signalling). Χρησιμοποιείται για να παρέχει στον δέκτη έναν τρόπο να πληροφορηθεί εύκολα για διάφορες παραμέτρους μετάδοσης που έχει επιλέξει ο πομπός. Η σηματοδοσία μεταδίδεται σε κάθε OFDM πλαίσιο μέσω 17 φερόντων όταν ο σχεδιαστής του δικτύου έχει επιλέξει 2K mode, και μέσω 68 φερόντων αν έχει επιλέξει 8K mode. Οι πληροφορίες σηματοδοσίας παραμένουν οι ίδιες καθ'όλη την μετάδοση, δηλαδή δεν διαφοροποιούνται από πλαίσιο σε πλαίσιο. Απο τα φέροντα αυτά, προκύπτουν 17 ή 68 bits σηματοδοσίας, από τα οποία κάποια χρησιμοποιούνται για πληροφορίες σηματοδοσίας, άλλα για την επίτευξη συγχρονισμού στον δέκτη και άλλα για προστασία από λάθη που εισάγονται από το κανάλι.

Τα bits σηματοδοσίας περιέχουν πληροφορίες σχετικά με :

- Το σχήμα διαμόρφωσης (QPSK, 16-QAM, 64-QAM)
- Το guard interval ($1/4$, $1/8$, $1/16$, $1/32$)
- Το ποσοστό κωδικοποίησης στον inner coder ($2/3$, $3/4$, $5/6$, $7/8$)
- Τον τρόπο μετάδοσης (2K ή 8K) για περιπτώσεις προσαρμογής του δικτύου (reconfiguration)
- Το πλήθος των πλαισίων σε ένα OFDM υπερ-πλαίσιο
- Την ύπαρξη ιεράρχησης των ροών δεδομένων ή όχι

Επίπεδο ζεύξης δεδομένων του DVB-T

Το πρότυπο DVB-T έχει ως προταρχικό σκοπό την μετάδοση ψηφιακής τηλεόρασης και γενικά ψηφιακού πολυμεσικού περιεχομένου κωδικοποιημένου με βάση τον αλγόριθμο MPEG-2. Παρόλα αυτά, μέσω του επιπέδου ζεύξης δεδομένων, είναι εφικτό να μεταδώσει κάθε είδους δεδομένα. Το πρότυπο ορίζει πέντε μεθόδους για τον σκοπό αυτό. Κάθε μέθοδος παρέχει διαφορετικές υπηρεσίες, έτσι ώστε να καλύψει διαφορετικές ανάγκες μετάδοσης. Οι μέθοδοι αυτές είναι:

- Διασωλήνωση δεδομένων – Data piping
- Ροή δεδομένων – Data streaming
- Data carousels
- Ενθυλάκωση πολλαπλών πρωτοκόλλων (Multi Protocol Encapsulation- MPE)

Επιπλέον, το επίπεδο ζεύξης δεδομένων δημιουργεί επιπλέον σηματοδοσία προκειμένου να ενημερώσει το αντίστοιχο επίπεδο του δέκτη για παραμέτρους

μετάδοσης επιπέδου data link. Η σηματοδοσία αυτή υλοποιείται ως μια ξεχωριστή ροή και μεταδίδεται παράλληλα με την ροή δεδομένων. Οι πληροφορίες σηματοδοσίας διαφέρουν ανάλογα με την επιλεγμένη μέθοδο μετάδοσης.

Data piping

Τα δεδομένα ανώτερων επιπέδων τεμαχίζονται και τοποθετούνται ως φορτίο (payload) των TS πακέτων, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

Data streaming

Η μέθοδος αυτή είναι ιδανική για υπηρεσίες που απαιτούν απ'άκρη σ'άκρη ασύγχρονη ή σύγχρονη μετάδοση. Τα δεδομένα ενθυλακώνονται σε πακέτα PES (Program Elementary Streams).

Data carousels

Εξυπηρετεί υπηρεσίες που απαιτούν περιοδική μετάδοση δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά έχουν γνωστό μέγεθος τμήματος, ενώ τα τμήματα μπορούν να ομαδοποιηθούν.

Multi Protocol Encapsulation

Η μέθοδος MPE επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων από πρωτόκολλα επιπέδου δικτύου. Αποτελεί μια ευέλικτη μέθοδο ενθυλάκωσης, όπου πακέτα δεδομένων όπως το ευρέως διαδεδομένο IP, μπορούν να μεταδωθούν μέσω της DVB-T υποδομής. Κάθε IP πακέτο ενθυλακώνεται σε ακριβώς ένα MPE πλαίσιο. Μέγιστο επιτρεπτό μήκος του IP πακέτου, συμπεριλαμβανόμενης της επικεφαλίδας του είναι τα 4080 bytes. Το μέγεθος της MPE επικεφαλίδας είναι 16 bytes, συνεπώς το μέγιστο μέγεθος ενός MPE πακέτου είναι 4096 bytes. Η μέθοδος MPE είναι η πλέον διαδεδομένη από τις παραπάνω μεθόδους και είναι αυτή που εξ'ορισμού χρησιμοποιείται στο πρότυπο DVB-H.

DVB-H

Το πρότυπο DVB-H, όπως και τα υπόλοιπα πρότυπα της οικογένειας DVB, αφορούν το επίπεδο ζεύξης δεδομένων και το φυσικό. Χρησιμοποιεί σχεδόν τους ίδιους μηχανισμούς του DVB-T, ενώ παρέχει και κάποιες επιπλέον τεχνικές προκειμένου να ανταποκριθεί στις ιδιαίτερες απαιτήσεις των handheld τερματικών. Συγκεκριμένα, τα κινητά τερματικά διαθέτουν μικρές σε μήκος κεραίες, σε αντίθεση με τις τυπικές κεραίες τηλεοράσεων, ενώ βρίσκονται συνήθως σε κίνηση και σε περιβάλλοντα με υψηλά επίπεδα θορύβου και παρεμβολές. Συνεπώς απαιτείται η ύπαρξη επιπλέον μεθόδων που θα καθιστούν το μεταδιδόμενο σήμα πιο ανθεκτικό και ρωμαλέο (robust). Τέλος, τα τερματικά έχουν περιορισμένα αποθέματα ενέργειας, γεγονός που περιορίζει σημαντικά τον χρόνο που θα μπορούν να χρησιμοποιούν πολυμεσικές εφαρμογές. Είναι σημαντικό λοιπόν, να υπολοιστεί κάποια μέθοδος που θα

εξοικονομεί ενέργεια και θα αυξάνει την αυτονομία του τερματικού. Τα παραπάνω, καθιστούν το DVB-T μη αποδοτικό για τέτοιου είδους τερματικά.

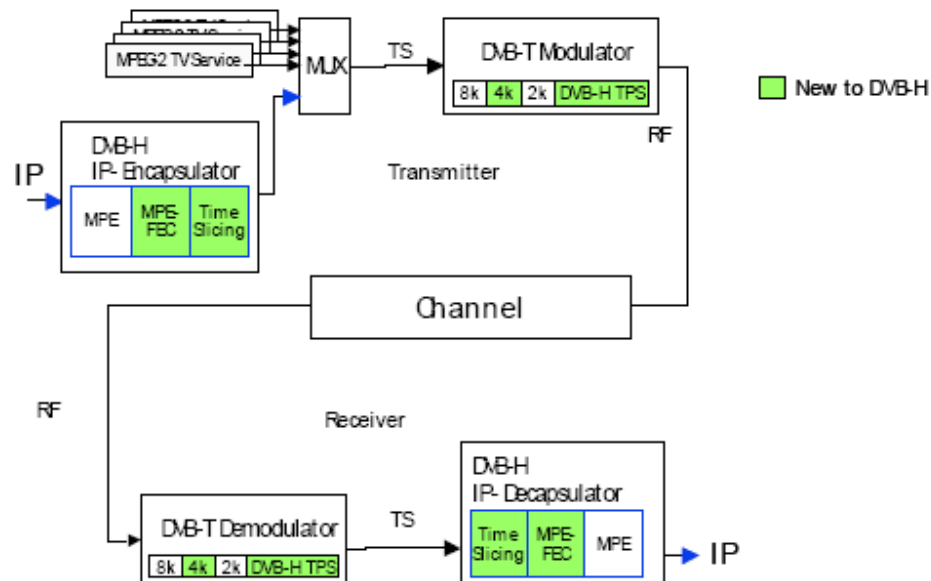
Το πρότυπο DVB-H εισάγει επιπλέον μηχανισμούς στην υπάρχουσα δομή μετάδοσης του DVB-T, προκειμένου να ανταποκριθεί στις ιδιαίτερες απαιτήσεις των τερματικών χειρός. Επίσης εισάγει και επιπλέον δεδομένα σηματοδοσίας ειδικά για αυτούς τους μηχανισμούς. Επίσης, το DVB-H σε αντίθεση με το DVB-T, δέχεται ως δεδομένα εισόδου αποκλειστικά πακέτα IP ή άλλα πακέτα πρωτοκόλλων επιπέδου δικτύου. Η σχεδιαστική αυτή επιλογή καθιστά το DVB-H ένα πρότυπο μεταφοράς οποιουδήποτε είδους δεδομένων και με υψηλό ρυθμό μετάδοσης σε τερματικά χειρός.

Οι διαφορές του DVB-H σε σχέση με το DVB-T είναι οι εξής:

- Φυσικό επίπεδο
 - Επιπλέον bits σηματοδοσίας TPS
 - Τρόπος μετάδοσης 4K
 - Σε βάθος διαστρωματωτής συμβόλων (in depth symbol interleaver) για 2K και 4K mode
- Επίπεδο ζεύξης δεδομένων
 - Μηχανισμός τεμαχισμού χρόνου (time-slicing)
 - Μηχανισμός MPE-FEC (Forward Error Correction for Multiprotocol Encapsulated data)

Από τα παραπάνω, ο μηχανισμός time slicing και η σηματοδοσία του DVB-H θεωρούνται υποχρεωτικά, ενώ τα υπόλοιπα προαιρετικά κατά την υλοποίηση.

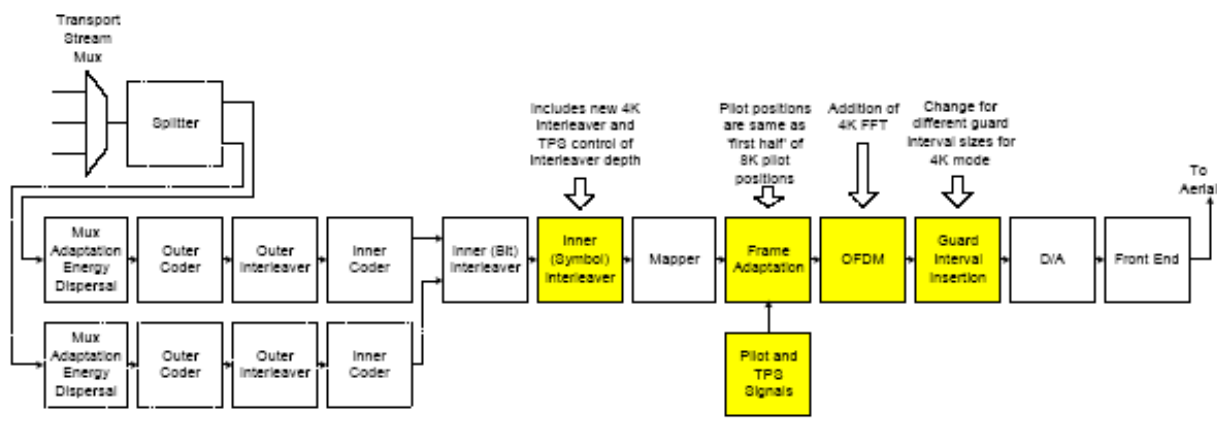
Η άμεση σχέση μεταξύ DVB-H και DVB-T επιτρέπει την μετάδοση τόσο παραδοσιακών MPEG-2 υπηρεσιών όσο και DVB-H υπηρεσιών μέσω του ίδιου δικτύου χρησιμοποιώντας πολυπλεξία. Στην περίπτωση αυτή, τα DVB-H enabled τερματικά χειρός, είναι ικανά να λάβουν μόνο τις DVB-H υπηρεσίες. Σχηματικά, η διαδικασία εκπομπής-λήψης παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 8: διαδικασία εκπομπής-λήψης στο DVB-H

Φυσικό επίπεδο DVB-H

Τα επιπλέον χαρακτηριστικά του DVB-H στο φυσικό επίπεδο σε σχέση με το DVB-T είναι οι επιπλέον πληροφορίες σηματοδότησης, ο τρόπος λειτουργίας 4K mode και η ύπαρξη ενός επιπλέον διαστρωματωτή συμβόλων, ο οποίος ονομάζεται in depth interleaver.



Σχήμα 9: Το φυσικό επίπεδο του DVB-H. Με κίτρινο είναι οι νέες λειτουργίες σε σχέση με το DVB-T

Τρόπος μετάδοσης με 4K φέροντα

Το DVB-T χρησιμοποιεί τους τρόπους μετάδοσης με 2K (2048) και 8K (8192) OFDM φέροντα. Στο DVB-H εισάγεται επιπλέον και η μέση λύση των 4K (4096) φερόντων για να βελτιωθεί η ελαστικότητα σχεδιασμού του δικτύου και να βρεθεί η χρυσή τομή μεταξύ κινητικότητας των τερματικών και μεγέθους του δικτύου. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο ρυθμός δεδομένων είναι ο ίδιος ανεξάρτητα του τρόπου λειτουργίας.

Στον τρόπο λειτουργίας 4K επιχειρείται μια εξισορρόπηση μεταξύ 2K και 8K. Συγκεκριμένα:

- Ο τρόπος λειτουργίας 8K μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μικρά, μεσαία και μεγάλα δίκτυα σε μέγεθος. Επιτρέπει καλή ταχύτητα λήψης του σήματος.
- Ο τρόπος λειτουργίας 4K χρησιμοποιείται για μικρά και μεσαία δίκτυα. Επιτρέπει πολύ καλή ταχύτητα λήψης του σήματος.
- Ο τρόπος λειτουργίας 2K χρησιμοποιείται για μικρά δίκτυα. Επιτρέπει άριστη ταχύτητα λήψης του σήματος.

Οι παραπάνω ιδιότητες προκύπτουν κυρίως από το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να μεταδοθεί ένα σύμβολο του COFDM [4]. Εφόσον το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι σταθερό σε ένα σύστημα COFDM (5,6,7 ή 8 Mhz), όσο πιο μεγάλο είναι το πλήθος των φερόντων, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το μέγεθος του συμβόλου. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα όπου συγκρίνεται ο χρόνος που απαιτείται για την μετάδοση ενός συμβόλου για κάθε τρόπο λειτουργίας (2K, 4K, 8K) και για κάθε τιμή του guard interval.

	8K	4K	2K
1/4	224 μ s	112 μ s	56 μ s
1/8	112 μ s	56 μ s	28 μ s
1/16	56 μ s	28 μ s	14 μ s
1/32	28 μ s	14 μ s	7 μ s

Σχήμα 10: χρόνοι μετάδοσης OFDM συμβόλων ανάλογα με το πλήθος των φερόντων και το guard interval

Στο 4K mode, το κάθε OFDM σύμβολο αποτελείται από 4096 φέροντα, απο τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταφορά δεδομένων τα 3024.

In-depth interleaver

Ο in-depth interleaver αποτελεί έναν symbol interleaver, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του κανονικού symbol interleaver του DVB-T που έχει ήδη παρουσιαστεί παραπάνω. Ο in-depth interleaver μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στις καταστάσεις λειτουργίας 2K και 4K mode. Ο interleaver του DVB-T, εξακολουθεί να υπάρχει στο DVB-H ονομαζόμενος πλέον παραδοσιακός (native interleaver), και είτε αποτελεί επιπλέον επιλογή στις λειτουργίες 2K και 4K, είτε είναι η μοναδική λύση όταν χρησιμοποιείται η λειτουργία 8K.

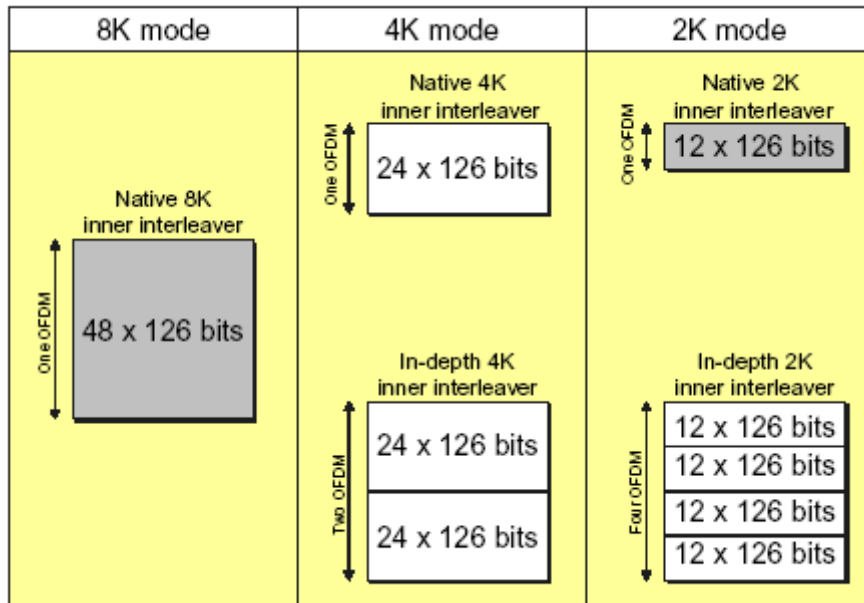
Η λειτουργία του in-depth interleaver βασίζεται σε μια απλή ιδέα. Εφόσον τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη DVB-H υπάρχει η υποδομή για interleaving σε 8K mode, ανεξάρτητα ποιο mode χρησιμοποιείται, είναι εφικτό να γίνεται χρήση αυτής της υποδομής και για 2K ή 4K mode. Γενικά, ο symbol interleaver αποτελεί μια δομή πίνακα, όπου τα δεδομένα εισάγονται ανά γραμμή και εξάγονται ανά στήλη. Το πλήθος των στοιχείων του πίνακα, είναι όσο και το πλήθος των OFDM φερόντων που μεταφέρουν δεδομένα. Δηλαδή 1512 φέροντα για το 2K mode, 3024 φέροντα για το 4K mode και 6048 φέροντα για το 8K mode. Στις τρεις αυτές δυνατές περιπτώσεις, ο native interleaver εκτελεί 12 επαναλήψεις των λέξεων μήκους 126 bits ($12 \times 126 = 1512$ bits) για το 2K mode, 24 επαναλήψεις ($24 \times 126 = 3024$ bits) για το 4K mode και 48 επαναλήψεις ($48 \times 126 = 6048$ bits) για το 8K mode.

Ο in-depth interleaver χρησιμοποιεί πάντα την δομή του 8K mode native interleaver αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στις καταστάσεις 2K και 4K. Έτσι, στο 2K mode εκτελεί 48 επαναλήψεις των λέξεων μήκους 126 bits, αντί για 12 και στο 4K εκτελεί 48 επαναλήψεις των λέξεων μήκους 126 bits, αντί για 24. Η διασπορά της πληροφορίας που επιτυγχάνεται είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη στο 2K mode και δύο φορές μεγαλύτερη στο 4K mode.

Γενικά ισχύει ότι όσο πιο μεγάλη είναι η διάρκεια του OFDM συμβόλου, τόσο πιο ανθεκτικό είναι στις παρεμβολές και τον θόρυβο του καναλιού. Για μια συγκεκριμένη τιμή ισχύος θορύβου, η ισχύς αυτή κατανέμεται σε 8192 φέροντα στο 8K mode, σε 4096 στο 4K mode και σε 2048 στο 2K mode. Συνεπώς η ισχύς του θορύβου ανά φέρον διπλασιάζεται στα 4K και τετραπλασιάζεται στο 2K σε σχέση με το 8K mode. Η χρήση του in depth interleaver στις καταστάσεις 2K και 4K, διαχέει την ισχύ του θορύβου σε 2 OFDM σύμβολα στα 4K και σε 4 σύμβολα στα 2K. Εάν προκύψει θόρυβος για την διάρκεια ενός συμβόλου, τότε κατά την έξοδο του interleaver 4 συνεχόμενα σύμβολα στο 2K mode (ή 2 σύμβολα για το 4K mode) θα έχουν ένα φέρον για κάθε τέσσερα φέροντα (ή ένα φέρον για κάθε δύο φέροντα στο 4K mode)

που θα έχει επηρεαστεί από τον θόρυβο. Το εκτεταμένο interleaving του in depth interleaver επιτρέπει στις καταστάσεις 2K και 4K να λειτουργεί το δίκτυο με αντοχή στο θόρυβο αντίστοιχη του 8K mode.

Οι native και in-depth symbol interleavers παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 11: native και in-depth symbol interleavers

Σηματοδοσία DVB-H

Η ανάπτυξη επιπλέον σηματοδοσίας ειδικά για το DVB-H βελτιώνει την λήψη του σήματος. Η επιπλέον σηματοδοσία γίνεται μέσω της υπάρχουσας σηματοδοσίας του DVB-T, της TPS (Transmission Parameter Signaling). Η TPS υλοποιείται με την χρήση εξειδικευμένων για σηματοδοσία φερόντων του OFDM. Έτσι, παράμετροι που πρέπει να γνωρίζει το τερματικό, ανακαλύπτονται γρήγορα και εύκολα, χωρίς να χρειάζεται να αναλυθούν οι επικεφαλίδες του MPE ή ανώτερων στρωμάτων.

Η σηματοδοσία περιλαμβάνει δύο TPS bits που φανερώνουν την ύπαρξη των μηχανισμών επιπέδου ζεύξης δεδομένων time slicing και MPE-FEC.

S ₄₈	S ₄₉	DVB-H signalling
0	x	Time Slicing is not used
1	x	At least one elementary stream uses Time Slicing
x	0	MPE-FEC not used
x	1	At least one elementary stream uses MPE-FEC
NOTE: "x" means whatever bit state.		

Σχήμα 12: Σηματοδοσία για μηχανισμούς time slicing και MPE-FEC

Επίσης παρέχεται σηματοδοσία για τον τρόπο λειτουργίας (2 bits) και την χρήση των interleavers (1 bit).

Bits s_{38}, s_{39}	Transmission mode
00	2K mode
01	8K mode
10	4K mode
11	reserved

Σχήμα 13: Σηματοδοσία για τον τρόπο λειτουργίας του OFDM

Bit s_{27}	In-depth inner interleaver information
0	native interleaver
1	in-depth interleaver

Σχήμα 14: Σηματοδοσία για το είδος του interleaver που χρησιμοποιείται

Επιπλέον, η σηματοδοσία του DVB-H περιέχει μια μεταβλητή η οποία ονομάζεται περιγραφητής κυψέλης (cell identifier) και προσδιορίζει μοναδικά την κυψέλη μετάδοσης στην οποία βρίσκεται κάθε στιγμή το τερματικό χειρός. Με την πληροφορία του περιγραφητή κυψέλης είναι δυνατή η γρηγορότερη σάρωση του σήματος από την πλευρά του τερματικού και πιο γρήγορο το handover μεταξύ γειτονικών κυψελών. Αυτό συμβαίνει διότι το τερματικό πλέον έχει την δυνατότητα να αναζητά την κυψέλη από την οποία επιθυμεί να λάβει δεδομένα μόνο από την σηματοδοσία που θα εκπέμπει (από το cell identifier), και όχι από το περιεχόμενο της μεταδιδόμενης πληροφορίας.

Τα κανάλια του OFDM που είναι αφιερωμένα για την TPS σηματοδοσία στην λειτουργία 4K φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

TPS carrier indices for 4K mode											
34	50	209	346	413	569	595	688	790	901	1 073	1 219
1 262	1 286	1 469	1 594	1 687	1 738	1 754	1 913	2 050	2 117	2 273	2 299
2 392	2 494	2 605	2 777	2 923	2 966	2 990	3 173	3 298	3 391		

Σχήμα 15: Τα κανάλια του OFDM που είναι αφιερωμένα για την TPS σηματοδοσία

Επίπεδο ζεύξης δεδομένων στο DVB-H [1] [2]

Οι διαφορές του από το DVB-T όσον αφορά με το επίπεδο ζεύξης δεδομένων αφορούν τον μηχανισμό τεμαχισμού χρόνου (time slicing) ο οποίος μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και επιτρέπει ομαλό και διαφανές handover καθώς και την προσθήκη ενός επιπλέον μηχανισμού για διόρθωση λαθών στα δεδομένα MPE (Multiprotocol Encapsulation data) ο οποίος ονομάζεται MPE-FEC.

Η χρήση του time slicing θεωρείται υποχρεωτική από το πρότυπο, ενώ ο μηχανισμός MPE-FEC προαιρετικός. Παρακάτω αναλύονται οι δύο μηχανισμοί.

Πακέτα MPE (MultiProtocol Encapsulation Packets)

Τα πακέτα MPE αποτελούν την θεμελιώδη δομή μεταφοράς του επιπέδου ζεύξης δεδομένων του προτύπου DVB-H. Σκοπό έχουν την ενθυλάκωση πακέτων επιπέδου δικτύου. Κάθε IP πακέτο ενθυλακώνεται σε ένα ακριβώς MPE πακέτο. Το μέγιστο επιτρεπτό μέγεθος του IP πακέτου είναι 4080 bytes, συμπεριλαμβανομένης της επικεφαλίδας IP. Τα MPE πακέτα έχουν επικεφαλίδα μήκους 16 bytes, οπότε το μέγιστο μέγεθος ενός MPE πακέτου είναι τα 4096 bytes.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα πεδία της MPE επικεφαλίδας.

Syntax	Number of bits	Mnemonic
datagram_section() {		
table_id	8	uimsbf
section_syntax_indicator	1	bslbf
private_indicator	1	bslbf
reserved	2	bslbf
section_length	12	uimsbf
MAC_address_6	8	uimsbf
MAC_address_5	8	uimsbf
reserved	2	bslbf
payload_scrambling_control	2	bslbf
address_scrambling_control	2	bslbf
LLC_SNAP_flag	1	bslbf
current_next_indicator	1	bslbf
section_number	8	uimsbf
last_section_number	8	uimsbf
MAC_address_4	8	uimsbf
MAC_address_3	8	uimsbf
MAC_address_2	8	uimsbf
MAC_address_1	8	uimsbf
if (LLC_SNAP_flag == "1") {		
LLC_SNAP()		
} else {		
for (j=0; j<N1; j++) {		
IP_datagram_data_byte	8	bslbf
}		
}		
if (section_number == last_section_number) {		
for (j=0; j<N2; j++) {		
stuffing_byte	8	bslbf
}		
}		
if (section_syntax_indicator == "0") {		
checksum	32	uimsbf
} else {		
CRC_32	32	rpchbf
}		
}		

Πίνακας 1: Πεδία που προστείνονται κατά την MPE ενθυλάκωση

Table_id : Πεδίο 8 bits που το πρότυπο ορίζει να έχει πάντα τιμή 0x3E. Η τιμή αυτή υποδηλώνει ότι χρησιμοποιείται η μέθοδος ενθυλάκωσης MPE.

Section_syntax_indicator : Πεδίο ενός bit. Αν αυτό είναι μηδέν, το MPE πακέτο χρησιμοποιεί τον κώδικα ανίχνευσης λαθών checksum, αλλιώς χρησιμοποιείται ο CRC32.

Private_indicator: Πεδίο ενός bit. Προσδιορίζει αν το MPE πακέτο είναι κρυπτογραφημένο ή όχι.

Reserved: Πεδίο συνολικά 4 bits. Φυλάσσεται για μελλοντική χρήση.

Section_length: Πεδίο 12 bits. Καθορίζει το συνολικό μέγεθος του MPE πακέτου.

MAC_address_[1...6] : Πεδίο 48 bits. Περιέχει την διεύθυνση MAC του παραλήπτη. Η διεύθυνση διαχωρίζεται σε 6 πεδία των 8 bits. Το πεδίο MAC_address_1 περιέχει το πρώτο byte της διεύθυνσης (most significant byte), ενώ το MAC_address_6 το τελευταίο byte (least significant byte).

Το πεδίο αυτό στο πρότυπο DVB-H αποκτάει μια διαφορετική σημασία. Τα πεδία MAC_address_1 ως και MAC_address_4, μεγέθους συνολικά 32 bits περιέχουν πληροφορίες πραγματικού χρόνου, όπως το πεδίο delta_t.

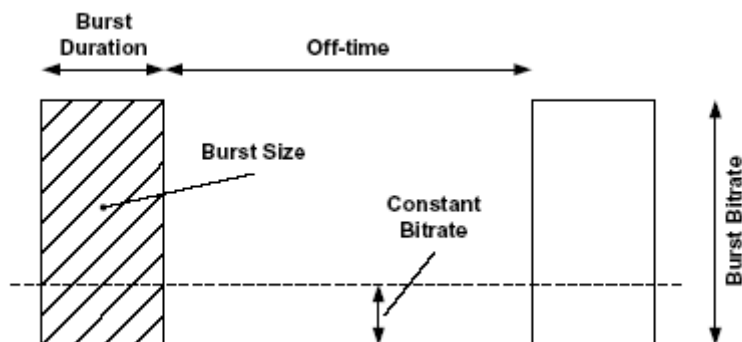
Payload_scrambling_control : Πεδίο 2 bits. Προσδιορίζει τον τύπο scrambling που χρησιμοποιείται στο ωφέλιμο φορτίο του MPE πακέτου. Ο τύπος scrambling ορίζεται από τον χρήστη, ενώ το scrambling δεν γίνεται στο πεδίο checksum ή CRC32.

value	payload scrambling control
00	unscrambled
01	defined by service
10	defined by service
11	defined by service

Σχήμα 16: Επιλογές για το πεδίο Payload_scrambling_control του MPE header

Time slicing

Ο σκοπός του μηχανισμού τεμαχισμού χρόνου (time slicing) είναι να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να βοηθήσει στο ομαλό και διαφανές handover του τερματικού. Ένα DVB σύστημα μετάδοσης μπορεί να επιτύχει ένα ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξεως των 30 Mbps. Τα κινητά τερματικά, κυρίως λόγω της οθόνης μικρών διαστάσεων, απαιτούν αρκετά μικρότερο εύρος ζώνης. Δίνεται λοιπόν η δυνατότητα για έναν μηχανισμό πολύπλεξης χρόνου. Με την χρησιμοποίηση του μηχανισμού, τα δεδομένα αποστέλλονται σε ριπές, με ρυθμό δεδομένων πολύ μεγαλύτερο συγκρινόμενο με τον ρυθμό που θα απαιτούνταν αν τα δεδομένα αποστέλλονταν με τους κανονικούς μηχανισμούς streaming του DVB-T. Τα λαμβανόμενα δεδομένα αποθηκεύονται σε έναν buffer, και μεγάλο μέρος από το κύκλωμα του δέκτη (συγκεκριμένα ο tuner και ο demodulator) απενεργοποιείται μέχρι να αδειάσει ο buffer. Για να γίνει γνωστό στον δέκτη του τερματικού πότε να περιμένει την επόμενη ριπή, ο χρόνος μέχρι την λήψη της επόμενης ριπής αναφέρεται μέσα στην τρέχουσα ριπή. Μεταξύ των ριπών για κάποιο δεδομένο τερματικό, το σύστημα μπορεί να μεταδίδει ριπές για άλλα τερματικά, αξιοποιώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Ο μηχανισμός δρα παρόμοια με ένα σύστημα TDM. Για να επιτευχθεί σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας, ο ρυθμός μετάδοσης των ριπών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δεκαπλάσιος από τον συνεχή ρυθμό που θα απαιτούσε η ίδια ποσότητα πληροφορίας. Για παράδειγμα, μια υπηρεσία με συνεχή ρυθμό 350 Kbps απαιτεί ρυθμό μετάδοσης ριπών 4 Mbps.

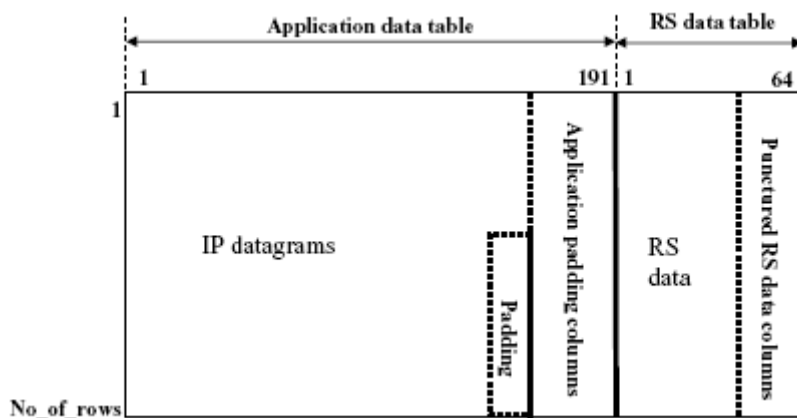


Σχήμα 17: Μηχανισμός time slicing

Επίσης, το πρότυπο υποστηρίζει την δυνατότητα να ελέγχει το τερματικό τις γειτονικές του κυψέλες, στο χρονικό διάστημα μεταξύ των ριπών. Με τον τρόπο αυτόν, το τερματικό μπορεί να λαμβάνει δεδομένα και από μια γειτονική κυψέλη, γεγονός πολύ χρήσιμο, διότι δεν διακόπτεται η ροή δεδομένων κατά την διαδικασία handover. Ο συγχρονισμός όμως των ροών αυτών δεν περιγράφεται από το πρότυπο. Ο μηχανισμός time slicing μπορεί να κρατήσει απενεργοποιημένο τον δέκτη του τερματικού από 70% μέχρι και 90% του χρόνου, επιμηκύνοντας την διάρκεια ζωής της μπαταρίας κατά το ίδιο ποσοστό. Ο μηχανισμός είναι υποχρεωτικός κατά το πρότυπο.

Μηχανισμός MPE-FEC

Ο σκοπός του μηχανισμού MPE-FEC είναι να βελτιώσει τον λόγο φέροντος προς θόρυβο και να αυξήσει την αντοχή στις παρεμβολές. Ουσιαστικά αποτελεί ένα επιπλέον επίπεδο διόρθωσης λαθών (FEC – Forward Error Correction) στο επίπεδο MPE. Χρησιμοποιεί την μέθοδο Reed-Solomon (RS) για την διόρθωση των σφαλμάτων. Προστίθεται επιπλέον πληροφορία ισοτιμίας (parity), η οποία υπολογίζεται από τα πακέτα IP. Η διαδικασία έχει ως εξής : Κάθε MPE-FEC πλαίσιο μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας πίνακας 255 στηλών και μεταβλητό αριθμό σειρών με μέγιστο το 1024. Οι πρώτες 191 στήλες γεμίζουν με IP δεδομένα, ενώ οι υπόλοιπες 64 με bytes που δημιουργούνται από την μέθοδο RS.



Σχήμα 18 : Δημιουργία πλαισίου MPE-FEC

Όταν γεμίσουν οι στήλες δεδομένων, υπολογίζονται οι στήλες RS. Χρησιμοποιείται ο κώδικας RS (255,191). Έπειτα τα πλαίσια MPE αποστέλλονται ξεχωριστά από τα δεδομένα RS. Σε όλο το MPE-FEC πλαίσιο εκτελείται ο αλγόριθμος ανίχνευσης λαθών CRC-32. Στην πλευρά του παραλήπτη, αρχικά τοποθετούνται τα πακέτα MPE σε έναν παρόμοιο πίνακα και ελέγχεται το πεδίο CRC-32. Αν δεν βρεθεί λάθος, δεν λαμβάνεται υπόψιν το πλαίσιο MPE-FEC. Αν όμως βρεθεί, η επιπλέον πληροφορία από το MPE-FEC χρησιμοποιείται για την διόρθωση των λαθών. Μπορούν να διορθωθούν μέχρι και 64 bytes σε μια λέξη 255 bytes.

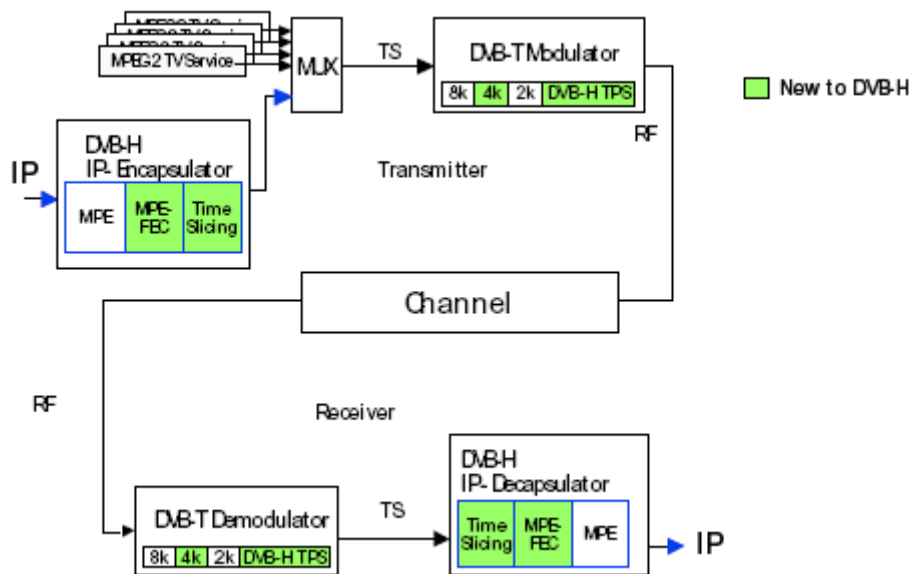
Η πληροφορία αυτή αποστέλλεται ξεχωριστά από τα δεδομένα από τα οποία προήλθε, βελτιώνοντας κατά πολύ τον ρυθμό λαθών, ακόμα και σε πολύ κακές συνθήκες λήψης. Ο μηχανισμός είναι προαιρετικός σύμφωνα με το πρότυπο.

Με το MPE-FEC καταναλώνεται αρκετό εύρος ζώνης για διόρθωση λαθών. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχτεί ότι με περίπου 25% πλεονάζουσα πληροφορία, η ποιότητα λήψης της (μικρής) κεραίας του τερματικού, είναι ανάλογη με τις κεραίες που χρησιμοποιούνται στο DVB-T. Επίσης, η πλεονάζουσα πληροφορία μπορεί να αντισταθμιστεί πλήρως επιλέγοντας έναν πιο αδύναμο αλλά και πολύ πιο γρήγορο ρυθμό μετάδοσης κωδικών. Για παράδειγμα, σήμα με κωδικοποίηση 16 QAM, MPE-FEC και ρυθμό συμβόλων 2/3 έχει την ίδιο throughput με σήμα κωδικοποιημένο με 16 QAM, ρυθμό συμβόλων 1 / 2 χωρίς MPE-FEC, αλλά με πολύ καλύτερη απόδοση. Έτσι, επιτυγχάνεται πολύ καλύτερη απόδοση από το DVB-T (χωρίς MPE-FEC) για το ίδιο throughput. Τέλος, ο μηχανισμός προστατεύει αποτελεσματικά και από παρεμβολές. Είναι χρήσιμο να αναφερθεί, ότι ο MPE-FEC λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε τερματικά που δεν τον υποστηρίζουν να μπορούν να λάβουν σωστά τα πακέτα, χωρίς βέβαια να επωφελούνται από τις δυνατότητες του.

Στην περίπτωση όπου οι μηχανισμοί time slicing και MPE-FEC λειτουργούν μαζί (γεγονός που το τερματικό το καταλαβαίνει από την σηματοδότηση του DVB-H) θα πρέπει η κάθε ριπή να μεταφέρει ακριβώς ένα MPE-FEC πλαίσιο.

Βελτίωση του προτύπου

Έπειτα από την μελέτη των μηχανισμών που παρουσιάζονται μόνο στο πρότυπο DVB-H μπορούμε να εξηγήσουμε καλύτερα την λειτουργία του προτύπου. Το DVB-H αν και δημιουργήθηκε αρχικά για την broadcast μετάδοση πολυμεσικών εφαρμογών σε handheld τερματικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα πρότυπο μετάδοσης υψηλού ρυθμού δεδομένων για κάθε εφαρμογή. Η λειτουργία του DVB-H φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 19: Λειτουργία του DVB-H

Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι μηχανισμοί του DVB-H ενσωματώνονται στην υποδομή του DVB-T. Τα IP πακέτα μπορούν να πολυπλεχθούν με πακέτα MPEG-2 που χρησιμοποιούνται στην ψηφιακή τηλεόραση και να σταλούν σαν μια ροή στον DVB-T κωδικοποιητή.

Πέρα από την ενοποίηση των δύο προτύπων, το DVB-H παρέχει την υπηρεσία IP Datacast (IPDC) [5] [6] [7] [8]. Η υπηρεσία προσφέρει την broadcast μετάδοση περιεχομένου πάνω από IP και πάνω από το DVB-H σύστημα μετάδοσης. Παρέχει έτσι την δυνατότητα μετάδοσης οποιουδήποτε τύπου υπηρεσίας (όχι μόνο πολυμεσικής) σε handheld τερματικά με αρκετά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Επίσης δίνει την δυνατότητα μιας μελλοντικής ενοποίησης των δικτύων DVB-H και GPRS/3G για την εξασφάλιση αμφίδρομης επικοινωνίας του DVB-H συστήματος, για μεταφορά DVB δεδομένων μέσω UMTS ή ακόμα και την ολοκληρωτική ενοποίηση των δύο προτύπων μέσω του πρωτοκόλλου IP.

Για την υπηρεσία IPDC αξίζει να αναφέρουμε ότι λειτουργεί πάνω από το επίπεδο MPE. Ουσιαστικά ασχολείται με το είδος των υπηρεσιών που μεταδίδονται με το σύστημα DVB-H. Ορίζει υπηρεσίες και προγράμματα που μεταφέρονται στο τερματικό μέσω ροών μεταφοράς (transport streams) του DVB-H. Κάθε τέτοια ροή μεταφέρει πολυπλεγμένα δεδομένα και μεταδίδεται από ένα ή παραπάνω σήματα του συστήματος μεταφοράς. Επίσης, το IPDC ορίζει μεταβλητές, για τον έλεγχο των IP δεδομένων, όπως ο τρόπος αποπολύπλεξης, και παρέχει επιπλέον πληροφορίες για τον χρήστη του τερματικού.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσαμε να πούμε, ότι η υπηρεσία IPDC βελτιώνει την απόδοση του DVB-H και του προσδίδει την δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων οποιουδήποτε είδους.

Συμπεράσματα

Το πρότυπο DVB-H παρουσιάζει ένα σύστημα broadcast μετάδοσης με έμφαση στην μεταφορά πολυμεσικών δεδομένων και αρκετά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, το οποίο είναι ειδικά προσαρμοσμένο για χρήστες handheld τερματικών. Βασίζεται κατά πολύ στο πρότυπο DVB-T, προσαρμόζοντας το ουσιαστικά, για να αντεπεξέλθει στις

ιδιαίτερες ανάγκες τέτοιων τερματικών. Βασικό του χαρακτηριστικό αποτελεί η μετάδοση με βάση τα IP πακέτα.

Το DVB-H τυποποιήθηκε το 2004. Από μόνο του το γεγονός ότι είναι ένα εξαιρετικά πρόσφατο πρότυπο, συνεπάγεται ότι υπάρχουν θέματα τα οποία δεν έχουν ακόμα λυθεί. Συγκεκριμένα, το πρότυπο ακόμα ελέγχεται όσον αφορά την απόδοσή του σε πραγματικές συνθήκες. Επίσης, δεν υπάρχει ακόμα υλοποίηση σε hardware για τον μηχανισμό MPE-FEC. Πέρα από αυτά τα προβλήματα πάντως, το DVB-H έχει όλες τις προδιαγραφές για να αποτελέσει ένα σημαντικό πρότυπο.

Πρόγραμμα IP encapsulator / de-encapsulator

Το πρόγραμμα που έχει δημιουργηθεί, υλοποιεί τους μηχανισμούς time-slicing και MPE-FEC του επιπέδου ζεύξης δεδομένων του προτύπου DVB-H. Η υλοποίηση των μηχανισμών αυτών έχει γίνει και για τον DVB-H πομπό όσο και για τον DVB-H δέκτη. Η ονομασία του, IP encapsulator για τον πομπό και IP de-encapsulator για τον δέκτη, γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο, το οποίο ορίζει με την ονομασία αυτή μια οντότητα η οποία εφαρμόζει τους νέους αυτούς μηχανισμούς του επιπέδου ζεύξης δεδομένων του DVB-H. Ο κώδικας έχει ενσωματωθεί σε ένα πρότυπο εργαστηριακό δίκτυο DVB-H με εξοπλισμό και αρχιτεκτονική τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Αρχιτεκτονική DVB-H δικτύου

Προκειμένου να δοκιμαστεί ο κώδικας IP encapsulator / de-encapsulator δημιουργήθηκε ένα πρότυπο δίκτυο DVB-H στο εργαστήριο. Το δίκτυο αποτελείται από τα εξής δομικά στοιχεία:

- PC με λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows XP για μετάδοση DVB-H δεδομένων στο οποίο λειτουργεί ο κώδικας του IP encapsulator.
- PC με λειτουργικό σύστημα Linux για αποστολή DVB-H δεδομένων στο οποίο έχει συνδεθεί μια ειδική PCI-to-ASI κάρτα η οποία έχει έξοδο που συνδέεται με καλώδιο προσαρμογέα BNC.
- DVB-H modulator
- Ενισχυτής UHF Σήματος και Κεραία μετάδοσης UHF
- Δέκτης DVB-H και DVB-H de-modulator
- PC με λειτουργικό σύστημα Linux για λήψη DVB-H δεδομένων στο οποίο έχει συνδεθεί μια ειδική ASI κάρτα η οποία έχει είσοδο που συνδέεται με καλώδιο προσαρμογέα BNC.
- PC με λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows XP το οποίο περιλαμβάνει τον κώδικα του IP de-encapsulator.

Το δίκτυο είναι SFN (Single Frequency Network) και χρησιμοποιεί το κανάλι 29 στην ζώνη συχνοτήτων UHF.

PC για κωδικοποίηση DVB-H δεδομένων

Το PC για δημιουργία DVB-H δεδομένων αποτελεί το πρώτο δομικό στοιχείο στην αλυσίδα μετάδοσης των DVB-H δεδομένων. Χρησιμοποιείται για να εκτελεστεί ο κώδικας IP encapsulator. Ο κώδικας έχει υλοποιηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++, συνεπώς δεν απαιτείται να εκτελείται κάποια επιπλέον εφαρμογή στο PC. Το PC έχει επεξεργαστή AMD Athlon 64 bit 2800+, χρονισμένο στα 1,80 GHz και μνήμη RAM 512 MB. Το λειτουργικό σύστημα είναι Microsoft Windows XP Pro SP2. Ο κώδικας μπορεί να εκτελεστεί ανεξαρτήτως επεξεργαστή και μνήμης RAM, αλλά ισχυρότεροι επεξεργαστές και περισσότερη ποσότητα μνήμης, βοηθούν στην ταχύτερη εκτέλεση του κώδικα.

PC για μετάδοση DVB-H δεδομένων με ενσωματωμένη κάρτα PCI-to-ASI

Το PC για μετάδοση DVB-H δεδομένων διαθέτει μια κάρτα PCI-to-ASI η οποία έχει έξοδο που συνδέεται με καλώδιο προσαρμογέα BNC. Η κάρτα αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου να συνδεθεί το PC με τον DVB-H modulator. Η κάρτα είναι η DVB Master III Tx από την εταιρεία DVEO. Έχει την δυνατότητα να λαμβάνει οποιαδήποτε μορφής δεδομένα και να εξάγει ένα DVB ASI σήμα μέσω ομοαξονικού καλωδίου. Το DVB ASI σήμα αποτελείται από μια συνεχή ροή TS πακέτων των 188 ή 204 bytes. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων της κάρτας DVB Master III Tx είναι 200 Mbits/sec. Επίσης διαθέτει buffers μεγέθους 20 KB και υποστηρίζει μετάδοση με ριπές δεδομένων. Τέλος, η κάρτα παρέχεται με Software Development Kit (SDK) σε γλώσσα προγραμματισμού C, για τον χειρισμό της κάρτας σε custom εφαρμογές. Το SDK που παρέχεται με την κάρτα είναι περιορισμένων δυνατοτήτων για περιβάλλον Windows. Η εταιρεία DVEO παρέχει ένα επιπλέον πακέτο λογισμικού για την αποτελεσματικότερη διαχείριση της PCI-to-ASI κάρτας, το οποίο διαθέτει με επιπλέον κόστος. Αντίθετα, το ίδιο επιπλέον πακέτο λογισμικού η εταιρεία το προσφέρει δωρεάν για περιβάλλον Linux. Για τον παραπάνω λόγο, αλλά και για την καλύτερη αποσύνδεση του IP Encapsulator από το DVB-H δίκτυο διανομής, επιλέχτηκε η αρχιτεκτονική με τα δύο επιπλέον τερματικά Linux.

Στο PC με την PCI-to-ASI κάρτα, έχει υλοποιηθεί ένας Socket Server ο οποίος λαμβάνει την κάθε ριπή που αποστέλλει το πρόγραμμα IP Encapsulator και την προωθεί στους εσωτερικούς buffers της κάρτας PCI-to-ASI. Έπειτα, η κάρτα αναλαμβάνει να στείλει την ριπή δεδομένων στην ASI έξοδο με ρυθμό μετάδοσης 1,5 Mbit/sec.

DVB-H modulator

Το επόμενο στοιχείο στην αλυσίδα μετάδοσης DVB-H είναι ο διαμορφωτής σήματος DVB-H (DVB-H modulator). Ο modulator εκτελεί όλες τις διαδικασίες του φυσικού επιπέδου του προτύπου DVB-H : Προσαρμογή των TS πακέτων, εσωτερική και εξωτερική κωδικοποίηση και διαστρωμάτωση, απεικόνιση και διαμόρφωση σήματος και τέλος μετάδοση με την τεχνική OFDM. Ο modulator υλοποιεί όλους τους επιπλέον μηχανισμούς φυσικού επιπέδου του DVB-H όπως η κατάσταση 4K mode, η επιπλέον σηματοδότηση TPS και ο in depth interleaver για τις καταστάσεις 2K και 4K. Παράλληλα, μπορεί να λειτουργήσει και ως DVB-T modulator. Ο modulator είναι ο

SMX 600 COFDM Modulator της εταιρείας SODIELEC. Δέχεται σαν είσοδο μια ροή πακέτων TS και εξάγει ένα UHF σήμα στις συχνότητες από 470-860 MHz (UHF κανάλια από 21 έως 69). Ο modulator επιτρέπει ισχύ εξόδου του σήματος από 0 έως +10 dBm . Η ισχύς εξόδου μπορεί να αυξομειωθεί με βήμα 0,1 dBm.

Ενισχυτής UHF Σήματος και Κεραία μετάδοσης UHF

Ο ενισχυτής UHF σήματος λαμβάνει το UHF σήμα από τον modulator με ισχύ 0 - +10 dBm και εξάγει το σήμα με αυξημένη ισχύ. Η αύξηση της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος είναι απαραίτητη προκειμένου η DVB-H μετάδοση να έχει μεγαλύτερη εμβέλεια. Η έξοδος του ενισχυτή προωθείται σε μια κεραία UHF η οποία εκπέμπει το σήμα στο κανάλι 29 στα UHF.

Δέκτης DVB-H και DVB-H de-modulator

Ο δέκτης DVB-H έχει ενσωματωμένο και τον DVB-H de-modulator, ο οποίος αναλαμβάνει να εκτελέσει την διαδικασία απο-κωδικοποίησης του φυσικού επιπέδου του DVB. Λαμβάνει το RF σήμα, και εξάγει μια ροή TS πακέτων μεγέθους 188 bytes. Η έξοδος του δέκτη DVB-H συνδέεται με καλώδιο προσαρμογέα BNC με την κάρτα ASI-to-PCI.

PC για λήψη DVB-H δεδομένων

Το PC για λήψη DVB-H δεδομένων διαθέτει μια κάρτα ASI-to-PCI η οποία έχει είσοδο που συνδέεται με καλώδιο προσαρμογέα BNC. Η κάρτα αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου να συνδεθεί το PC με τον DVB-H δέκτη. Η κάρτα είναι η DVB Master III Rx από την εταιρεία DVEO. Έχει την δυνατότητα να λαμβάνει ροές TS πακέτων από ASI είσοδο και να εξάγει στο τερματικό τα πακέτα αυτά. Ουσιαστικά αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ των μηχανημάτων του δικτύου DVB-H με το πρόγραμμα IP de-Encapsulator. Διαθέτει buffers μεγέθους 20 KB και υποστηρίζει λήψη ριπών δεδομένων. Τέλος, η κάρτα παρέχεται με Software Development Kit (SDK) σε γλώσσα προγραμματισμού C για την σύνδεση μεταξύ της κάρτας και του προγράμματος IP de-encapsulator. χειρισμό της κάρτας σε custom εφαρμογές. Το SDK που παρέχεται με την κάρτα είναι περιορισμένων δυνατοτήτων για περιβάλλον Windows. Η εταιρεία DVEO παρέχει ένα επιπλέον πακέτο λογισμικού για την αποτελεσματικότερη διαχείριση της ASI-to-PCI κάρτας, το οποίο διαθέτει με επιπλέον κόστος. Αντίθετα, το ίδιο επιπλέον πακέτο λογισμικού η εταιρεία το προσφέρει δωρεάν για περιβάλλον Linux. Για τον παραπάνω λόγο, αλλά και για την καλύτερη αποσύνδεση του IP de-Encapsulator από το DVB-H δίκτυο διανομής, επιλέχτηκε η αρχιτεκτονική με τα δύο επιπλέον τερματικά Linux.

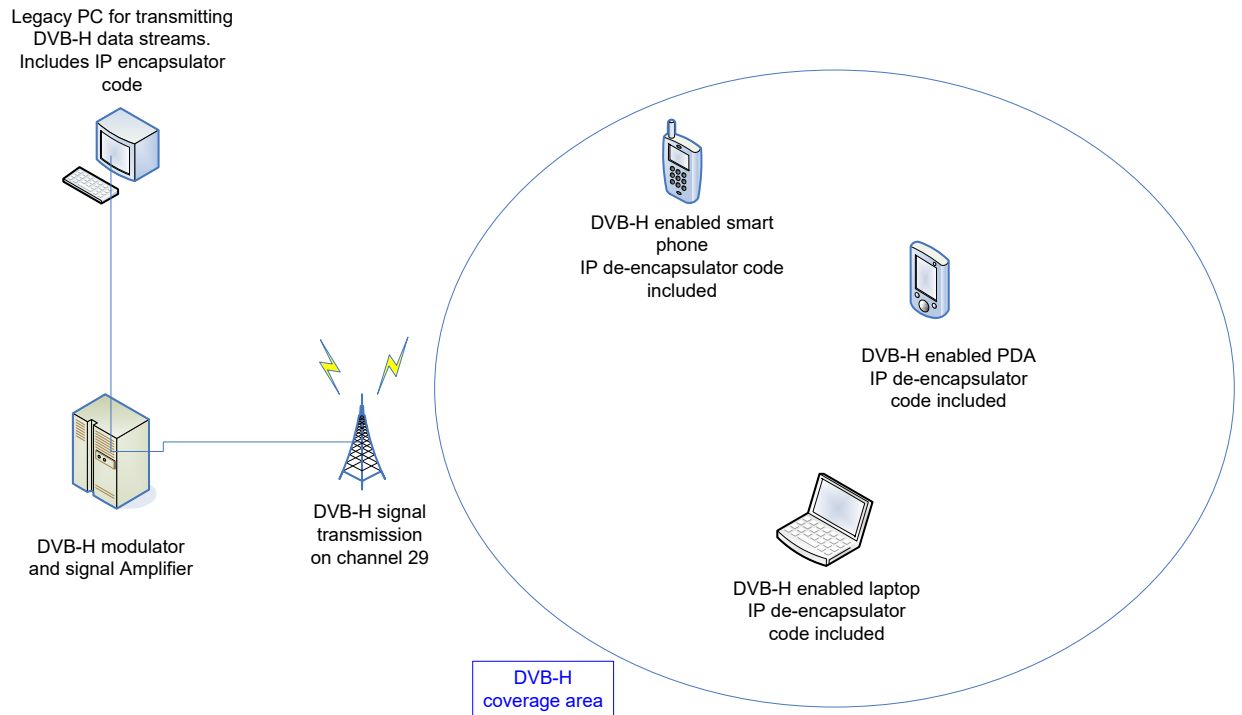
Στο PC με την ASI-to-PCI κάρτα, έχει υλοποιηθεί ένας Socket Client ο οποίος προωθεί την κάθε ριπή που λαμβάνει η κάρτα ASI-to-PCI στο πρόγραμμα IP de-Encapsulator.

PC για απο-κωδικοποίηση DVB-H δεδομένων

Το PC για την απο-κωδικοποίηση των DVB-H δεδομένων αποτελεί το τελευταίο δομικό στοιχείο στην αλυσίδα λήψης των DVB-H δεδομένων. Χρησιμοποιείται για να εκτελεστεί ο κώδικας του IP de-encapsulator. Ο κώδικας έχει υλοποιηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++, συνεπώς δεν απαιτείται να εκτελείται κάποια επιπλέον εφαρμογή στο PC. Ο IP de-encapsulator λαμβάνει μια ριπή πακέτων TS και εξάγει IP πακέτα. Το PC έχει επεξεργαστή AMD Athlon 64 bit 2800+, χρονισμένο στα 1,80 GHz και μνήμη RAM 512 MB. Το λειτουργικό σύστημα είναι Microsoft Windows XP Pro SP2. Ο κώδικας μπορεί να εκτελεστεί ανεξαρτήτως επεξεργαστή και μνήμης RAM, αλλά ισχυρότεροι επεξεργαστές και περισσότερη ποσότητα μνήμης, βοηθούν στην ταχύτερη εκτέλεση του κώδικα. Γενικά, ο IP de-encapsulator απαιτεί περισσότερους υπολογιστικούς πόρους για να εκτελεστεί, από τον IP encapsulator και προτείνεται να μην εκτελείται παράλληλα με άλλα προγράμματα.

Ο δέκτης DVB-H, το τερματικό με την κάρτα ASI-to-PCI και ο IP de-encapsulator αποτελούν τον DVB-H δέκτη και εκτελούνται από διαφορετικές οντότητες στο πρότυπο εργαστηριακό δίκτυο DVB-H που δημιουργήθηκε. Υπό συνθήκες πραγματικής λειτουργίας του DVB-H δικτύου, οι τρεις αυτές οντότητες υλοποιούνται στο DVB-H enabled τερματικό χειρός, το οποίο μπορεί να είναι smart phone, PDA ή ακόμα και φορητός υπολογιστής (laptop). Για τις ανάγκες υλοποίησης του προγράμματος του IP de-encapsulator όμως, είναι αναγκαία η συγκεκριμένη δομή του DVB-H δέκτη.

Η αρχιτεκτονική του πρότυπου DVB-H δικτύου που περιγράφηκε, φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

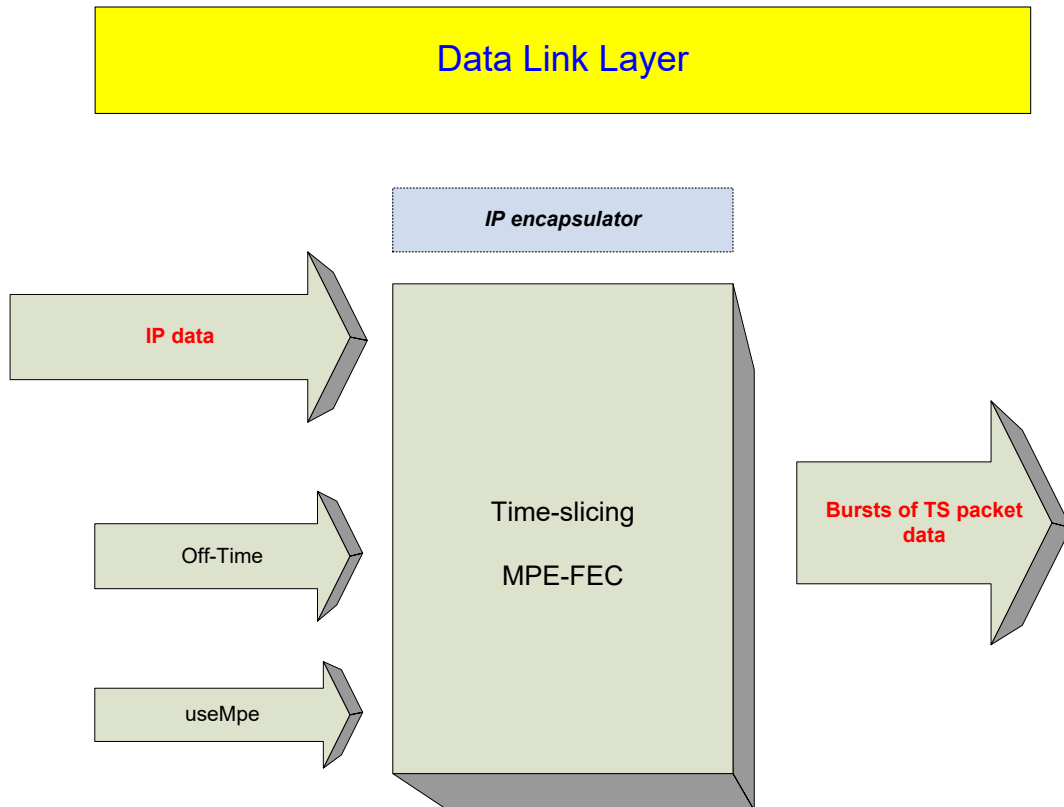


Σχήμα 20: Η αρχιτεκτονική του DVB-H δικτύου

Λεπτομερής περιγραφή IP encapsulator

Το πρόγραμμα IP Encapsulator αναλαμβάνει τις λειτουργίες επιπέδου ζεύξης δεδομένων του πομπού DVB-H. Δέχεται δεδομένα επιπέδου δικτύου, εκτελεί τους μηχανισμούς time slicing και MPE-FEC και εξάγει TS πακέτα. Το πρόγραμμα έχει δημιουργηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Η γλώσσα C++ έχει συγκριτικά γρηγορότερη ταχύτητα εκτέλεσης από άλλες γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου όπως η Java. Επίσης, παρέχει πληθώρα βιβλιοθηκών για την υλοποίηση δικτυακών εφαρμογών. Το εργαλείο ανάπτυξης του προγράμματος είναι το Microsoft Visual Studio v6.0 Enterprise Edition.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα εισόδου-εξόδου του προγράμματος IP Encapsulator.



Σχήμα 11: Είσοδος και έξοδος του προγράμματος IP Encapsulator

Ο IP Encapsulator δέχεται στην είσοδό του δεδομένα επιπέδου δικτύου. Μια μικρή προσαρμογή έχει γίνει στο πρόγραμμα, προκειμένου να δέχεται σαν είσοδο αρχεία δεδομένων οποιουδήποτε μεγέθους και να τα μετασχηματίζει σε IP πακέτα. Το μέγεθος των IP πακέτων είναι 1500 bytes, τιμή συνηθισμένη σε Ethernet δίκτυα. Το μέγεθος του IP πακέτου είναι σταθερό.

Ο πίνακας MPE-FEC έχει σταθερό πλήθος γραμμών ίσο με 1024. Αυτή η τιμή είναι η μεγαλύτερη που ορίζει το πρότυπο και παρέχει το μεγαλύτερο Throughput. Το πρόγραμμα εκτελεί πάντα τον μηχανισμό Time-Slicing ο οποίος αποστέλλει δεδομένα σε ριπές χωρίς τα bytes ισοτιμίας του μηχανισμού MPE-FEC. Ο χρήστης έχει την επιλογή να χρησιμοποιήσει ή όχι τον μηχανισμό MPE-FEC μέσω της μεταβλητής useMpe που εισάγει. Ο μηχανισμός MPE-FEC θεωρείται προαιρετικός από το πρότυπο. Αν χρησιμοποιηθεί αποστέλλονται περίπου 250 KBytes ανά ριπή, ενώ αν δεν χρησιμοποιηθεί αποστέλλονται περίπου 190 KBytes.

Τέλος, ο χρήστης ορίζει την μεταβλητή Off-Time η οποία χρησιμοποιείται από τον μηχανισμό Time-Slicing. Η μεταβλητή Off-Time εκφράζεται σε seconds και επηρεάζει την εξοικονόμηση ενέργειας του μηχανισμού Time-Slicing.

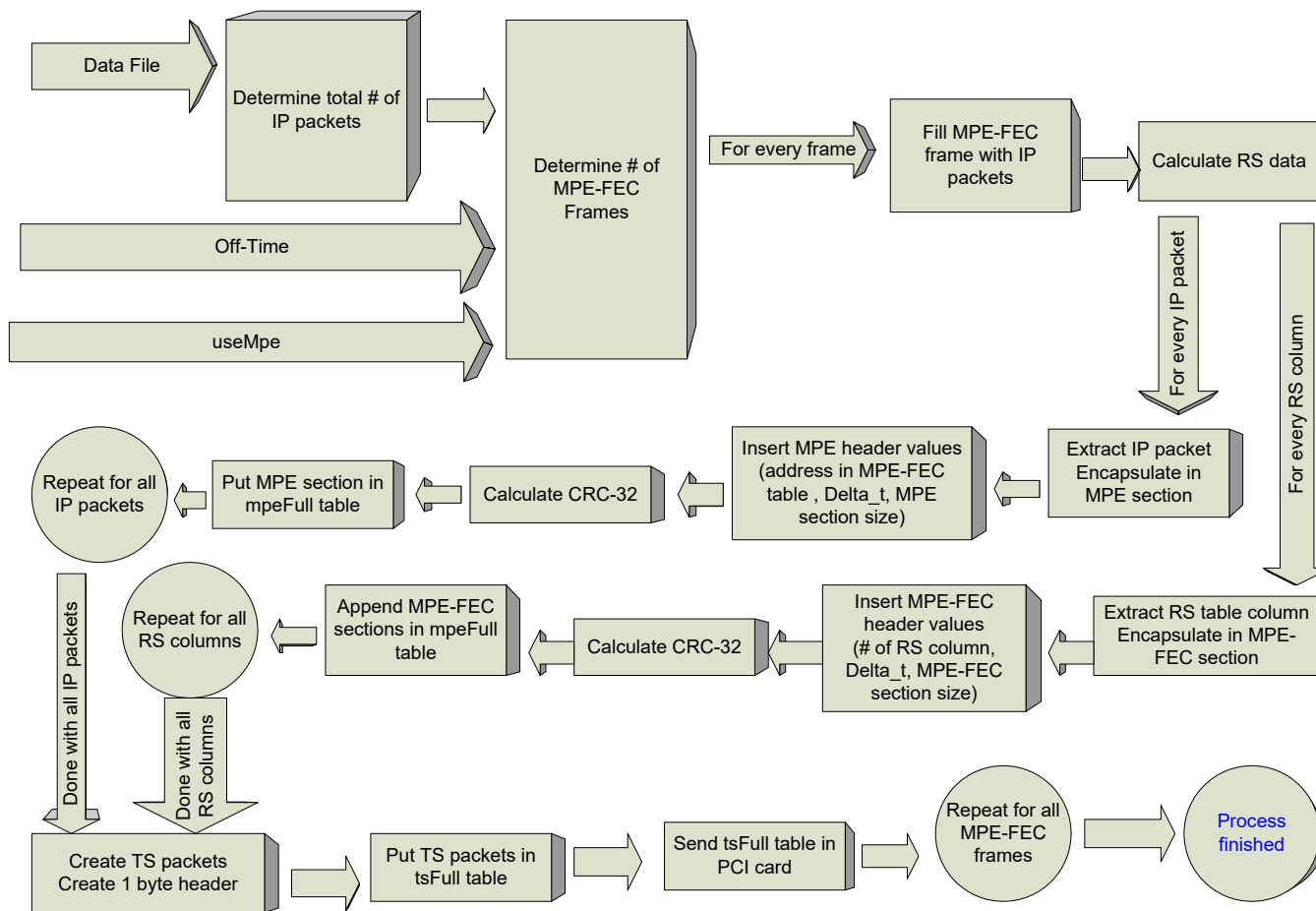
Η έξοδος του IP Encapsulator είναι ριπές Transport Stream πακέτων. Οι ριπές αυτές έχουν συγκεκριμένο μέγεθος και μεταδίδονται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, ανάλογα με τις τιμές που έχουν δοθεί στην είσοδο του προγράμματος.

Ο IP Encapsulator αποτελείται από το κύριο αρχείο **ipGen.cpp** αλλά και τα αρχεία: **berlekamp.cpp**

crc.c
crc.h
ecc.h
galois.cpp
rs.cpp
ws-util.cpp
ws-util.h

Περιγραφή λειτουργιών του IP Encapsulator

Στο σημείο αυτό εξηγείται η αλυσίδα διαδικασιών που εκτελείται από το πρόγραμμα. Η αλυσίδα διαδικασιών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 22: Η αλυσίδα διαδικασιών που εκτελεί ο IP Encapsulator

Σε πρώτη φάση, ο IP Encapsulator υπολογίζει το συνολικό πλήθος των IP πακέτων που θα πρέπει να αποστείλει. Το πλήθος αυτό υπολογίζεται από το αρχείο δεδομένων που εισάγει ο χρήστης προς αποστολή.

Έπειτα, με βάση την μεταβλητή useMpe που ορίζει την χρήση ή όχι του μηχανισμού MPE-FEC υπολογίζεται το συνολικό φορτίο που μπορεί να αποστείλει το πρόγραμμα σε μία ριπή δεδομένων. Με βάση αυτό, υπολογίζει το πλήθος των IP πακέτων που αποστέλλονται σε μία ριπή, καθώς και το πλήθος των bytes με τιμή μηδέν (parity bytes) που απαιτούνται προκειμένου να είναι πλήρως γεμάτος ο πίνακας δεδομένων εφαρμογής σε κάθε ριπή. Το πρότυπο DVB-H δεν επιτρέπει τον τεμαχισμό των IP πακέτων. Συνεπώς, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει το πλήθος των IP πακέτων ανά ριπή, αυτό γίνεται με βάση τον κανόνα : Όσα περισσότερα IP πακέτα στον πίνακα δεδομένων εφαρμογής, χωρίς να υπάρξει τεμαχισμός. Οι τελευταίες θέσεις του πίνακα, στις οποίες δεν χωρά ένα πλήρες πακέτο IP, γεμίζουν με parity bytes με τιμή μηδέν. Οπότε, τα parity bytes της κάθε ριπής, πλην της τελευταίας, θα είναι λιγότερα από το μήκος του IP πακέτου.

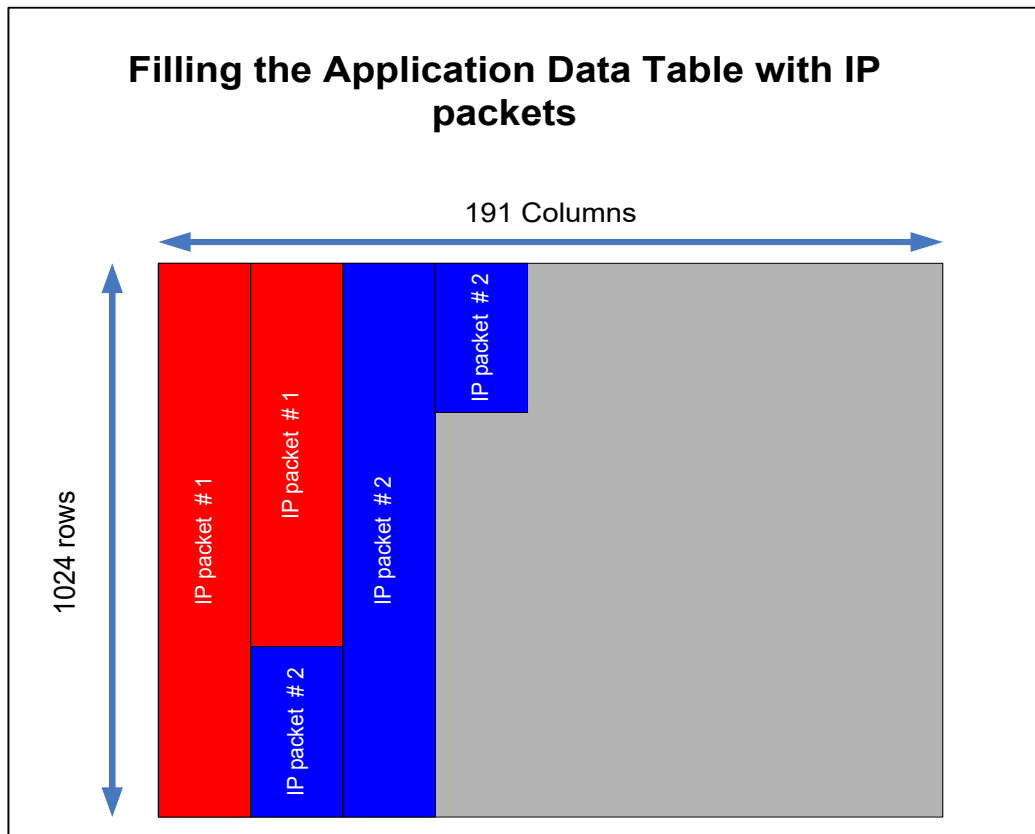
Το πλήθος των parity bytes θα είναι το ίδιο για κάθε ριπή πέραν της τελευταίας, η οποία θα περιέχει τα τελευταία bytes του αρχείου και πιθανότατα τα parity bytes θα είναι περισσότερα διότι δεν θα υπάρχουν άλλα δεδομένα προς αποστολή. Τέλος, το πρόγραμμα υπολογίζει τα συνολικά δεδομένα που αποστέλλονται σε κάθε ριπή. Η μεταβλητή αυτή ονομάζεται Burst Size. Το Burst Size θα είναι είτε 255×1024 , αν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC, είτε 191×1024 , αν δεν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC.

Έπειτα, υπολογίζει με βάση την μεταβλητή Off-Time που εισάγει ο χρήστης, τον χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών ριπών. Κατά τον χρόνο αυτό, ο IP Encapsulator περιμένει και δεν αποστέλλει νέα δεδομένα στον DVB-H Modulator.

Στο επόμενο βήμα, ο IP Encapsulator ασχολείται με την κάθε ριπή ξεχωριστά. Αρχικά δημιουργεί μια δομή πίνακα μεγέθους 255×1024 (=261120) θέσεων. Κάθε θέση αντιστοιχεί σε ένα byte.

Αν η μεταβλητή useMpe είναι ίση με μηδέν, τότε ο μηχανισμός MPE-FEC δεν εκτελείται και δημιουργείται ένας πίνακας 191 στηλών και 1024 γραμμών. Σε αντίθετη περίπτωση, ο μηχανισμός εκτελείται και δημιουργείται ένας πίνακας με 255 στήλες (από τις οποίες οι 191 είναι για IP δεδομένα) και 1024 γραμμές. Και στις δύο περιπτώσεις, ο πίνακας γεμίζει με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Αρχικά, το πρόγραμμα επιλέγει από την αρχή του αρχείου που έχει εισάγει ο χρήστης ένα πλήθος bytes ίσο με το μέγεθος του IP πακέτου που έχει εισάγει ο χρήστης μείον 20 bytes. Αυτά τα 20 bytes είναι η επικεφαλίδα του IP πακέτου και δημιουργείται από τον IP Encapsulator. Δημιουργείται και η επικεφαλίδα και το πακέτο αντιγράφεται στον MPE-FEC πίνακα. Τα IP πακέτα αντιγράφονται στον πίνακα χωρίς να μεσολαβούν άλλα bytes. Αμέσως μετά την αντιγραφή του τελευταίου byte ενός IP πακέτου ακολουθεί το πρώτο byte του επόμενου πακέτου. Το κάθε IP πακέτο τοποθετείται στον πίνακα κάθετα, ξεκινώντας από το πρώτο byte της πρώτης στήλης του πίνακα δεδομένων εφαρμογής. Αν η αντιγραφή του πακέτου στον πίνακα φτάσει στο σημείο όπου έχει γεμίσει η στήλη του πίνακα αλλά δεν έχει αντιγραφεί όλο το IP πακέτο, τότε η αντιγραφή του πακέτου συνεχίζεται στο πρώτο byte της επόμενης στήλης.

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσο και το πλήθος των IP πακέτων που αποστέλλονται σε μία ριπή (μεταβλητή που έχει υπολογιστεί παραπάνω).



Σχήμα 23: Η διαδικασία αντιγραφής των IP πακέτων στον πίνακα δεδομένων εφαρμογής

Η επικεφαλίδα IP είναι ίδια για κάθε IP πακέτο που δημιουργείται. Αποτελείται από τα εξής πεδία:

Version: Πεδίο 4 bits. Η έκδοση του IP πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται. Το πεδίο έχει τιμή 0x04. (IPv4).

IHL (Internet Header Length): Πεδίο 4 bits. Το μήκος της IP επικεφαλίδας. Έχει τιμή 20 ή 0x14.

TOS (Type Of Service): Πεδίο 8 bits. Χρησιμοποιείται για παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Τίθεται ίσο με μηδέν.

Total Length: Πεδίο 16 bits. Το συνολικό μήκος του IP πακέτου. Μέγιστη τιμή του πεδίου είναι από το πρότυπο DVB-H τα 4080 bytes. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση είναι 1500 Bytes.

Identification: Πεδίο 16 bits. Χρησιμοποιείται για να ξεχωρίσει τα τεμαχισμένα IP πακέτα. Το DVB-H δεν επιτρέπει τεμαχισμό των πακέτων (IP Fragmentation), οπότε το πεδίο τίθεται ίσο με μηδέν.

Flags: Πεδίο 3 bits. Χρησιμοποιείται για λειτουργίες τεμαχισμού, συνεπώς το πεδίο τίθεται ίσο με μηδέν.

Fragment Offset: Πεδίο 13 bits. Χρησιμοποιείται για λειτουργίες τεμαχισμού, συνεπώς το πεδίο τίθεται ίσο με μηδέν.

TTL (Time To Live): Πεδίο 8 bits. Καθορίζει τον χρόνο ζωής του πακέτου στο IP δίκτυο. Έχει τιμή 0x02.

Protocol: Πεδίο 8 bits. Καθορίζει το πρωτόκολλο του αμέσως ανώτερου επιπέδου. Το πρόγραμμα δημιουργεί τα IP πακέτα αμέσως από το αρχείο δεδομένων. Συνεπώς το πεδίο τίθεται ίσο με μηδέν.

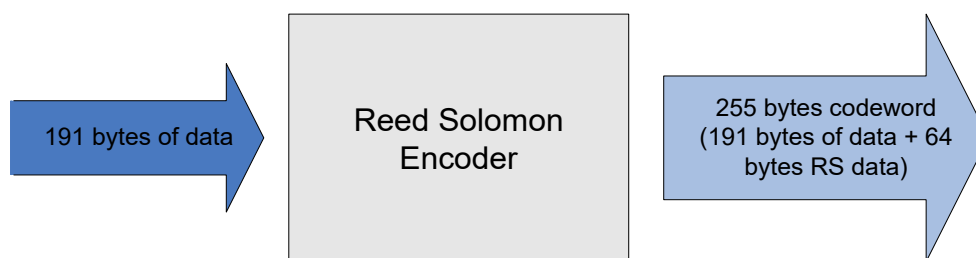
Header Checksum: Πεδίο 16 bits. Αποθηκεύεται το αποτέλεσμα του κώδικα ανίχνευσης λαθών checksum, για την επικεφαλίδα IP.

Source address: Πεδίο 32 bits. Η IP διεύθυνση του αποστολέα.

Destination address: Πεδίο 32 bits. Η IP διεύθυνση του παραλήπτη.

Εφόσον η παραπάνω διαδικασία έχει εκτελεστεί για τον μέγιστο αριθμό IP πακέτων ανά ριπή, το πρόγραμμα προσθέτει το πλήθος των parity bytes, τα οποία έχει υπολογίσει παραπάνω, και ο πίνακας δεδομένων εφαρμογής έχει γεμίσει πλήρως.

Η επόμενη διαδικασία εκτελείται μόνο στην περίπτωση όπου ο χρήστης έχει επιλέξει την χρήση του μηχανισμού MPE-FEC. Στο βήμα αυτό υπολογίζονται τα πεδία του πίνακα δεδομένων RS. Πρόκειται για τα bytes ισοτιμίας, τα οποία υπολογίζονται με τον κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων Reed Solomon – RS . Ο κώδικας RS δέχεται στην είσοδό του τα δεδομένα του πίνακα δεδομένων εφαρμογής, και εξάγει δεδομένα ισοτιμίας. Τα δεδομένα ισοτιμίας τοποθετούνται στον πίνακα RS και αποστέλλονται μαζί με τα IP δεδομένα για να βοηθήσουν τον δέκτη να διορθώσει τυχόν λάθη που έχει παρουσιάσει το κανάλι.



Σχήμα 24: Είσοδος και έξοδος του κωδικοποιητή RS

Ο αλγόριθμος διόρθωσης σφαλμάτων Reed Solomon εκτελείται ανά γραμμή του πίνακα δεδομένων εφαρμογής. Δέχεται συνεπώς, ομάδες των 191 bytes. Με βάση τα δεδομένα αυτά, εξάγει 64 bytes ισοτιμίας. Ο αλγόριθμος RS εκτελείται τόσες φορές, όσες και οι γραμμές του πίνακα, δηλαδή 1024 φορές ανά αποσπελλόμενη ριπή δεδομένων.

Αρχικά ο RS encoder δημιουργεί το πεδίο Galois με βάση το πολυώνυμο που ορίζει το πρότυπο DVB-H. Το πολυώνυμο είναι το :

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

Το πρόγραμμα για να δημιουργήσει το πεδίο Galois εκτελεί τις συναρτήσεις

init_galois_tables() και

compute_genpoly().

Οι συναρτήσεις αυτές δημιουργούν το πεδίο πεπερασμένων αριθμών Galois, πάνω στο οποίο επεξεργάζονται τα δεδομένα εισόδου. Επίσης, ο RS encoder έχει στην διάθεση του και διάφορες συναρτήσεις οι οποίες εκτελούν πράξεις με πολυώνυμο και βοηθούν στην ταχύτερη εκτέλεση της RS κωδικοποίησης. Τέτοιες συναρτήσεις είναι οι :

init_exp_table ()

gmult()

ginv ()

Όλες οι παραπάνω συναρτήσεις έχουν δημιουργηθεί προκειμένου να εκτελεστεί ταχύτερα η συνάρτηση:

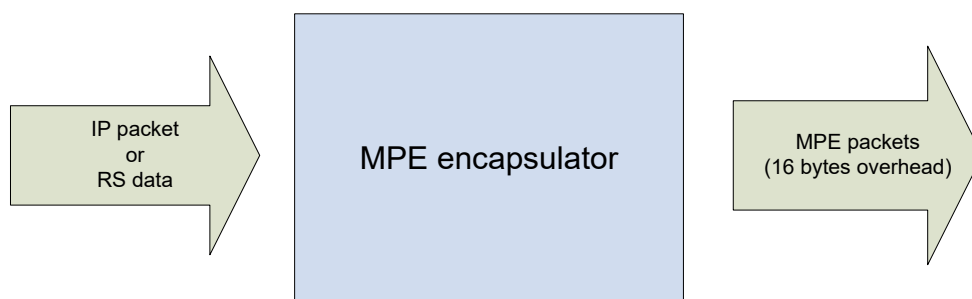
encode_data (unsigned char msg[], int nbytes, unsigned char dst[])

η οποία δέχεται ως όρισμα τα 191 bytes δεδομένων και εξάγει την κωδικο-λέξη των 255 bytes. Η κωδικο-λέξη τοποθετείται στην αντίστοιχη σειρά του MPE-FEC πίνακα. Η κωδικοποίηση RS είναι μια χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί αρκετούς υπολογιστικούς πόρους.

Οι παραπάνω συναρτήσεις της κωδικοποίησης RS εμπεριέχονται στα αρχεία **Galois.cpp** και **Rs.cpp** του IP Encapsulator.

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της κωδικοποίησης RS, ο πίνακας δεδομένων RS είναι γεμάτος. Συνεπώς, ολόκληρος ο πίνακας MPE-FEC είναι έτοιμος. Το επόμενο βήμα είναι η εξαγωγή των δεδομένων και η ενθυλάκωσή τους σε πακέτα MPE.

Η ενθυλάκωση MPE, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, προσθέτει μια επιπλέον επικεφαλίδα μήκους 16 bytes. Χωρίζεται σε δύο επιμέρους διαδικασίες : την ενθυλάκωση των IP πακέτων και την ενθυλάκωση των RS δεδομένων. Αν ο χρήστης έχει επιλέξει να μην χρησιμοποιήσει τον μηχανισμό MPE-FEC, τότε εκτελείται μόνο η πρώτη διαδικασία, καθώς δεν έχουν δημιουργηθεί δεδομένα RS. Αν εκτελείται ο μηχανισμός MPE-FEC, τότε πραγματοποιούνται και οι δύο ενθυλακώσεις. Οι δύο επιμέρους διαδικασίες ενθυλάκωσης διαφέρουν τόσο στο μέγεθος του πακέτου MPE που εξάγουν, όσο και στα πεδία των επικεφαλίδων τους.



Σχήμα 25: Είσοδος και έξοδος του MPE encapsulator

Η ενθυλάκωση των IP πακέτων δημιουργεί πακέτα MPE με ωφέλιμο φορτίο ακριβώς ένα IP πακέτο. Συνεπώς το μέγεθος του MPE πακέτου εξαρτάται από το μέγεθος του IP πακέτου και είναι ίσο με 1516 Bytes. Τα πεδία της MPE επικεφαλίδας τα συμπληρώνει το πρόγραμμα ως εξής:

Table_id: Το πεδίο έχει τιμή πάντα 0x3E. Η τιμή αυτή είναι η ίδια για όλα τα MPE πακέτα του προτύπου DVB-H και υποδηλώνει ότι χρησιμοποιείται η μέθοδος ενθυλάκωσης MPE.

Section_syntax_indicator: Το πεδίο έχει τιμή 1, υποδηλώνοντας ότι χρησιμοποιείται κώδικα ανίχνευσης λαθών CRC-32.

Private_indicator: Έχει τιμή μηδέν, υποδηλώνοντας ότι το MPE πακέτο δεν είναι κρυπτογραφημένο.

Reserved: Έχει τιμή μηδέν.

Section_length: Η τιμή του πεδίου είναι το μέγεθος του IP πακέτου που έχει ορίσει ο χρήστης σύν τα 16 bytes της MPE επικεφαλίδας.

Payload_scrambling_control: Έχει τιμή μηδέν, διότι το ωφέλιμο φορτίο του πακέτου MPE δεν έχει υποστεί scrambling.

Address_scrambling_control: Έχει τιμή μηδέν, διότι οι διευθύνσεις MAC του πακέτου MPE δεν έχουν υποστεί scrambling.

LLC_SNAP_flag: Έχει τιμή μηδέν, διότι το ωφέλιμο φορτίο του MPE πακέτου είναι πακέτα IP.

Current_next_indicator: Έχει τιμή 1, υποδηλώνοντας ότι το ωφέλιμο φορτίο είναι ένα πλήρες (όχι τεμαχισμένο) IP πακέτο.

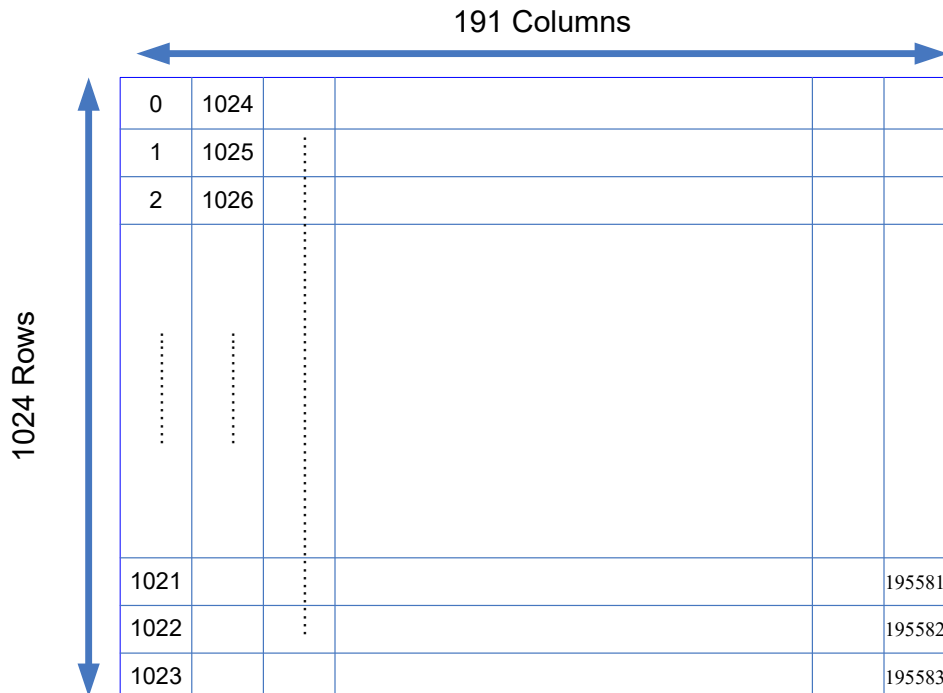
Section_number: Το πεδίο έχει τιμή μηδέν, διότι δεν επιτρέπεται τεμαχισμός στο IP πακέτο. Το πεδίο αυτό στα πακέτα MPE-FEC έχει διαφορετική σημασία, η οποία αναλύεται παρακάτω.

Last_section_number: Το πεδίο έχει τιμή μηδέν, διότι δεν επιτρέπεται τεμαχισμός στο IP πακέτο. Το πεδίο αυτό στα πακέτα MPE-FEC έχει διαφορετική σημασία, η οποία αναλύεται παρακάτω.

MAC_address_[1...6] : Τα πεδία MAC_address_5 και MAC_address_6 περιέχουν τα δύο τελευταία bytes της MAC διεύθυνσης του αποστολέα. Τα πεδία MAC_address_1 έως και MAC_address_4, μεγέθους συνολικά 32 bits, περιέχουν την μεταβλητή Delta_t και την διεύθυνση του περιεχόμενου IP πακέτου στον πίνακα MPE-FEC.

Η διεύθυνση του IP πακέτου στον πίνακα MPE-FEC αναφέρεται στην θέση που κατέχει το πρώτο byte του πακέτου. Έχει τιμές από μηδέν έως 195583. Η τιμή 195583 αναφέρεται στο πλήθος των κελιών του πίνακα όταν το πλήθος των γραμμών του είναι 1024 ($191 \times 1024 = 195584$). Το πεδίο της διευθυνσιοδότησης έχει μήκος 18 bits. Ο τρόπος που το πρότυπο DVB-H ορίζει την διευθυνσιοδότηση, περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα.

Addressing in MPE-FEC table



Σχήμα 26: Διευθυνσιοδότηση στον πίνακα MPE-FEC

Το πρόγραμμα προσθέτει επίσης στις θέσεις των πρώτων τεσσάρων διευθύνσεων MAC την τιμή του πεδίου Delta_t. Η τιμή αυτή αποτελεί ουσιαστικά την τιμή της μεταβλητής Off-time του μηχανισμού Time-slicing, δηλαδή το μεσοδιάστημα μεταξύ δύο συνεχόμενων ριπών. Η μεταβλητή Off-time υπολογίζεται από την σχέση:

$$Off - time = \frac{Burst_Size}{Const_bitrate * 0,96} * Burst_Duration$$

Το πρόγραμμα δέχεται από τον χρήστη την μεταβλητή Burst Duration και υπολογίζει επίσης από την είσοδο (πλήθος γραμμών MPE-FEC πίνακα) την μεταβλητή Burst Size. Το Constant Bitrate (Cb) ορίζεται από το πρόγραμμα σαν σταθερά με τιμή 350 Kbps. Η μεταβλητή Cb υπάρχει στην παραπάνω σχέση, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψιν ο μηχανισμός Time-slicing τους χρονικούς περιορισμούς της κάθε μεταδιδόμενης υπηρεσίας (πέρα από την εξοικονόμηση ενέργειας). Το Constant Bitrate επιλέχθηκε να μην αλλάζει από τον χρήστη, διότι το πρόγραμμα ουσιαστικά παρέχει μετάδοση αρχείων. Η υπηρεσία αυτή δεν έχει χρονικούς περιορισμούς (σε αντίθεση με μια υπηρεσία μεταφοράς video όπως η τηλεόραση), και συνεπώς δεν χρειάζεται να μεταβάλλεται το Cb.

Με τα παραπάνω δεδομένα, το πρόγραμμα υπολογίζει την μεταβλητή Off-time και την αποθηκεύει στο πεδίο Delta_t, μήκους 14 bits.

Το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση της MPE επικεφαλίδας είναι η συμπλήρωση του πεδίου CRC-32. Στο πεδίο αυτό τοποθετείται ένας κώδικας ανίχνευσης λαθών, μήκους 4 bytes. Τον κώδικα τον δημιουργεί ο αλγόριθμος CRC-32. Το πρόγραμμα υλοποιεί τον αλγόριθμο και αποθηκεύει την έξοδό του στο πεδίο CRC-32. Ο

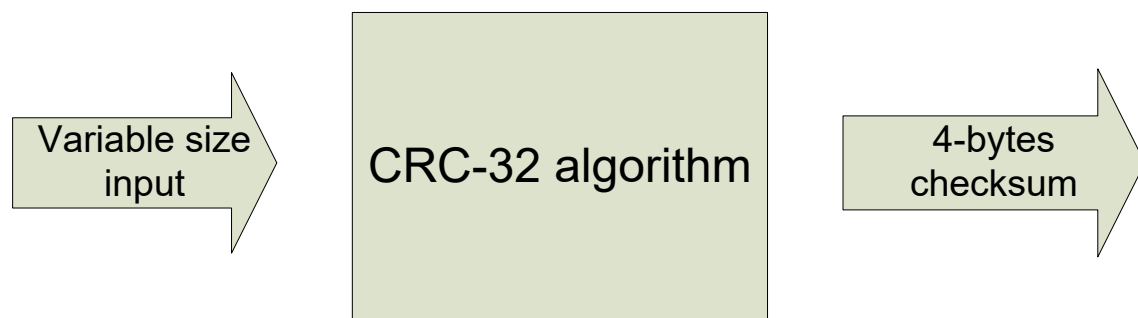
αλγόριθμος εφαρμόζεται μόνο στο ωφέλιμο φορτίο του κάθε MPE πακέτου, δηλαδή στο IP πακέτο. Επειδή ακριβώς ο CRC-32 εφαρμόζεται στο IP πακέτο, επιλέχθηκε κατά τον σχεδιασμό του IP Encapsulator να μην υπολογίζεται το πεδίο Checksum της επικεφαλίδας IP. Ο υπολογισμός και του πεδίου checksum θα ήταν πλεονασμός, καθώς ένα πεδίο ανίχνευσης λαθών κρίνεται αρκετό. Ταυτόχρονα ο αλγόριθμος CRC-32 υπερτερεί σε αποτελεσματικότητα, ενώ η χρησιμοποίηση και των δύο αλγορίθμων θα αύξανε τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος. Για τους παραπάνω λόγους, κρίθηκε άσκοπο να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος checksum και το αντίστοιχο πεδίο στην επικεφαλίδα IP έχει μηδενικά στοιχεία.

Ο αλγόριθμος CRC-32 δέχεται στην είσοδο ομάδες δεδομένων οποιουδήποτε μήκους και εξάγει πάντα μια κωδικο-λέξη μήκους 4 bytes για κάθε ομάδα. Η βασική αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου είναι να διαιρεί την ομάδα δεδομένων που δέχεται στην είσοδο με έναν σταθερό δυαδικό αριθμό, και να εξάγει το υπόλοιπο αυτής της διαίρεσης. Στην πλευρά του δέκτη, ξαναυπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο το πεδίο CRC-32, και αν αυτό είναι διαφορετικό από την τιμή του πεδίου της επικεφαλίδας του λαμβανόμενου MPE πακέτου, τότε ανιχνεύεται λάθος.

Η υλοποίηση του αλγορίθμου CRC-32 από τον IP Encapsulator έχει ως εξής :

Καταρχήν, ο σταθερός διαιρέτης που χρησιμοποιείται είναι το πολυώνυμο $0x04C11DB7 (x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1)$, το οποίο είναι το ίδιο που χρησιμοποιείται και για την υλοποίηση του CRC-32 στο Ethernet (IEEE 802.3).

Ο αλγόριθμος υπολογίζει πρώτα έναν πίνακα αναφοράς (lookup table). Ο λόγος της δημιουργίας του πίνακα αυτού είναι η βελτίωση της ταχύτητας εκτέλεσης του αλγορίθμου. Κανονικά, ο CRC-32 εκτελεί την διαίρεση ένα bit την φορά. Ο πίνακας αναφοράς, αποθηκεύει το αποτέλεσμα της διαίρεσης κάθε πιθανής τιμής byte με το σταθερό πολυώνυμο $0x04C11DB7$. Με τον τρόπο αυτό, το πρόγραμμα επεξεργάζεται τα δεδομένα εισόδου ανά byte και απλά ανατρέχει στον πίνακα αναφοράς για το αποτέλεσμα της διαίρεσης. Ο πίνακας αναφοράς έχει 256 στοιχεία, όσες ακριβώς είναι και οι πιθανές τιμές ενός byte. Με την παραπάνω υλοποίηση επιτυγχάνεται μέχρι και 8 φορές ταχύτερη εκτέλεση του CRC-32, σε σχέση με μια συμβατική υλοποίηση του αλγορίθμου.



Σχήμα 27: Είσοδος και έξοδος του αλγορίθμου CRC-32

Όταν ολοκληρωθεί ο αλγόριθμος CRC-32, τοποθετείται η κωδικο-λέξη μήκους 4 bytes στο πεδίο CRC-32 και το πακέτο MPE είναι ολοκληρωμένο. Το πρόγραμμα αντιγράφει το πακέτο σε έναν προσωρινό πίνακα αποθήκευσης ο οποίος ονομάζεται mpeFull. Η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε ακολουθείται για κάθε IP πακέτο.

Όταν ολοκληρωθεί η ενθυλάκωση όλων των IP πακέτων, ακολουθεί η ενθυλάκωση των δεδομένων RS, προκειμένου να δημιουργηθούν τα MPE-FEC πακέτα. Αν ο χρήστης έχει επιλέξει να μην χρησιμοποιηθεί ο μηχανισμός MPE-FEC, τότε τα δεδομένα RS δεν θα έχουν δημιουργηθεί στα προηγούμενα βήματα, και φυσικά η διαδικασία της ενθυλάκωσης των RS δεδομένων δεν θα εκτελεστεί και το πρόγραμμα θα προχωρήσει στο επόμενο βήμα. Τα RS δεδομένα εξάγονται από τον πίνακα RS ανά στήλη. Συνεπώς, δημιουργούνται ακριβώς 64 πακέτα MPE-FEC ανά μεταδιδόμενη ριπή. Τα MPE-FEC πακέτα έχουν μέγιστο μήκος 1040 bytes από το πρότυπο (μέγιστο ωφέλιμο φορτίο είναι τα 1024 bytes και 16 bytes η MPE επικεφαλίδα). Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί αυτήν την μέγιστη τιμή.

Η διαδικασία είναι πανομοιότυπη με την ενθυλάκωση των IP δεδομένων, συνεπώς θα περιγραφτούν μόνο τα σημεία στα οποία οι διαδικασίες διαφέρουν.

Αρχικά, εξάγονται τα RS δεδομένα από τον πίνακα MPE-FEC ανά στήλη. Τα δεδομένα αυτά ενθυλακώνονται σε ένα MPE-FEC πακέτο. Η επικεφαλίδα του πακέτου MPE-FEC έχει τα ίδια ακριβώς πεδία του πακέτου MPE. Τα πεδία έχουν τις ίδιες τιμές με την MPE επικεφαλίδα. Εξαιρέση αποτελούν τα πεδία MAC_address_1 έως και MAC_address_4 καθώς και τα πεδία Section_number και Last_section_number.

Το πεδίο Section_number μήκους 8 bits, ενώ στα πακέτα MPE έχει μηδενική τιμή, στα πακέτα MPE-FEC υλοποιεί την διευθυνσιοδότηση των δεδομένων στον πίνακα RS. Επειδή το ωφέλιμο φορτίο των πακέτων MPE-FEC, αποτελεί μια ακριβώς στήλη του πίνακα RS, η διευθυνσιοδότηση στον πίνακα MPE-FEC μπορεί να γίνει αν είναι γνωστή μόνο η στήλη από την οποία προήλθαν τα δεδομένα. Το πεδίο Section_number αποθηκεύει αυτήν την τιμή της στήλης του πίνακα RS.

Το πεδίο Last_section_number υποδηλώνει το πλήθος των στηλών του πίνακα δεδομένων εφαρμογής, οι οποίες δεν περιέχουν δεδομένα, αλλά stuffing bytes. Κατά την δημιουργία του πίνακα δεδομένων εφαρμογής, επειδή το DVB-H δεν επιτρέπει τον τεμαχισμό IP πακέτων, είναι πιθανό τα τελευταία κελιά του πίνακα να μην χωρούν άλλο πακέτο και να απομείνουν κάποιες θέσεις του πίνακα κενές. Προκειμένου όμως, να λειτουργήσει σωστά ο αλγόριθμος Reed Solomon, πρέπει να είναι γεμάτος ο πίνακας δεδομένων εφαρμογής. Συνεπώς το πρόγραμμα γεμίζει τα τελευταία αυτά κελιά με μηδενικά bytes που ονομάζονται stuffing bytes. Το πεδίο Last_section_number υποδηλώνει το πλήθος των στηλών του πίνακα δεδομένων εφαρμογής, οι οποίες είναι πλήρως συμπληρωμένες με stuffing bytes. Το πεδίο είναι εξαιρετικά χρήσιμο για να σχηματίσει σωστά τον πίνακα MPE-FEC κατά την λήψη.

Στα πεδία των MAC διευθύνσεων, παραμένει η ίδια ακριβώς τιμή στο πεδίο Delta_t, αλλά πλέον δεν χρησιμοποιείται το πεδίο διευθυνσιοδότησης. Ο λόγος είναι ότι πλέον η διευθυνσιοδότηση γίνεται από το πεδίο Section_number. Συνεπώς, τα υπόλοιπα 18 bits που απομένουν, τίθονται ίσα με το μηδέν.

Το πεδίο CRC-32 συμπληρώνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στην ενθυλάκωση των πακέτων IP.

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία για όλες τις στήλες του πίνακα RS, τότε τα MPE-FEC πακέτα αποθηκεύονται και αυτά στον πίνακα mpeFull, ακριβώς μετά τα MPE πακέτα. Πλέον, ο πίνακας mpeFull εμπεριέχει όλα τα δεδομένα προς αποστολή.

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία των TS πακέτων. Τα πακέτα TS έχουν μήκος 188 bytes από τα οποία τα 187 bytes είναι ωφέλιμο φορτίο και ένα byte αποτελεί την επικεφαλίδα. Το byte αυτό είναι ο χαρακτήρας συγχρονισμού 0x47. Ο χαρακτήρας

συγχρονισμού υπάρχει στα TS πακέτα όλων των προτύπων της οικογένειας DVB και έχει πάντα την ίδια τιμή. Χρησιμοποιείται για να μπορεί ο δέκτης να ξεχωρίζει την αρχή του κάθε TS πακέτου κατά την λήψη της TS ροής δεδομένων.

Το πρότυπο DVB-H όπως και τα υπόλοιπα πρότυπα της οικογένειας DVB, ορίζουν επικεφαλίδα 4 bytes για το κάθε TS πακέτο. Τα υπόλοιπα 3 bytes αποτελούνται από το πεδίο Pid μήκους 12 bits και άλλα 12 bits flags. Από αυτά το σημαντικό είναι το πεδίο Pid, το οποίο χρησιμοποιείται για να μπορεί ο δέκτης να διαχωρίζει τις διαφορετικές ροές των TS πακέτων. Όμως, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί αποκλειστικά μία ροή δεδομένων. Συνεπώς, κρίθηκε καλύτερο να μην χρησιμοποιηθεί το πεδίο αυτό και να μειωθεί η επικεφαλίδα του TS πακέτου για να αυξηθεί η απόδοση του προγράμματος.

Συνεπώς, το πρόγραμμα δημιουργεί τα TS πακέτα. Χρησιμοποιεί σαν είσοδο τον πίνακα mpeFull και απλά προσθέτει κάθε 187 bytes, το byte συγχρονισμού με τιμή 0x47. Τα TS πακέτα τα αποθηκεύει προσωρινά στον πίνακα tsFull. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται μέχρι το τέλος του πίνακα mpeFull. Αν κατά την δημιουργία του τελευταίου TS πακέτου το ωφέλιμο φορτίο είναι λιγότερο από 187 bytes, τότε το υπόλοιπο του TS πακέτου συμπληρώνεται με μηδενικά.

Στο τέλος και αυτής της διαδικασίας, ο πίνακας tsFull περιέχει όλα τα δεδομένα που πρέπει να αποσταλούν σε μία ριπή. Ο πίνακας tsFull αποστέλλεται μέσω ενός Socket Client σε έναν Socket Server του τερματικού Linux και στην συνέχεια στην PCI-to-ASI κάρτα του τερματικού. Η διαδικασία γίνεται αυτόματα και δεν απαιτείται η παρέμβαση του χρήστη. Ο Socket Client είναι ενσωματωμένος στον IP Encapsulator, ενώ ο Socket Server είναι υλοποιημένος σε Java και απλά προωθεί τον tsFull πίνακα στους Buffers της PCI-to-ASI κάρτας. Έπειτα το πρόγραμμα αρχικοποιεί έναν μετρητή χρόνου. Ο μετρητής αυτός αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Το πρόγραμμα δεν συνεχίζει την ίδια διαδικασία για την επόμενη ριπή, αν ο μετρητής αυτός δεν γίνει ίσος με την τιμή Off-time που έχει υπολογιστεί προηγουμένως. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται και η βασική λειτουργία του μηχανισμού time-slicing, η οποία είναι η δημιουργία ριπών δεδομένων για εξοικονόμηση ενέργειας στον δέκτη.

Η ίδια διαδικασία εκτελείται μέχρι να επεξεργαστούν όλα τα bytes του αρχείου δεδομένων που έχει εισάγει ο χρήστης. Στην περίπτωση όπου στην τελευταία ριπή, τα τελευταία bytes του αρχείου δεν επαρκούν για την συμπλήρωση του πίνακα δεδομένων εφαρμογής, τότε ο πίνακας γεμίζει τα εναπομείναντα κελιά με stuffing bytes.

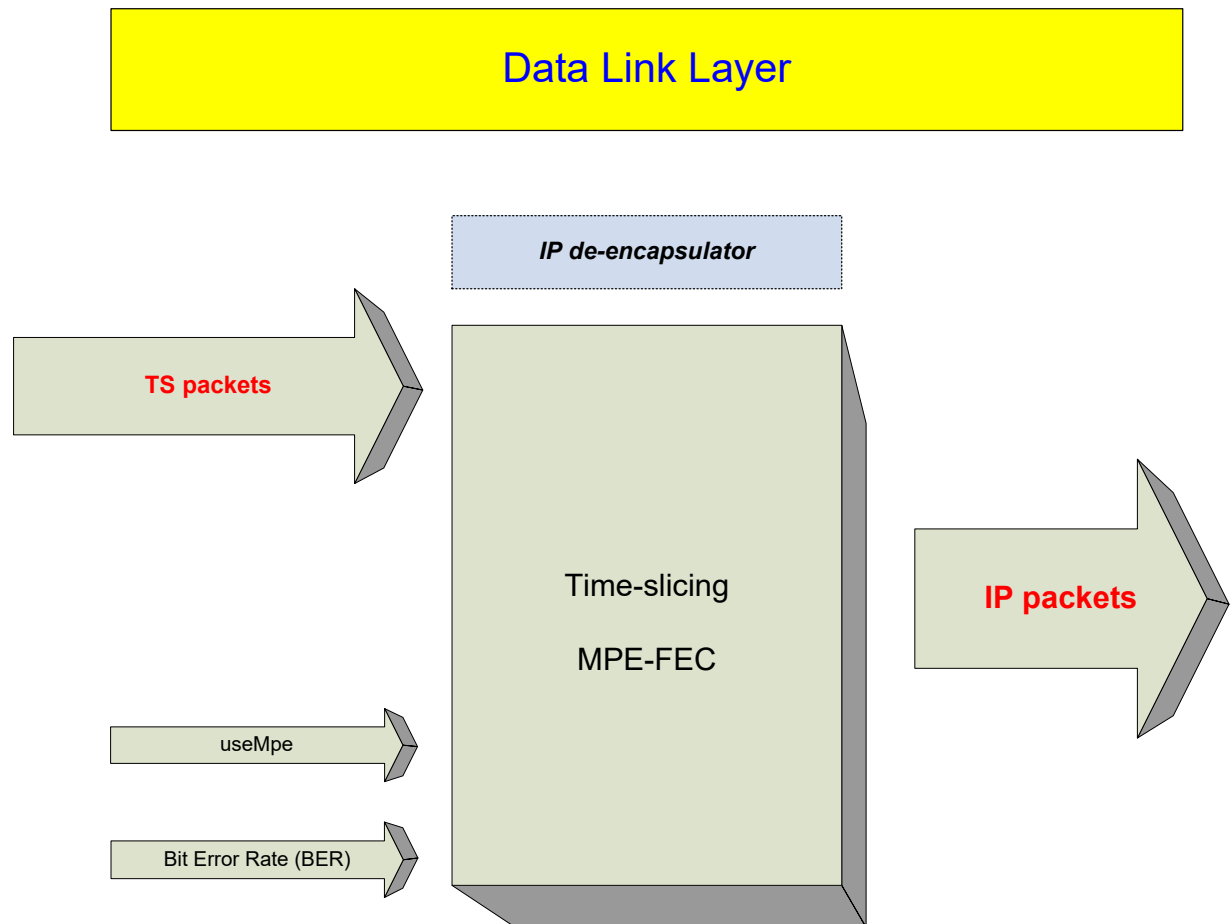
Λεπτομερής περιγραφή IP de-encapsulator

Το πρόγραμμα IP de-encapsulator εκτελείται στο τερματικό του δέκτη. Αναλαμβάνει τις λειτουργίες επιπέδου ζεύξης δεδομένων του δέκτη DVB-H. Δέχεται TS πακέτα, εκτελεί τους μηχανισμούς time slicing και MPE-FEC και εξάγει IP πακέτα και το αρχικό αρχείο που έχει εισάγει ο χρήστης του IP Encapsulator για αποστολή. Το πρόγραμμα έχει δημιουργηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Το εργαλείο

ανάπτυξης του προγράμματος είναι το Microsoft Visual Studio v6.0 Enterprise Edition.

Ο IP de-encapsulator λειτουργεί στο ίδιο επίπεδο του μοντέλου OSI με τον IP encapsulator. Ουσιαστικά, εκτελεί τις αντίστροφες διαδικασίες του IP encapsulator, με σκοπό να εξάγει τα ίδια δεδομένα, τα οποία είχε ως είσοδο ο IP encapsulator.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα εισόδου-εξόδου του προγράμματος IP de-encapsulator.



Σχήμα 28: Είσοδος και έξοδος του προγράμματος IP de-encapsulator

Ο IP de-encapsulator δέχεται στην είσοδό του TS πακέτα. Το πρόγραμμα επικοινωνεί με την ASI-to-PCI κάρτα του Linux τερματικού, η οποία με την σειρά της επικοινωνεί με την PCI-to-ASI κάρτα του δεύτερου Linux τερματικού. Η κάρτα αποθηκεύει τα TS πακέτα σε buffers μεγέθους 20 KByte. Η κάρτα ASI-to-PCI, εξάγει τις απεσταλμένες ριπές σε έναν Socket Client, ο οποίος έχει υλοποιηθεί σε Java και επικοινωνεί με έναν Socket Server που είναι ενσωματωμένος στον IP de-encapsulator, έτσι ώστε να εξάγει τα δεδομένα των buffers σε έναν πίνακα με όνομα tsFull. Όταν η ASI-to-PCI κάρτα λάβει από την PCI-to-ASI κάρτα το πρώτο NULL packet, τότε καταλαβαίνει ότι η ριπή έχει τελειώσει και εξάγει τον πίνακα tsFull στο πρόγραμμα IP de-encapsulator. Ο IP de-encapsulator λαμβάνει τον πίνακα tsFull, ο οποίος περιέχει όλα τα δεδομένα μιας ριπής. Δεν χρειάζεται να λάβει από τον χρήστη

μια τιμή για το μέγεθος των IP πακέτων που θα εξάγονται από το πρόγραμμα, καθώς τα IP πακέτα θα είναι όσο και το ωφέλιμο φορτίο των MPE πακέτων. Το μέγεθος των IP πακέτων δεν μπορεί να υπερβεί τα 4080 bytes, η οποία είναι η μέγιστη τιμή που επιτρέπει το πρότυπο DVB-H. Το μέγεθος του IP πακέτου δεν μπορεί να αλλάζει από ριπή σε ριπή, αλλά μόνο αν τελειώσει η τρέχουσα μετάδοση και αρχίσει μια νέα.

Το πλήθος των γραμμών του πίνακα MPE-FEC δεν είναι απαραίτητο να δοθεί από τον χρήστη. Το πρόγραμμα μπορεί να το υπολογίσει από το μέγεθος των MPE-FEC πακέτων, αν αφαιρέσει την επικεφαλίδα μήκους 16 bytes.

Επίσης, ο IP de-encapsulator λαμβάνει ως είσοδο από τον χρήστη, την χρήση ή όχι του μηχανισμού MPE-FEC. Κανονικά, η πληροφορία αυτή εμπεριέχεται στην DVB-H σηματοδότηση, η οποία όμως δεν έχει υλοποιηθεί.

Επιπλέον, ο IP de-encapsulator δέχεται στην είσοδό του την μεταβλητή Bit Error Rate (BER). Η μεταβλητή εκφράζει την πιθανότητα εμφάνισης λαθών στον πίνακα tsFull. Το BER, εκφράζει την πιθανότητα εμφάνισης λαθών στην αρχή του επιπέδου ζεύξης δεδομένων του προτύπου DVB-H. Η μεταβλητή δεν εκφράζει το ρυθμό λαθών του ασύρματου καναλιού, καθώς έχουν προηγηθεί οι μηχανισμοί διόρθωσης λαθών φυσικού επιπέδου (inner και outer de-coders). Τα λάθη που εισάγει η μεταβλητή BER είναι αυτά που δεν κατάφεραν να διορθωθούν στις προηγούμενες διαδικασίες. Ακόμα, λόγω του τρόπου λειτουργίας των μηχανισμών διόρθωσης φυσικού επιπέδου, οι οποίοι έχουν αναλυθεί παραπάνω, τα λάθη που θα εμφανισθούν στον πίνακα tsFull θα έχουν συνήθως κατανομή του τύπου White Noise, δηλαδή θα αποτελούν μεμονωμένα λάθη στον πίνακα και όχι συνεχόμενα λάθη. Ο IP de-encapsulator με βάση την τιμή του BER ($0 \leq \text{BER} < 1$), υπολογίζει τυχαία το πλήθος των λαθών και τα εισάγει τυχαία στον πίνακα tsFull.

Η έξοδος του IP de-encapsulator είναι πακέτα IP. Τα πακέτα έχουν συγκεκριμένο μέγεθος. Το πρόγραμμα επιπλέον, μπορεί να εξάγει την IP επικεφαλίδα που έχει δημιουργήσει ο IP encapsulator και να τοποθετήσει το ωφέλιμο φορτίο τους στο σκληρό δίσκο, ανακτώντας με τον τρόπο αυτό, το αρχείο δεδομένων που είχε χρησιμοποιηθεί στην είσοδο του IP encapsulator.

Ο IP de-encapsulator αποτελείται από το κύριο αρχείο **TSreceiv.cpp** αλλά και τα αρχεία **berlekamp.cpp**

crc.c

crc.h

ecc.h

galois.cpp

rs.cpp.

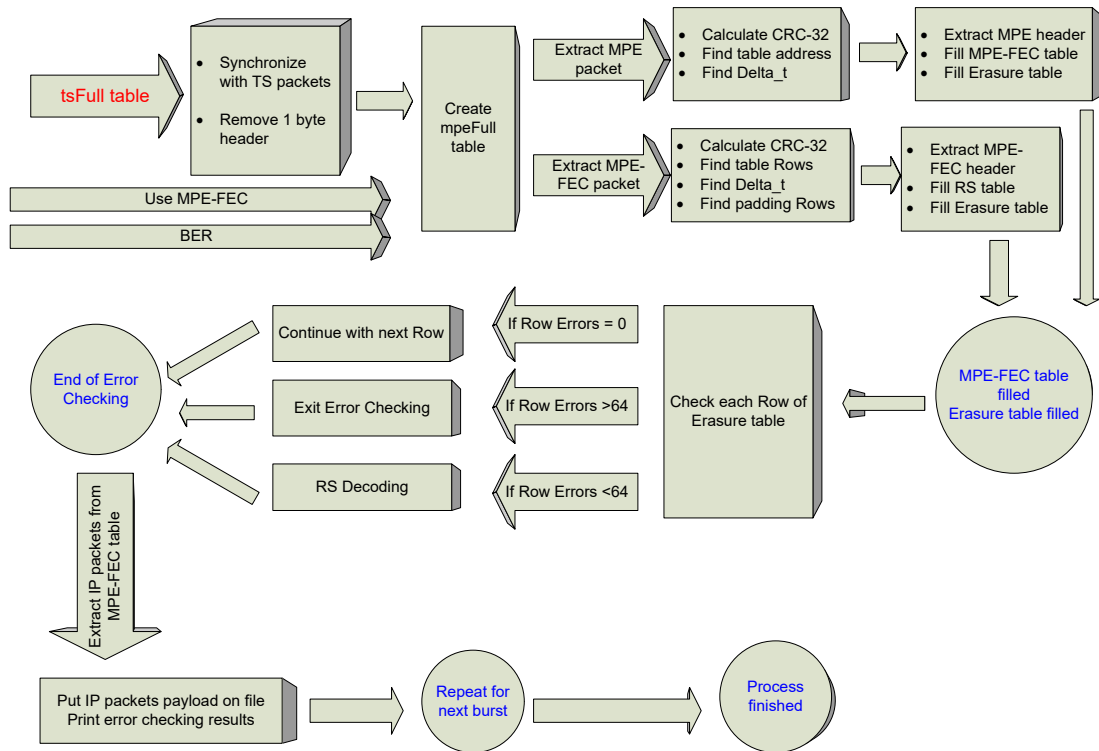
threaded-server.cpp

ws-util.cpp

ws-util.h

Περιγραφή λειτουργιών του IP de-encapsulator

Στο σημείο αυτό εξηγείται η αλυσίδα διαδικασιών που εκτελείται από το πρόγραμμα. Η αλυσίδα διαδικασιών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 29 : Η αλυσίδα διαδικασιών που εκτελεί ο IP de-Encapsulator

Ο IP de-encapsulator δέχεται στην είσοδο του τον πίνακα tsFull. Ο πίνακας περιέχει όλα τα δεδομένα που έχουν αποσταλεί σε μία ριπή σε μορφή πακέτων TS. Αρχικά, το πρόγραμμα υπολογίζει τυχαία τα λάθη στον πίνακα και τα εισάγει τυχαία σε αυτόν. Έπειτα, συγχρονίζεται με τα δεδομένα του πίνακα. Αυτό σημαίνει, ότι ψάχνει τα δεδομένα του πίνακα για τον χαρακτήρα συγχρονισμού 0x47 που αποτελεί και την επικεφαλίδα του κάθε TS πακέτου. Όταν ανιχνεύσει τον πρώτο χαρακτήρα 0x47, καταλαβαίνει ότι είναι η αρχή του πρώτου TS πακέτου. Αφαιρεί τον χαρακτήρα συγχρονισμού (που αποτελεί και την TS επικεφαλίδα) και αντιγράφει το ωφέλιμο φορτίο στον πίνακα mpeFull. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα TS πακέτα του πίνακα tsFull. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία, ο πίνακας mpeFull περιέχει όλα

τα MPE και MPE-FEC πακέτα (αν υπάρχουν) της ριπής. Έπειτα, το πρόγραμμα ελέγχει την μεταβλητή UseMpe. Αν αυτή έχει τιμή 1, τότε ο αποστολέας έχει χρησιμοποιήσει τον μηχανισμό MPE-FEC και υπάρχουν MPE-FEC πακέτα. Αλλιώς υπάρχουν μόνο MPE πακέτα στον mpeFull πίνακα.

Πλέον, το πρόγραμμα εξάγει ένα-ένα τα MPE πακέτα. Από την επικεφαλίδα τους, βρίσκει την διεύθυνση του IP πακέτου που περιέχουν στον πίνακα MPE-FEC και την μεταβλητή Delta_t. Και τα δύο πεδία περιέχονται στην θέση των πεδίων MAC_address_1 έως MAC_address_4.

Επίσης, το πρόγραμμα εκτελεί τον αλγόριθμο CRC-32 στο IP πακέτο. Το αποτέλεσμα το συγκρίνει με το πεδίο CRC-32 της επικεφαλίδας MPE. Αν οι δύο τιμές είναι ίδιες, τότε το MPE πακέτο δεν έχει λάθη.

Το πρόγραμμα δημιουργεί μια δομή πίνακα με όνομα MPE-FEC για την αποθήκευση των IP πακέτων και των δεδομένων RS (αν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC). Επίσης δημιουργεί μια δομή πίνακα με τις ίδιες ακριβώς διαστάσεις με όνομα erasureTable. Ο erasureTable δέχεται τιμές μηδέν ή ένα.

Μετά τον έλεγχο CRC-32, ο IP de-encapsulator αφαιρεί την επικεφαλίδα MPE και αντιγράφει το IP πακέτο στον πίνακα MPE-FEC, στην θέση όπου υποδηλώνεται από την διεύθυνση στην επικεφαλίδα.

Αν ο έλεγχος CRC-32 υποδεικνύει λάθη στο πακέτο, ο erasureTable ο οποίος έχει τις ίδιες διαστάσεις με τον MPE-FEC, γεμίζει με τιμές 1 τα ίδια κελιά τα οποία γεμίζουν με IP δεδομένα στον πίνακα MPE-FEC. Αυτό πραγματοποιείται πάλι με την διεύθυνση που βρίσκεται στην MPE επικεφαλίδα. Αν ο έλεγχος δεν εντοπίσει λάθη στο IP πακέτο, οι ίδιες θέσεις του πίνακα erasureTable γεμίζουν με μηδενικά.

Η ίδια διαδικασία εκτελείται για όλα τα MPE πακέτα.

Στο επόμενο βήμα, το πρόγραμμα εκτελεί μια παρόμοια διαδικασία για τα MPE-FEC πακέτα, αν η τιμή της μεταβλητής UseMpe είναι ίση με ένα. Αλλιώς, οι παρακάτω διαδικασίες δεν εκτελούνται και τα IP πακέτα απλά εξάγονται από το πρόγραμμα. Ο IP de-encapsulator βρίσκει την μεταβλητή Delta_t, αλλά και την στήλη του πίνακα RS, στην οποία περιέχεται το ωφέλιμο φορτίο του MPE-FEC πακέτου. Η στήλη αυτή αποτελεί την διεύθυνση του πακέτου στον πίνακα RS. Έτσι, εκτελεί την ανίχνευση λαθών με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και συμπληρώνει του πίνακες MPE-FEC και erasureTable.

Επίσης, το πρόγραμμα ελέγχει το πεδίο Last_section_number της MPE-FEC επικεφαλίδας, το οποίο περιέχει το πλήθος των στηλών του πίνακα δεδομένων εφαρμογής, οι οποίες είναι πλήρως γεμάτες με stuffing bytes. Οι στήλες αυτές γεμίζουν μηδενικά στον πίνακα MPE-FEC. Τέλος, το πρόγραμμα γεμίζει μηδενικά και τα τελευταία κελιά του πίνακα MPE-FEC τα οποία δεν έχουν τιμή μέχρι τώρα. Τα αντίστοιχα κελιά του πίνακα MPE-FEC που έχουν γεμίσει με stuffing bytes, συμπληρώνονται στον πίνακα erasureTable με μηδενικές τιμές.

Μόλις η ίδια διαδικασία εκτελεστεί για όλα τα MPE-FEC πακέτα, ο πίνακας mpeFull έχει πλήρως επεξεργαστεί, ενώ οι πίνακες MPE-FEC και erasureTable είναι πλήρως γεμάτοι.

Το επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος για το πλήθος των λαθών που έχουν ανιχνευθεί από τον αλγόριθμο CRC-32. Ο έλεγχος γίνεται ανά γραμμή του πίνακα erasureTable. Για κάθε γραμμή λοιπόν, μήκους 255 bytes, μετρώνται οι τιμές '1'.

Αν η γραμμή δεν περιέχει τιμή 1, τότε η γραμμή δεν περιέχει λάθος, και συνεχίζεται ο έλεγχος στην επόμενη γραμμή.

Αν η γραμμή περιέχει παραπάνω από 64 κελιά με τιμή '1', τότε σταματάει ο έλεγχος λαθών, και το πρόγραμμα εξέρχεται από την συγκεκριμένη διαδικασία. Αυτό γίνεται διότι το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να διορθώσει μέχρι και 64 bytes δεδομένων

ανά γραμμή μήκους 255 bytes. Αν έστω και μία γραμμή περιέχει παραπάνω από 64 λάθη, τότε το πρόγραμμα σταματάει την διαδικασία διόρθωσης και συνεχίζει στην εξαγωγή των IP πακέτων από τον MPE-FEC πίνακα. Με μήνυμα στην οθόνη, ενημερώνει τον χρήστη για τον αριθμό της ριπής όπου συνέβηκε αυτό.

Αν τα λάθη σε μια γραμμή είναι λιγότερα από 65, τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός RS decoder. Ο μηχανισμός αυτός, χρησιμοποιεί τα RS δεδομένα, αλλά και τον πίνακα erasureTable για να διορθώσει τα λάθη.

Αρχικά το πρόγραμμα δημιουργεί το πεδίο Galois με τον ίδιο τρόπο που αυτό έχει δημιουργηθεί και στον IP Encapsulator. Το πολυώνυμο δημιουργίας είναι το:

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

Το πρόγραμμα για να δημιουργήσει το πεδίο Galois εκτελεί τις συναρτήσεις

init_galois_tables() και

compute_genpoly().

Οι συναρτήσεις αυτές δημιουργούν το πεδίο πεπερασμένων αριθμών Galois, πάνω στο οποίο επεξεργάζονται τα δεδομένα εισόδου. Επίσης, ο RS decoder έχει στην διάθεση του και διάφορες συναρτήσεις οι οποίες εκτελούν πράξεις με πολυώνυμο και βοηθούν στην ταχύτερη εκτέλεση της RS απο-κωδικοποίησης. Τέτοιες συναρτήσεις είναι οι :

init_exp_table ()

gmult()

ginv ()

Ο RS decoder εκτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία, μέσα από την οποία εντοπίζονται τα λάθη στα δεδομένα εισόδου και με βάση τα δεδομένα RS που αποτελούν τα τελευταία 64 bytes των δεδομένων εισόδου, υπολογίζονται οι πιθανότερες τιμές των bytes στα οποία έχουν εντοπιστεί τα λάθη. Όλη η παραπάνω διαδικασία βασίζεται στον αλγόριθμο Berlekamp-Massey. Ο αλγόριθμος αυτός υπολογίζει προσεγγιστικά την σωστή τιμή του κάθε byte που έχει ανιχνευθεί με λάθη.

Οι συναρτήσεις που εκτελούνται είναι οι :

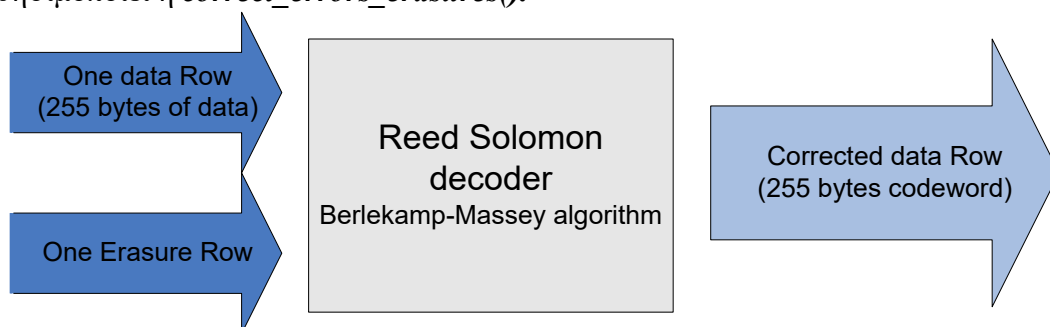
decode_data()

Modified_Berlekamp_Massey()

Find_Roots()

correct_errors_erasures()

Η συνάρτηση ***correct_errors_erasures()*** αναλαμβάνει την διόρθωση των λαθών, ενώ οι τρεις παραπάνω συναρτήσεις, υπολογίζουν ένα πλήθος πολυωνύμων, τα οποία χρησιμοποιεί η ***correct_errors_erasures()***.



Σχήμα30:Είσοδος και έξοδος του RS Decoder

Ο κώδικας για την διαδικασία RS decoding βρίσκεται στα αρχεία
rs.cpp
galois.cpp
berlekamp.cpp

Όταν η διαδικασία RS decoding ολοκληρωθεί, το πρόγραμμα ελέγχει την επόμενη γραμμή του πίνακα MPE-FEC.

Όταν ο έλεγχος λαθών τελειώσει για όλες τις γραμμές του πίνακα MPE-FEC, το πρόγραμμα έχει διορθώσει όσα λάθη είχε την δυνατότητα.

Το επόμενο βήμα, είναι η εξαγωγή των IP πακέτων από τον MPE-FEC πίνακα. Το βήμα αυτό, εκτελείται και στην περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC. Το πρόγραμμα γνωρίζει πλέον το μέγεθος του κάθε IP πακέτου, και τα εξάγει με την ίδια σειρά με την οποία τα είχε εισάγει. Για κάθε IP πακέτο, αφαιρεί την επικεφαλίδα μήκους 20 bytes και τοποθετεί το ωφέλιμο φορτίο σε ένα αρχείο στον σκληρό δίσκο.

Όταν το πρόγραμμα ολοκληρώσει την εξαγωγή όλων των πακέτων, αναστέλλει την λειτουργία του για χρόνο ίσο με την τιμή που έχει λάβει από το πεδίο Delta_t της MPE επικεφαλίδας.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία εκτελείται για κάθε ριπή δεδομένων που λαμβάνει ο IP de-encapsulator από την PCI κάρτα. Όταν ολοκληρωθεί η λήψη όλων των ριπών, τότε το αρχείο στον σκληρό δίσκο θα περιέχει ακριβώς το αρχείο που έχει αποστείλει το πρόγραμμα IP Encapsulator.

Αξιολόγηση προγραμμάτων IP Encapsulator και IP de-Encapsulator

Τα δύο προγράμματα που έχουν υλοποιηθεί στα πλαίσια της εργασίας αυτής, δοκιμάστηκαν με διαφορετικές παραμέτρους και σε διαφορετικές συνθήκες για να αξιολογηθεί η απόδοσή τους σε πραγματικές συνθήκες. Η αξιολόγηση έγινε σε εργαστηριακό περιβάλλον με την αρχιτεκτονική που περιγράφηκε παραπάνω.

Οι μετρήσεις που έγιναν μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά την αξιολόγηση του μηχανισμού Time-Slicing και η δεύτερη την αξιολόγηση του μηχανισμού MPE-FEC. Οι μηχανισμοί αυτοί αποτελούν το επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων του προτύπου DVB-H.

Λόγω της φύσεως των μηχανισμών, η πρώτη κατηγορία αφορά χρονικές κυρίως μετρήσεις όπως την απόδοση των προγραμμάτων όσον αφορά την καθυστέρηση της μετάδοσης (send delay), την διακύμανση της καθυστέρησης της μετάδοσης (send jitter), την καθυστέρηση επεξεργασίας της κάθε ριπής (process delay), την διακύμανση της καθυστέρησης της επεξεργασίας (process jitter), τον χρόνο κατά τον οποίο ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time) και την διακύμανση του χρόνου κατά

τον οποίο ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time jitter). Τέλος, υπολογίζεται το ποσοστό της εξοικονόμησης ενέργειας (power saving) που επιτυγχάνει ο μηχανισμός Time-Slicing, σε σχέση με την μετάδοση μιας συνεχούς ροής δεδομένων, όπως το πρότυπο DVB-T.

Αντίθετα, η δεύτερη κατηγορία μετρήσεων που αξιολογεί τον μηχανισμό MPE-FEC ασχολείται με μεταβλητές που αφορούν τα μεταδιδόμενα δεδομένα και την ικανότητα του μηχανισμού να διορθώνει τυχόν λάθη που παρουσιάζει το κανάλι. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις της κατηγορίας αυτής αφορούν την ωφέλιμη πληροφορία που μεταφέρθηκε σε μία ριπή (Throughput), την πλεονάζουσα πληροφορία που μεταφέρθηκε σε μία ριπή (Overhead), τα IP πακέτα με λάθη και τα IP πακέτα που διορθώθηκαν με τον μηχανισμό MPE-FEC.

Αξιολόγηση μηχανισμού Time-Slicing

Οι μετρήσεις για την αξιολόγηση του μηχανισμού Time-Slicing έγιναν κατά την μεταφορά ενός αρχείου εικόνας μεγέθους 1.324.107 bytes. Το συγκεκριμένο αρχείο απαιτεί συνολικά 7 ριπές μεγέθους 266.584 bytes. Οι παρακάτω μετρήσεις έγιναν για κάθε ριπή δεδομένων. Το μεγάλο πλήθος των ριπών δεδομένων και οι μετρήσεις σε κάθε μία ξεχωριστά, εξασφαλίζει την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, ο ρυθμός μετάδοσης της κάθε ριπής (Burst Bit Rate) παραμένει αμετάβλητος στα 200 Mbit/sec. Η τιμή αυτή καθορίζεται από τις ASI-to-PCI και PCI-to-ASI κάρτες.

Συνολικά η ομάδα μετρήσεων για τον μηχανισμό Time-Slicing αποτελείται από τις παρακάτω μετρήσεις:

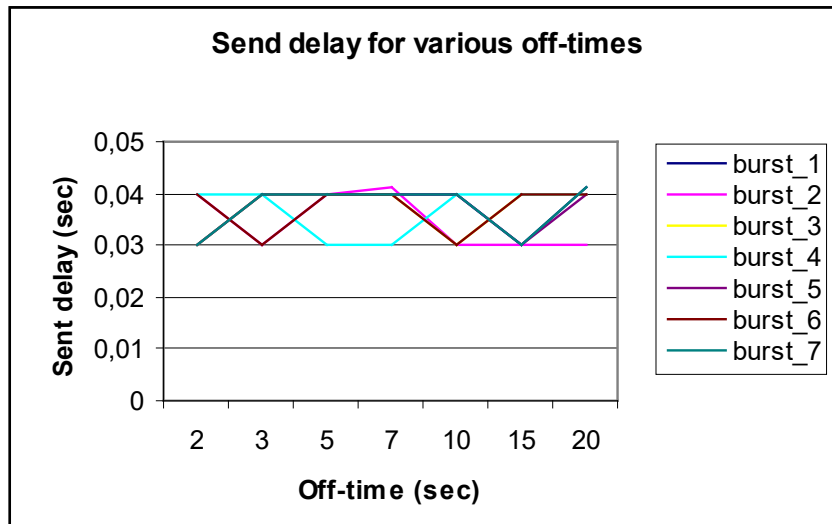
- καθυστέρηση μετάδοσης (send delay)
- διακύμανση καθυστέρησης της μετάδοσης (send jitter)
- καθυστέρηση επεξεργασίας κάθε ριπής (process delay)
- διακύμανση της καθυστέρησης της επεξεργασίας κάθε ριπής (process jitter)
- χρόνος που ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time)
- διακύμανση του χρόνου που ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time jitter)
- εξοικονόμηση ενέργειας (power saving)

Καθυστέρηση μετάδοσης (send delay)

Η καθυστέρηση μετάδοσης εκφράζει τον χρόνο σε δευτερόλεπτα που απαιτείται για την αποστολή μιας ριπής δεδομένων μεγέθους 266.854 bytes. Οι τιμές που παρουσιάζονται αφορούν την μετάδοση ριπών με την χρήση του μηχανισμού MPE-FEC. Η καθυστέρηση αυτή αφορά την μετάδοση μεταξύ του Socket Client του τερματικού Linux που έχει εγκατεστημένη την κάρτα ASI-to-PCI και του Socket Server του τερματικού Windows που λειτουργεί το πρόγραμμα IP de-encapsulator. Η συνολική καθυστέρηση του συστήματος μεταφοράς (δηλαδή η καθυστέρηση μεταξύ και των τεσσάρων τερματικών) αποτελείται από (1) την καθυστέρηση μετάδοσης που αναφέρθηκε, συν (2) την καθυστέρηση μετάδοσης μεταξύ του Socket Server του

τερματικού Linux που έχει εγκατεστημένη την κάρτα PCI-to-ASI και του Socket Client του τερματικού Windows που λειτουργεί το πρόγραμμα IP encapsulator, συν (3) την καθυστέρηση μετάδοσης μεταξύ των δύο καρτών των τερματικών Linux.

Η καθυστέρηση μεταξύ IP Encapsulator και κάρτας PCI-to-ASI θεωρείται ίδια με την καθυστέρηση μεταξύ IP de-encapsulator και κάρτας ASI-to-PCI, η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Επίσης, η καθυστέρηση μεταξύ των δύο καρτών θεωρείται αμελητέα για να ληφθεί υπόψη. Συγκεκριμένα, οι δύο κάρτες επικοινωνούν με ρυθμό μετάδοσης 200 Mbits/sec , οπότε η καθυστέρηση μετάδοσης μιας ριπής 266584 bytes διαρκεί 0,0001 sec.



Σχήμα 31: Καθυστέρηση Μετάδοσης για διαφορετικά Off-Time

Send delay							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	Off-time
0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	2
0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	3
0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	5
0,04	0,041	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	7
0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	10
0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	15
0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,041	20

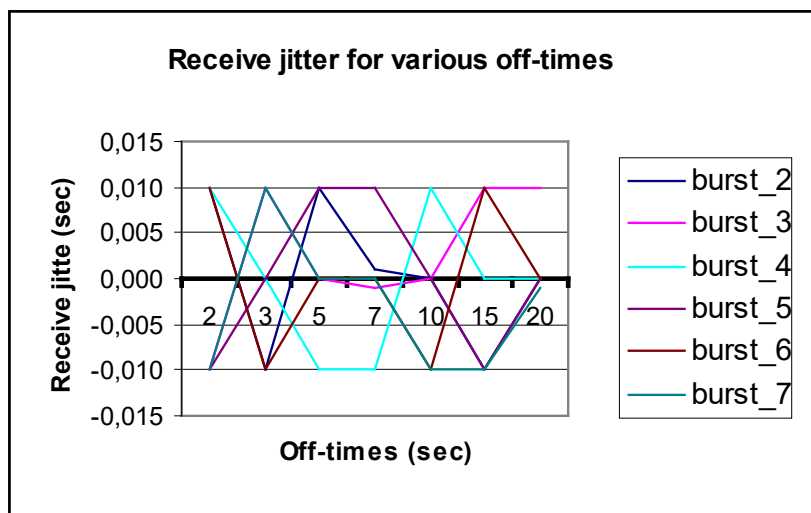
Πίνακας 2: Τιμές μετρήσεων για την καθυστέρηση μετάδοσης

Όπως φαίνεται από την παραπάνω γραφική παράσταση, η καθυστέρηση μετάδοσης από την ASI-to-PCI κάρτα στον IP de-encapsulator κυμαίνεται μεταξύ 0,03 και 0,04 sec. Η συνολική καθυστέρηση μετάδοσης μεταξύ IP encapsulator και IP de-encapsulator μπορεί να θεωρηθεί διπλάσια.

Η καθυστέρηση μετάδοσης δεν επηρεάζεται από το πλήθος των ριπών και τον χρόνο κατά τον οποίο ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time).

Διακύμανση καθυστέρησης της μετάδοσης (send jitter)

Η διακύμανση της καθυστέρησης μετάδοσης εκφράζει την διαφορά στην καθυστέρηση μετάδοσης μεταξύ δύο διαδοχικών ριπών. Συνεπώς δεν υπάρχει μέτρηση για την πρώτη ριπή. Το πρότυπο DVB-H ορίζει την μεταβλητή αυτή ως Delta_t jitter και ορίζει ότι η τιμή της δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 msec. Όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται στο σύστημα μετάδοσης.



Σχήμα 32: Διακύμανση Καθυστέρησης Μετάδοσης για διαφορετικά Off-Time

Receive jitter							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	Off-time
	0,010	-0,010	0,010	-0,010	0,010	-0,010	2
	-0,010	0,010	0,000	0,000	-0,010	0,010	3
	0,010	0,000	-0,010	0,010	0,000	0,000	5
	0,001	-0,001	-0,010	0,010	0,000	0,000	7
	0,000	0,000	0,010	0,000	-0,010	-0,010	10
	-0,010	0,010	0,000	-0,010	0,010	-0,010	15
	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	-0,001	20

Πίνακας 3: Τιμές μετρήσεων για την Διακύμανση Καθυστέρησης Μετάδοσης

Επίσης, η διακύμανση της καθυστέρησης μετάδοσης δεν εξαρτάται από το πλήθος των ριπών ή τον χρόνο κατά τον οποίο ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time).

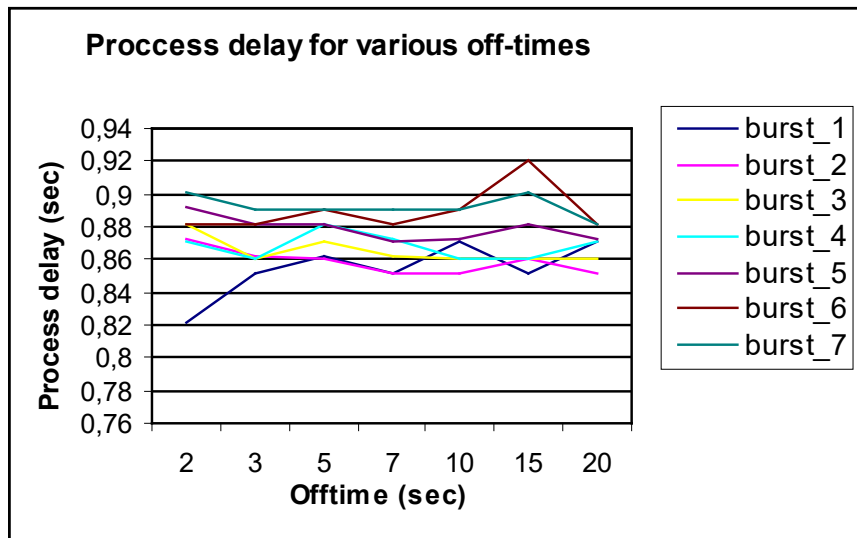
Καθυστέρηση επεξεργασίας κάθε ριπής (process delay)

Η καθυστέρηση επεξεργασίας για την κάθε ριπή εκφράζει τον χρόνο που χρειάζεται το πρόγραμμα IP de-encapsulator για να απο-κωδικοποιήσει την κάθε ριπή και να εξάγει το αρχικό αρχείο. Η διαδικασία της απο-κωδικοποίησης περιλαμβάνει πολλά στάδια, όπως ο συγχρονισμός των TS πακέτων, τρεις απο-ενθυλακώσεις (TS πακέτα, MPE πακέτα και IP πακέτα), η ανίχνευση σφαλμάτων με τον αλγόριθμο CRC-32 και

η διόρθωση σφαλμάτων με τον κώδικα Reed-Solomon (255,191,64) (αν έχει επιλεγεί ο μηχανισμός MPE-FEC).

Από τις παραπάνω διαδικασίες, αυτή που απαιτεί τον αισθητά περισσότερο χρόνο είναι ο κώδικας Reed-Solomon και συγκεκριμένα ο αλγόριθμος απο-κωδικοποίησης Berlekamp-Massey. Η καθυστέρηση επεξεργασίας κυμαίνεται κάτω από ένα δευτερόλεπτο αν δεν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC και περίπου 10 δευτερόλεπτα αν ο μηχανισμός χρησιμοποιείται. Ο λόγος είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του αλγόριθμου Berlekamp-Massey για μεγάλο πλήθος parity bytes ($t = 64$). Η υλοποίηση του αλγορίθμου σε software και όχι σε hardware όπως συνηθίζεται σε εμπορικά συστήματα, επιφέρει την σημαντική αυτή καθυστέρηση επεξεργασίας.

Η υλοποίηση του συγκεκριμένου αλγορίθμου σε software αποτελεί και τον κυρίαρχο λόγο που το συγκεκριμένο σύστημα μετάδοσης που παρουσιάζεται, δεν έχει την δυνατότητα να μεταφέρει δεδομένα πραγματικού χρόνου (real-time) και αρκείται στην μετάδοση αρχείων.



Σχήμα 33: Καθυστέρηση επεξεργασίας κάθε ριπής για διαφορετικά Off-Time

Process delay							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	Off-time
0,821	0,872	0,881	0,871	0,892	0,881	0,901	2
0,852	0,862	0,861	0,861	0,881	0,881	0,891	3
0,862	0,861	0,871	0,881	0,881	0,891	0,891	5
0,851	0,851	0,862	0,872	0,871	0,881	0,891	7
0,871	0,851	0,861	0,861	0,872	0,891	0,891	10
0,852	0,861	0,861	0,861	0,882	0,921	0,901	15
0,871	0,852	0,861	0,871	0,872	0,881	0,881	20

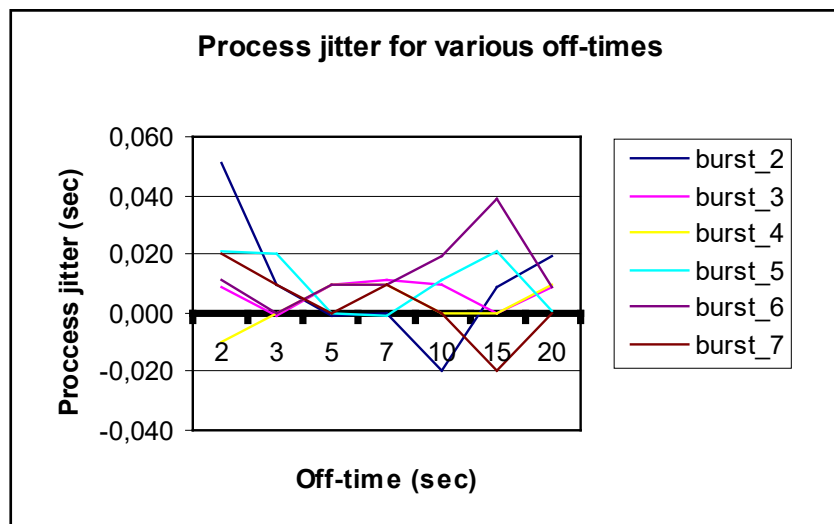
Πίνακας 4: Τιμές μετρήσεων για την Καθυστέρηση επεξεργασίας

Η παραπάνω γραφική παράσταση περιγράφει την καθυστέρηση επεξεργασίας όταν δεν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC. Η καθυστέρηση επεξεργασίας δεν εξαρτάται από το πλήθος των ριπών ή τον χρόνο κατά τον οποίο ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time).

Διακύμανση της καθυστέρησης της επεξεργασίας κάθε ριπής (process jitter)

Η διακύμανση της καθυστέρησης επεξεργασίας εκφράζει την διαφορά στην καθυστέρηση επεξεργασίας μεταξύ δύο διαδοχικών ριπών. Συνεπώς δεν υπάρχει μέτρηση για την πρώτη ριπή.

Όπως φαίνεται στην παρακάτω γραφική παράσταση, η διακύμανση της καθυστέρησης επεξεργασίας δεν εξαρτάται από το πλήθος των ριπών ή τον χρόνο κατά τον οποίο ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time).



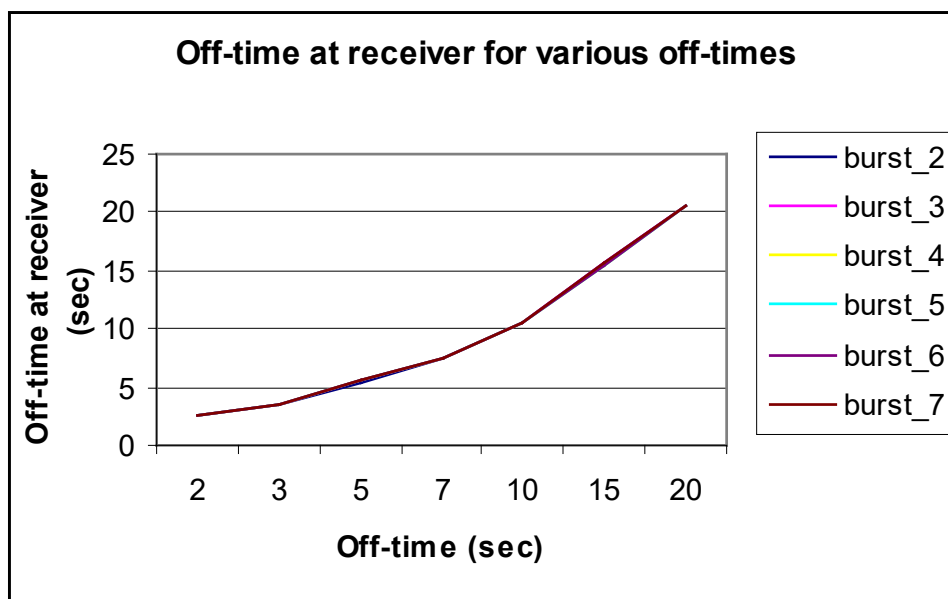
Σχήμα 34: Διακύμανση της καθυστέρησης της επεξεργασίας κάθε ριπής για διαφορετικά Off-Time

Process jitter							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	Off-time
	0,051	0,009	-0,010	0,021	0,011	0,020	2
	0,010	-0,001	0,000	0,020	0,000	0,010	3
	-0,001	0,010	0,010	0,000	0,010	0,000	5
	0,000	0,011	0,010	-0,001	0,010	0,010	7
	-0,020	0,010	0,000	0,011	0,019	0,000	10
	0,009	0,000	0,000	0,021	0,039	-0,020	15
	0,019	0,009	0,010	0,001	0,009	0,000	20

Πίνακας 5: Τιμές μετρήσεων για την Διακύμανση της καθυστέρησης της επεξεργασίας

Χρόνος που ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time)

Ο χρόνος που ο δέκτης παραμένει ανενεργός εκφράζει το χρονικό διάστημα που ο δέκτης δεν λαμβάνει δεδομένα. Η μεταβλητή αυτή καθορίζει σε μεγάλο βαθμό, την εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνει ο DVB-H δέκτης σε σχέση με έναν DVB-T δέκτη. Στην παρακάτω γραφική παράσταση, περιγράφεται το χρονικό διάστημα που ο δέκτης παραμένει ανενεργός, σε σχέση με τον χρόνο που παραμένει ανενεργός ο πομπός. Παρατηρείται, ότι το off-time στον δέκτη είναι πάντα σχεδόν 500 msec περισσότερο από το off-time που επιλέγει ο πομπός. Αυτά τα 500 msec είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται μια ριπή δεδομένων για να διατρέξει το σύνολο των τεσσάρων τερματικών, δηλαδή η συνολική καθυστέρηση μετάδοσης.



Σχήμα 35: Off-Time στον δέκτη για διαφορετικά Off-Time του πομπού

Off-time at receiver							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	Off-time
	2,495	2,554	2,524	2,553	2,554	2,554	2
	3,535	3,526	3,535	3,525	3,515	3,555	3
	5,451	5,528	5,538	5,548	5,538	5,518	5
	7,52	7,52	7,52	7,531	7,521	7,531	7
	10,545	10,545	10,525	10,525	10,526	10,545	10
	15,544	15,543	15,522	15,522	15,533	15,542	15
	20,539	20,54	20,57	20,529	20,52	20,539	20

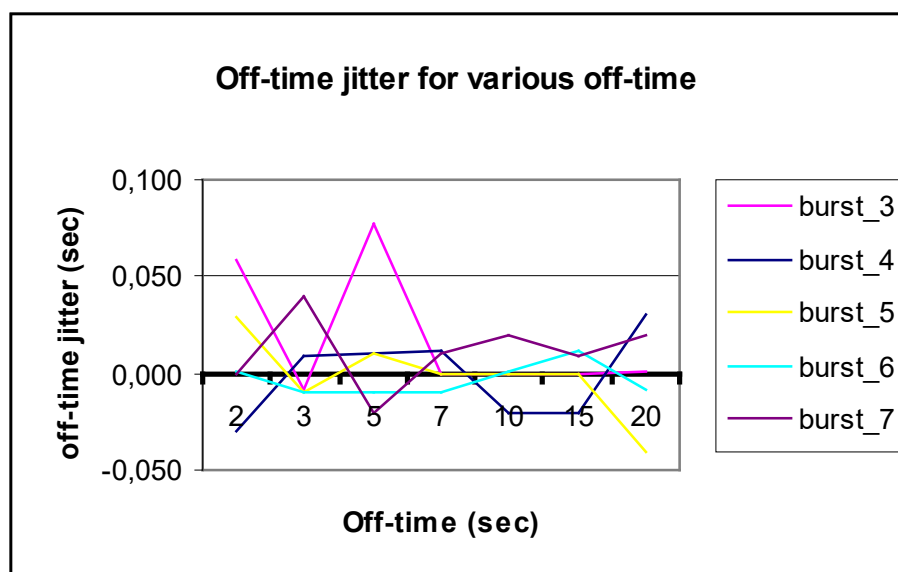
Πίνακας 6: Τιμές μετρήσεων για το Off-Time στον δέκτη για διαφορετικά Off-Time του πομπού

Ο χρόνος που ο δέκτης παραμένει ανενεργός, δεν υφίσταται για την πρώτη ριπή. Επίσης, όπως φαίνεται στην παραπάνω γραφική παράσταση, το off-time δεν εξαρτάται από το πλήθος των ριπών.

Διακύμανση του χρόνου που ο δέκτης παραμένει ανενεργός (off-time jitter)

Η διακύμανση του χρόνου που ο δέκτης παραμένει ανενεργός, εκφράζει την διαφορά στα off-time που παρατηρούνται μεταξύ δύο διαδοχικών ριπών. Συνεπώς δεν υπάρχει μέτρηση για τις δύο πρώτες ριπές. Το off-time jitter εκφράζει την διακύμανση της συνολικής καθυστέρησης στο DVB-H σύστημα των τεσσάρων τερματικών. Λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος, η μεταβλητή αυτή έχει περισσότερες διακυμάνσεις. Παρόλα αυτά, οι τιμές του off-time jitter θεωρούνται ανεκτές για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος.

Τέλος, παρατηρείται από την παρακάτω γραφική παράσταση ότι η διακύμανση του χρόνου που ο δέκτης παραμένει ανενεργός δεν εξαρτάται από το πλήθος των ριπών.



Σχήμα 36: Διακύμανση του Off-Time στον δέκτη για διαφορετικά Off-Time του πομπού

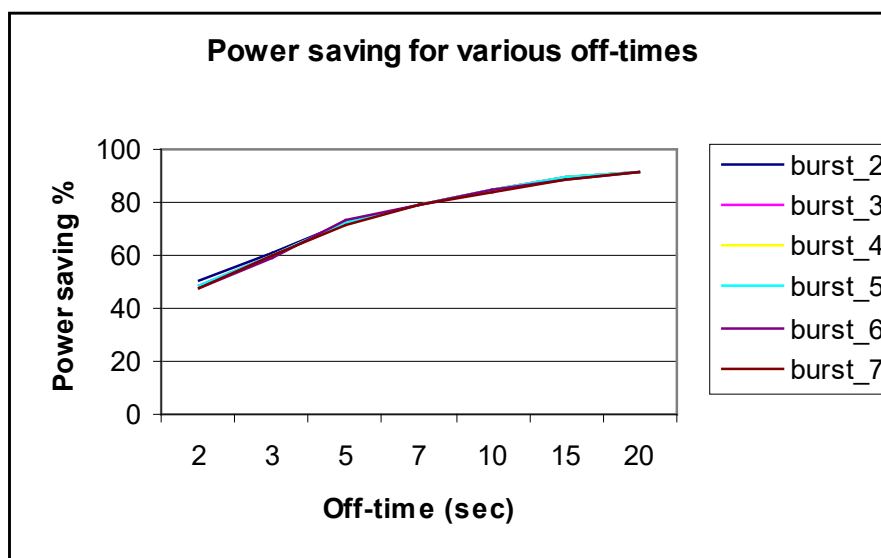
Off-time jitter							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	Off-time
		0,059	-0,030	0,029	0,001	0,000	2
		-0,009	0,009	-0,010	-0,010	0,040	3
		0,077	0,010	0,010	-0,010	-0,020	5
		0,000	0,011	0,000	-0,010	0,010	7
		0,000	-0,020	0,000	0,001	0,019	10
		0,000	-0,021	0,000	0,011	0,009	15
		0,001	0,030	-0,041	-0,009	0,019	20

Πίνακας 7: Τιμές μετρήσεων για Διακύμανση του Off-Time στον δέκτη για διαφορετικά Off-Time του πομπού

Εξοικονόμηση ενέργειας (power saving)

Η εξοικονόμηση ενέργειας στον δέκτη, είναι ο σημαντικότερος στόχος του μηχανισμού Time-Slicing. Εκφράζει το ποσοστό του χρόνου, κατά τον οποίο ο δέκτης (δηλαδή ο IP de-encapsulator) αφού έχει λάβει και επεξεργαστεί την τρέχουσα ριπή, περιμένει να λάβει την επόμενη ριπή δεδομένων. Κατά τον χρόνο αυτόν, δεν εκτελείται κάποια διεργασία στο τερματικό του δέκτη, και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση ενέργειας.

Η μεταβλητή αυτή, περιγράφει το ποσοστό ενέργειας που εξοικονομεί ο DVB-H δέκτης, σε σχέση με έναν DVB-T δέκτη, ο οποίος λαμβάνει μια συνεχή ροή TS πακέτων.



Σχήμα 37: Εξοικονόμηση ενέργειας για διαφορετικά Off-Time

Power saving							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	Off-time
	50,02	48,54	47,83	48,4	47,82	48	2
	60,6	60,17	60,26	59,91	59,51	59,6	3
	72,27	72,48	72,36	72,14	72,98	71,74	5
	78,89	79,18	79,08	78,87	78,77	78,58	7
	84,66	84,76	84,57	84,49	84,33	84,12	10
	90	89,28	89,27	89,21	88,82	88,75	15
	91,81	91,82	91,75	91,68	91,63	91,59	20

Πίνακας 8: Τιμές μετρήσεων για την Εξοικονόμηση ενέργειας

Από την παραπάνω γραφική παράσταση, γίνεται φανερό ότι η μεταβλητή power saving δεν υφίσταται για την πρώτη ριπή μετάδοσης. Επίσης, εξαρτάται άμεσα από τον χρόνο κατά τον οποίο ο δέκτης παραμένει ανενεργός, ενώ δεν επηρεάζεται από το πλήθος των ριπών.

Η εξοικονόμηση ενέργειας αυξάνεται όσο αυξάνεται και το off-time, αλλά όσο μεγαλώνει το power saving, αυξάνεται και με αργότερο ρυθμό. Επίσης, παρατηρείται ότι το power saving συγκλίνει στην τιμή 93 % χωρίς να αυξάνεται περισσότερο, ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλο είναι το off-time. Η τελευταία αυτή ιδιότητα, συμβαδίζει πλήρως με την περιγραφή του προτύπου DVB-H από τον οργανισμό ETSI, η οποία αναφέρει ότι ο μηχανισμός Time-Slicing δεν μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας από τις τιμές 92 – 94 %.

Αξιολόγηση μηχανισμού MPE-FEC

Οι μετρήσεις για την αξιολόγηση του μηχανισμού MPE-FEC έγιναν κατά την μεταφορά ενός αρχείου εικόνας μεγέθους 1.324.107 bytes. Το συγκεκριμένο αρχείο απαιτεί συνολικά 7 ριπές μεγέθους 266.584 bytes. Οι παρακάτω μετρήσεις έγιναν για κάθε ριπή δεδομένων. Το μεγάλο πλήθος των ριπών δεδομένων και οι μετρήσεις σε κάθε μία ξεχωριστά, εξασφαλίζει την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, ο ρυθμός μετάδοσης της κάθε ριπής (Burst Bit Rate) παραμένει αμετάβλητος στα 200 Mbit/sec. Η τιμή αυτή καθορίζεται από τις ASI-to-PCI και PCI-to-ASI κάρτες.

Για όλες τις παρακάτω μετρήσεις τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής Bit Error Rate (BER). Επίσης, για κάθε μία από τις μετρήσεις, τα αποτελέσματα εξάγονται και με την χρήση του μηχανισμού MPE-FEC και χωρίς. Συνολικά, η ομάδα μετρήσεων για τον μηχανισμό MPE-FEC αποτελείται από τις παρακάτω μετρήσεις:

- Ωφέλιμη πληροφορία που μεταφέρθηκε σε μία ριπή (Throughput)
- Πλεονάζουσα πληροφορία που μεταφέρθηκε σε μία ριπή (Overhead)
- IP πακέτα με λάθη
- IP πακέτα που διορθώθηκαν

Ωφέλιμη πληροφορία που μεταφέρθηκε σε μία ριπή (Throughput)

Η ωφέλιμη πληροφορία που μεταδίδεται σε μια ριπή, αφορά το ποσοστό των ωφέλιμων δεδομένων σε κάθε ριπή, προς το σύνολο της μεταδιδόμενης πληροφορίας.

Το Throughput, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC δίνεται από τον τύπο :

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Total_Ip_Payload_Bytes} - (\text{errored_Packets} * 1500)}{\text{total_transmitted_bytes}}$$

Throughput με ενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC

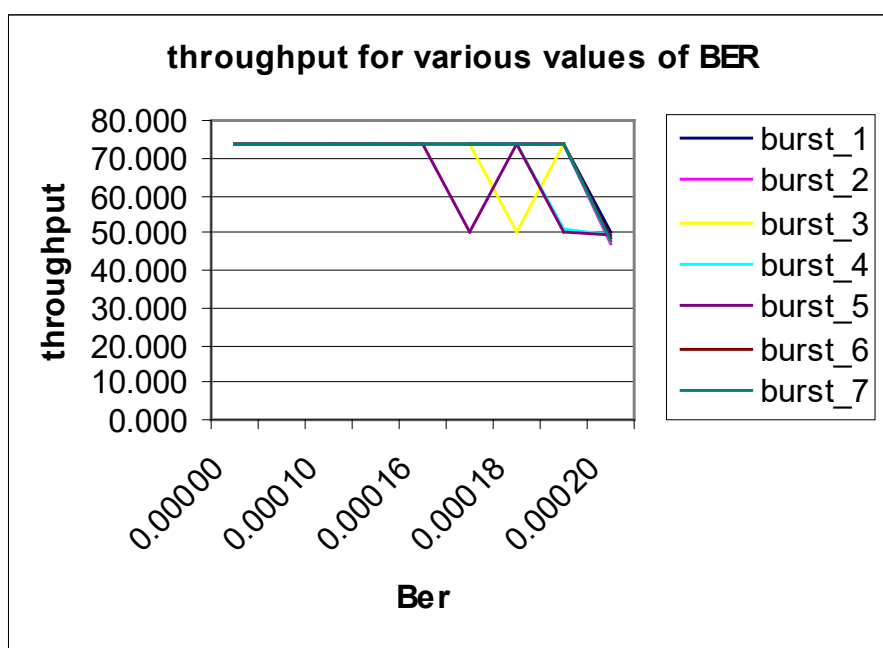
Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC, το Throughput είναι ίσο με:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Total_Ip_Payload_Bytes}}{\text{total_transmitted_bytes}} * 100\%$$

για επίπεδα BER στα οποία ο μηχανισμός MPE-FEC μπορεί να διορθώσει όλα τα λάθη, ενώ πάνω από ένα BER threshold, ο μηχανισμός δεν μπορεί να διορθώσει κανένα λανθασμένο πακέτο, οπότε το Throughput υπολογίζεται από την πρώτη σχέση. Το γεγονός αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, όπου οι τιμές του Throughput είναι σταθερές για μικρό BER, ενώ για $\text{BER} > 0,00017$ ή $\text{BER} > 1,7 * 10^{-4}$ σε ορισμένες ριπές δεν μπορεί να γίνει διόρθωση λαθών, οπότε το Throughput μειώνεται κατακόρυφα. Το ακριβές κατώφλι του BER δεν είναι εφικτό να βρεθεί, καθώς η μεταβλητή BER εισάγει ένα τυχαίο πλήθος λαθών, σε τυχαία σειρά. Πάντως παρατηρείται ότι:

- Για $\text{BER} \leq 0.00016$ ο μηχανισμός λειτουργεί άψογα
- Για $\text{BER} > 0,00016$ και $\text{BER} \leq 0,00019$ σε κάποιες ριπές γίνεται διόρθωση, ενώ σε άλλες όχι, και
- Για $\text{BER} \geq 0.0002$ ο μηχανισμός δεν μπορεί να διορθώσει κανένα λάθος.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα Total_IP_Payload_bytes είναι πάντα ίσα με $131 * 1500 = 196.500$ bytes, ενώ τα total_transmitted_bytes είναι πάντα 266.584 bytes. Ο μηχανισμός MPE-FEC εισάγει μεγάλο ποσοστό πλεονάζουσας πληροφορίας για την διόρθωση σφαλμάτων στην πλευρά του δέκτη. Το γεγονός αυτό κρατάει σε χαμηλό επίπεδο το Throughput του συστήματος μετάδοσης. Ακόμα, το πλήθος των ριπών δεν επηρεάζει το Throughput.



Σχήμα 38: Throughput για διαφορετικά BER με τον μηχανισμό MPE-FEC

Throughput							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	BER
73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	0.00000
73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	0.00005
73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	0.00010
73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	0.00013
73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	73.710	0.00016
73.710	73.710	73.710	73.710	50.390	73.710	73.710	0.00017
73.710	73.710	50.390	73.710	73.710	73.710	73.710	0.00018
73.710	73.710	73.710	50.960	49.820	73.710	73.710	0.00019
49.820	46.980	48.110	49.250	49.250	48.680	48.110	0.00020

Πίνακας 9: Τιμές μετρήσεων για το Throughput με τον μηχανισμό MPE-FEC

Throughput με απενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC

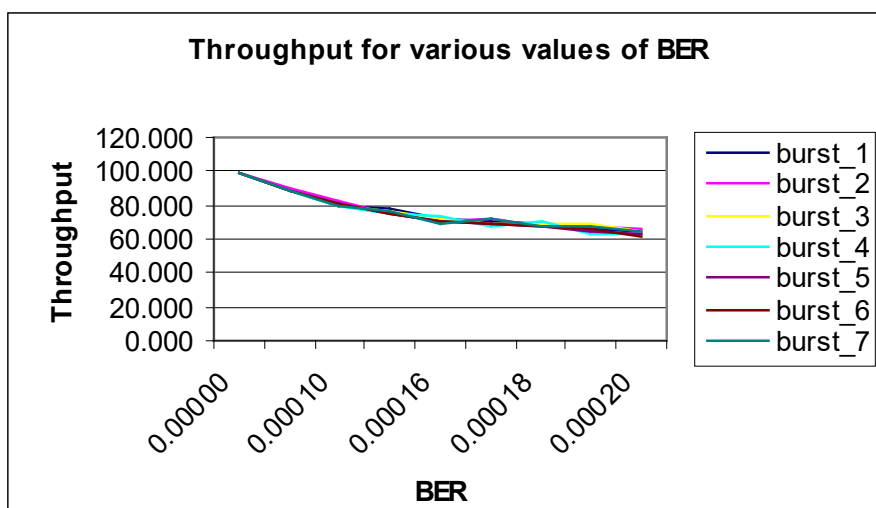
Και στην περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC, το Throughput δίνεται από την σχέση:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Total_Ip_Payload_Bytes} - (\text{errored_Packets} * 1500)}{\text{total_transmitted_bytes}}$$

Πλέον, τα πακέτα με λάθη υπάρχουν πάντα, εκτός αν το BER=0. Η μεταβλητή Total_IP_Payload_bytes είναι πάντα ίση με 131*1500=196.500 bytes, αλλά τα total_transmitted_bytes είναι ίσα με 192.512 bytes, διότι το μοναδικό overhead που υπάρχει, είναι οι επιπλέον επικεφαλίδες των MPE και TS πακέτων. Συνεπώς, το throughput διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα χωρίς τον μηχανισμό MPE-FEC, εκτός και αν το BER βρίσκεται κοντά στο κατώφλι 0,00017, όπου η χρήση του MPE-FEC παρέχει καλύτερο throughput.

Πάντως, αξίζει να σημειωθεί, ότι οι γενικά χαμηλότερες τιμές Throughput που επιτυγχάνει ο μηχανισμός MPE-FEC, δεν σημαίνουν ότι το σύστημα μετάδοσης λειτουργεί καλύτερα χωρίς τον μηχανισμό αυτόν. Το δίκτυο DVB-H είναι μονόδρομο, συνεπώς τυχόν λανθασμένα πακέτα δεν μπορούν να ξανα-αποσταλούν από τον πομπό. Αν απαιτείται από τις εφαρμογές του χρήστη μεγαλύτερη αξιοπιστία μετάδοσης σε περιβάλλον υψηλού θορύβου και όσο το δυνατόν λιγότερα λανθασμένα πακέτα (όπως σε εφαρμογές FTP, η μετάδοση κρίσιμων δεδομένων κτλ), τότε ο μηχανισμός MPE-FEC παρέχει καλύτερη απόδοση. Αντίθετα, αν οι εφαρμογές του χρήστη είναι ανθεκτικές σε απώλειες πακέτων και έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε Throughput (όπως streaming εφαρμογές) ή παρέχουν επιπλέον διόρθωση σφαλμάτων σε ανώτερο επίπεδο, τότε δεν κρίνεται αναγκαία η χρήση του μηχανισμού.

Ακόμα, το πλήθος των ριπών δεν επηρεάζει το Throughput, ενώ γενικά όσο αυξάνει το BER, μειώνεται το Throughput.



Σχήμα 39: Throughput για διαφορετικά BER χωρίς τον μηχανισμό MPE-FEC

Throughput							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	BER
98.320	98.320	98.320	98.320	98.320	98.320	98.320	0.00000
88.46	89.980	89.220	88.460	88.460	89.220	89.220	0.00005
79.360	82.390	80.120	79.360	81.630	80.870	79.360	0.00010
77.840	75.560	77.080	74.810	75.560	75.560	75.769	0.00013
71.770	70.250	71.770	74.050	71.010	71.01	69.500	0.00016
70.250	72.530	69.500	67.983	68.780	68.740	71.770	0.00017
68.740	67.980	69.500	70.250	67.220	67.980	67.220	0.00018
65.700	67.980	68.740	62.670	64.980	66.460	67.980	0.00019
64.190	66.460	64.190	62.670	63.430	61.910	64.940	0.00020

Πίνακας 10: Τιμές μετρήσεων για το Throughput χωρίς τον μηχανισμό MPE-FEC

Πλεονάζουσα πληροφορία που μεταφέρθηκε σε μία ριπή (Overhead)

Η πλεονάζουσα πληροφορία που μεταφέρθηκε σε μία ριπή εκφράζεται με την σχέση:
 $Overhead = (100 - Throughput) * 100\%$

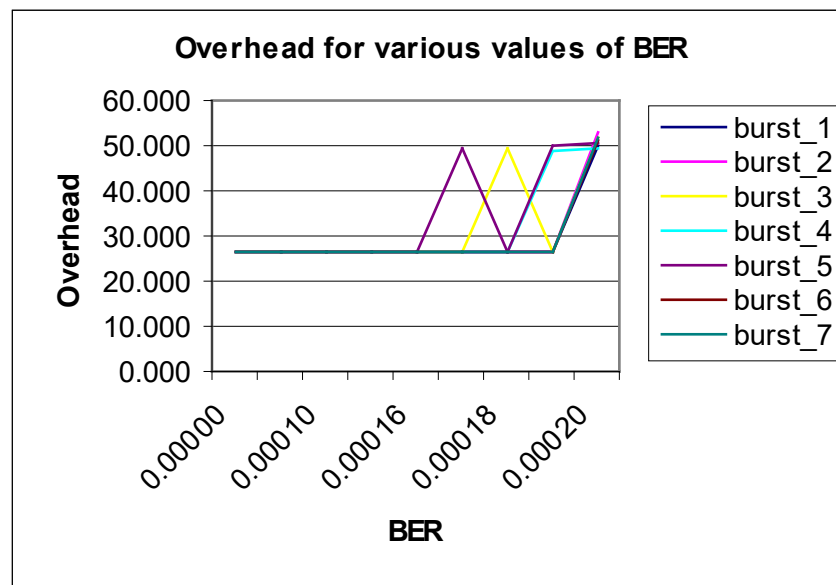
και αποτελεί το ποσοστό της πλεονάζουσας πληροφορίας σε κάθε ριπή. Ως πλεονάζουσα πληροφορία θεωρείται η πληροφορία η οποία δεν αποτελεί ωφέλιμα δεδομένα. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα parity bytes, οι επικεφαλίδες των πακέτων MPE και TS και τα πακέτα τα οποία απορρίπτονται ως λανθασμένα.

Συνολικά για την συγκεκριμένη ομάδα μετρήσεων, αξίζει να αναφερθεί ότι το overhead που εισάγεται με την χρήση του μηχανισμού MPE-FEC, είναι πάντα μεγαλύτερο από την μη χρήση του μηχανισμού, εκτός στις περιπτώσεις όπου το BER κυμαίνεται κοντά στα 0,00017 όπου ο μηχανισμός MPE-FEC επιφέρει λιγότερο overhead. Για να συμβεί αυτό, σημαίνει ότι το parity overhead που εισάγει ο μηχανισμός MPE-FEC είναι μικρότερο από το συνολικό μέγεθος των IP πακέτων που παρουσιάζουν λάθη, κατά την μη χρησιμοποίηση του μηχανισμού.

Overhead με ενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC

Το Overhead που εισάγει ο μηχανισμός MPE-FEC είναι αρκετά μεγάλο και ισούται περίπου με το ¼ της συνολικής μεταδιδόμενης πληροφορίας. Συνεπώς, ακόμα και να διορθώνει όλα τα λάθη ο μηχανισμός MPE-FEC, το overhead των parity bytes συν τα bytes της επικεφαλίδας παραμένει σταθερό και ίσο με 65.000 bytes περίπου ανά 266.584 bytes που μεταδίδονται σε κάθε frame. Για τιμές του BER, όπου ο μηχανισμός MPE-FEC δεν μπορεί να διορθώσει όλα τα IP πακέτα, το overhead μειώνεται ακόμα περισσότερο.

Τέλος, το overhead με την χρήση του MPE-FEC δεν επηρεάζεται από το πλήθος των ριπών.



Σχήμα 40: Overhead για διαφορετικά BER με τον μηχανισμό MPE-FEC

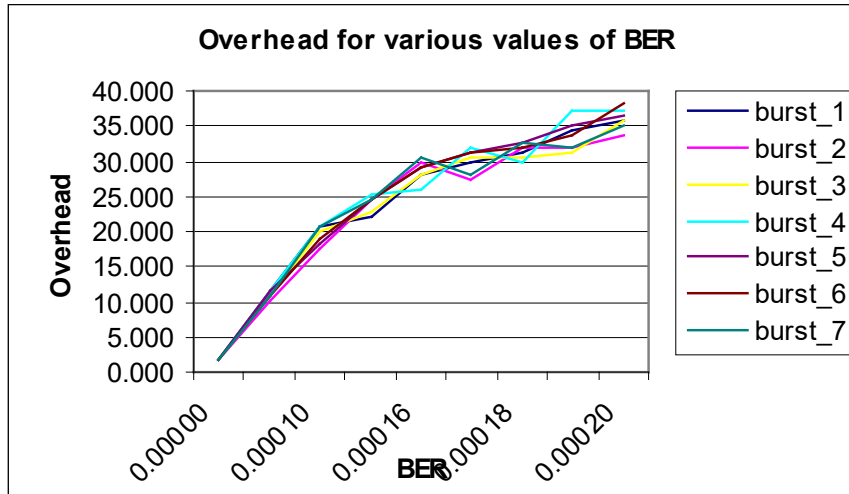
Overhead							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	BER
26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	0.00000
26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	0.00005
26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	0.00010
26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	0.00013
26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	26.280	0.00016
26.280	26.280	26.280	26.280	49.600	26.280	26.280	0.00017
26.280	26.280	49.600	26.280	26.280	26.280	26.280	0.00018
26.280	26.280	26.280	49.030	50.170	26.280	26.280	0.00019
50.170	53.010	51.880	49.250	50.740	51.310	51.880	0.00020

Πίνακας 11: Τιμές μετρήσεων για το Overhead με τον μηχανισμό MPE-FEC

Overhead με απενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC

Χωρίς το μηχανισμό MPE-FEC, το overhead είναι αισθητά χαμηλότερο. Όμως, όσο αυξάνεται το BER, αυξάνεται εκθετικά και το overhead. Συνολικά, το overhead που εισάγεται χωρίς την χρήση του μηχανισμού MPE-FEC, είναι πάντα μικρότερο από

την χρήση του μηχανισμού, εκτός στις περιπτώσεις όπου το BER κυμαίνεται κοντά στα 0,00017 όπου ο μηχανισμός MPE-FEC επιφέρει λιγότερο overhead. Το overhead χωρίς την χρήση του MPE-FEC δεν επηρεάζεται από το πλήθος των ριπών.



Σχήμα 41: Overhead για διαφορετικά BER χωρίς τον μηχανισμό MPE-FEC

Overhead							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	BER
1.670	1.670	1.670	1.670	1.670	1.670	1.670	0.00000
11.53	10.010	10.770	11.530	11.530	10.770	10.770	0.00005
20.630	17.600	19.870	20.630	18.360	19.120	20.630	0.00010
22.150	24.430	22.910	25.180	24.430	24.430	24.440	0.00013
28.220	29.740	28.220	25.940	28.980	28.980	30.490	0.00016
29.740	27.460	30.490	32.010	31.250	31.250	28.220	0.00017
31.250	32.010	30.490	29.740	32.770	32.010	32.770	0.00018
34.290	32.010	31.250	37.320	35.050	33.530	32.010	0.00019
35.800	33.530	35.800	37.320	36.560	38.080	35.050	0.00020

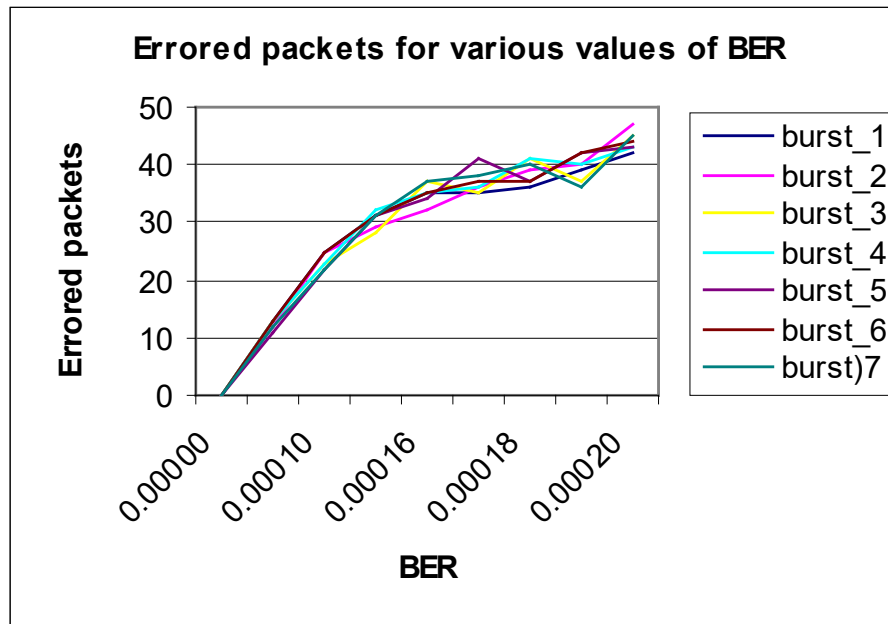
Πίνακας 12: Τιμές μετρήσεων για το Overhead χωρίς τον μηχανισμό MPE-FEC

IP πακέτα με λάθη

Η μεταβλητή των IP πακέτων με λάθη, εκφράζει το πλήθος των IP πακέτων στα οποία έχουν εμφανιστεί λάθη σε κάθε ριπή και για μια συγκεκριμένη τιμή του BER. Η μεταβλητή αυτή, ελέγχει την τυχαιότητα δημιουργίας και εισαγωγής λαθών σε κάθε ριπή. Γενικά, δεν παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ της χρήσης ή όχι του μηχανισμού MPE-FEC. Παρόλα αυτά, η παρατήρηση της μέτρησης για τα IP πακέτα με λάθη, σε αντιπαράθεση με την επόμενη μέτρηση για τα διορθωμένα IP πακέτα, δίνουν μια σαφή εικόνα για τις δυνατότητες διόρθωσης του μηχανισμού MPE-FEC.

IP πακέτα με λάθη με ενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC

Γενικά, όσο αυξάνει το Bit Error Rate τόσο περισσότερα είναι τα IP πακέτα με λάθη. Επίσης, η τιμή των IP πακέτων με λάθη, δεν επηρεάζεται από το πλήθος των ριπών δεδομένων.



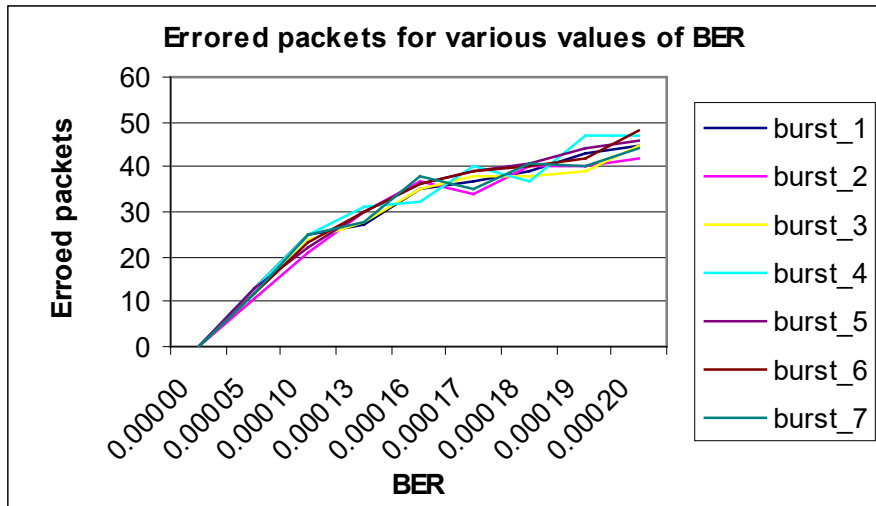
Σχήμα 42: Πακέτα με λάθη για διαφορετικά BER με τον μηχανισμό MPE-FEC

Errored packets							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	BER
0	0	0	0	0	0	0	0.00000
13	12	13	13	11	13	12	0.00005
25	25	23	23	22	25	22	0.00010
31	29	28	32	31	31	31	0.00013
35	32	37	35	34	35	37	0.00016
35	36	35	36	41	37	38	0.00017
36	39	41	41	37	37	40	0.00018
39	40	37	40	42	42	36	0.00019
42	47	45	43	43	44	45	0.00020

Πίνακας 13: Τιμές μετρήσεων για τα πακέτα με λάθη με τον μηχανισμό MPE-FEC

IP πακέτα με λάθη με απενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC

Γενικά, όσο αυξάνει το Bit Error Rate τόσο περισσότερα είναι τα IP πακέτα με λάθη. Επίσης, η τιμή των IP πακέτων με λάθη, δεν επηρεάζεται από το πλήθος των ριπών δεδομένων.



Σχήμα 43: Πακέτα με λάθη για διαφορετικά BER χωρίς τον μηχανισμό MPE-FEC

Errored packets							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	BER
0	0	0	0	0	0	0	0.00000
13	11	12	13	13	12	12	0.00005
25	21	24	25	22	23	25	0.00010
27	30	28	31	30	30	28	0.00013
35	37	35	32	36	36	38	0.00016
37	34	38	40	39	39	35	0.00017
39	40	38	37	41	40	41	0.00018
43	40	39	47	44	42	40	0.00019
45	42	45	47	46	48	44	0.00020

Πίνακας 14: Τιμές μετρήσεων για τα πακέτα με λάθη χωρίς τον μηχανισμό MPE-FEC

IP πακέτα που διορθώθηκαν

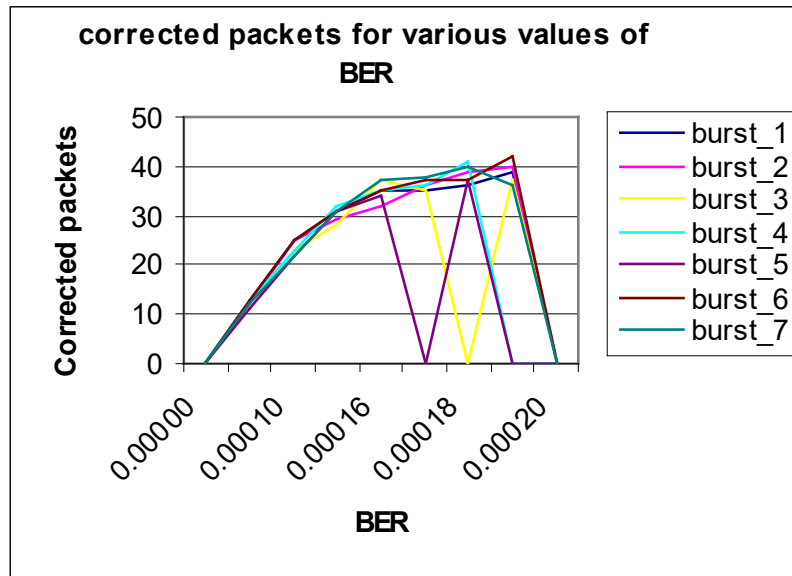
Η συγκεκριμένη ομάδα μετρήσεων έχει σχέση με την ποιότητα των λαμβανόμενων ωφέλιμων δεδομένων. Ανεξαρτήτως του Throughput που έχει επιτευχθεί, η μέτρηση των IP πακέτων που διορθώθηκαν, μελετάει το πλήθος των IP πακέτων που έχουν διορθωθεί, οπότε εξάγεται και ένα μέτρο για την ποιότητα των λαμβανόμενων δεδομένων.

IP πακέτα που διορθώθηκαν με ενεργοποιημένο το μηχανισμό MPE-FEC

Προφανώς, η συγκεκριμένη μέτρηση αφορά μόνο την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC, καθώς αν αυτός δεν χρησιμοποιείται δεν γίνεται καμία διόρθωση.

Όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC, η δυνατότητα διόρθωσης του συστήματος είναι περίπου το 1/3 των συνολικών μεταδιδόμενων πακέτων. Όσο αυξάνεται το BER, ο μηχανισμός έχει την ικανότητα να διορθώσει περίπου τα 42 IP πακέτα από τα συνολικά 131 που μεταδίδονται σε κάθε ριπή. Μετά από το κατώφλι

των 42 διορθωμένων πακέτων, ο μηχανισμός δεν μπορεί να διορθώσει κανένα λάθος και απλά σταματάει να λειτουργεί.



Σχήμα 44: Πακέτα που διορθώθηκαν για διαφορετικά BER με τον μηχανισμό MPE-FEC

Corrected packets							
Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7	BER
0	0	0	0	0	0	0	0.00000
13	12	13	13	11	13	12	0.00005
25	25	23	23	22	25	22	0.00010
31	29	28	32	31	31	31	0.00013
35	32	37	35	34	35	37	0.00016
35	36	35	36	0	37	38	0.00017
36	39	0	41	37	37	40	0.00018
39	40	37	0	0	42	36	0.00019
0	0	0	0	0	0	0	0.00020

Πίνακας 15: Τιμές μετρήσεων για τα πακέτα που διορθώθηκαν με τον μηχανισμό MPE-FEC

Η διακύμανση που παρατηρείται στο παραπάνω σχήμα, συμβαίνει λόγω της τυχαιότητας του πλήθους των λαθών και της θέσεως των λαθών στο κάθε frame. Παρόλα αυτά, ανεξαρτήτως της θέσεως και του πλήθους των λαθών στο frame, ο μηχανισμός MPE-FEC δεν μπορεί να διορθώσει πάνω από 42 πακέτα σε ένα πλήθος 131 πακέτων.

Το πλήθος των διορθωμένων πακέτων δεν εξαρτάται από το πλήθος των ριπών.

Γενικά συμπεράσματα από την αξιολόγηση των μηχανισμών Time-Slicing και MPE-FEC

Από τις παραπάνω ομάδες μετρήσεων πάνω στο πρόγραμμα IP-Encapsulator και IP-deEncapsulator παρατηρείται ότι η εξοικονόμηση ενέργειας η οποία αποτελεί την βασική λειτουργία του μηχανισμού Time-Slicing εκτελείται σωστά από το πρόγραμμα. Παρά την μεγάλη πολυπλοκότητα του εργαστηριακού δικτύου, παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το off-time που επιλέγεται στον πομπό, τόσο αυξάνει και το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας στη πλευρά του δέκτη. Αυτή η αύξηση του ποσοστού του power saving δεν υπερβαίνει ποτέ το 93 %. Το κατώφλι αυτό το οποίο παρατηρήθηκε στο εργαστηριακό δίκτυο, συμβαδίζει πλήρως με το κατώφλι που ορίζει το πρότυπο ως την καλύτερη απόδοση του μηχανισμού Time-Slicing.

Επιπλέον, το εργαστηριακό δίκτυο DVB-H δεν εμφάνισε ποτέ τιμές στην μεταβλητή Delta-t jitter μεγαλύτερες από 10 msec. Το γεγονός αυτό αποτελεί βασική προϋπόθεση που πρέπει να πληρεί ο μηχανισμός Time-Slicing σύμφωνα με το πρότυπο.

Επίσης, παρατηρείται μεγάλη διακύμανση στον χρόνο επεξεργασίας της κάθε ριπής στον δέκτη ανάλογα αν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός MPE-FEC ή όχι. Το γεγονός αυτό όμως δεν οφείλεται σε κάποιο λάθος υλοποίησης αλλά στην εκτέλεση από το πρόγραμμα IP-deEncapsulator πολύπλοκων μαθηματικών πράξεων κατά την αποκωδικοποίηση (αλγόριθμος Berlekamp-Massey). Σε εμπορικά δίκτυα, τέτοιες χρονοβόρες λειτουργίες εκτελούνται αυστηρά σε επίπεδο hardware. Η επαναλαμβανόμενη εκτέλεση του αλγόριθμου Berlekamp-Massey επιβραδύνει σημαντικά το δίκτυο DVB-H.

Όσον αφορά τον μηχανισμό MPE-FEC, προκύπτει από τις μετρήσεις ότι γενικά η χρησιμοποίηση του συχνά επιτυγχάνει λιγότερο Throughput από την μη χρησιμοποίηση του. Αυτό συμβαίνει διότι ο μηχανισμός προσθέτει ένα πολύ μεγάλο ποσοστό πλεονάζουσας πληροφορίας. Παρόλα αυτά, ο μηχανισμός MPE-FEC δεν υλοποιείται από το πρότυπο προκειμένου να αυξηθεί το Throughput, αλλά για να επιτύχει καλύτερη ποιότητα στα λαμβανόμενα δεδομένα εις βάρος του Throughput. Από τις παραπάνω μετρήσεις διαφαίνεται ότι το δίκτυο με την χρήση του μηχανισμού, όντως μεταφέρει λιγότερα ωφέλιμα δεδομένα, αλλά έχει την ικανότητα να διορθώσει μέχρι και το 1/3 των παραληφθέντων IP πακέτων σε κάθε ριπή. Συνεπώς, το γενικό συμπέρασμα είναι ότι σε περιβάλλοντα υψηλού θορύβου για εφαρμογές οι οποίες απαιτούν τον ελάχιστο δυνατό ρυθμό λαθών, η χρήση του μηχανισμού θεωρείται απαραίτητη, ενώ αν δεν ενδιαφέρει μια εφαρμογή το ποσοστό λαθών των λαμβανόμενων δεδομένων, θα πρέπει ο μηχανισμός MPE-FEC να αποφεύγεται.

Αναφορές:

- [1] ETSI TR 102 377 V1.1.1 (2005) “Digital Video Broadcasting (DVB):DVB-H Implementation Guidelines”
- [2] ETSI EN 302 304 (2004) “Digital Video Broadcasting (DVB):Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H)”
- [3] ETSI EN 301 192 (2004) “Digital Video Broadcasting (DVB):DVB specification for data broadcasting”
- [4] ETSI EN 300 744 V1.5.1 (2004) “Digital Video Broadcasting (DVB):Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”
- [5] ETSI A079 (2004) “IP Datacast Baseline Specification, PSI/SI Guidelines for IPDC DVB-T/H Systems”
- [6] ETSI TM2466r4 (2002) “The Convergence of Broadcast & Telecommunications Platforms”
- [7] ETSI TM2967 (2003) “ Commercial Requirements IP Datacast in DVB-H”
- [8] ETSI TM3095 “ IRDC in DVB-H: Technical Requirements”

