

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Τεχνολογίες Ανοικτού Κώδικα για τη Μετάδοση Βίντεο σε
Ασύρματα Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς Χρησιμοποιώντας το Πρότυπο
Κωδικοποίησης HEVC

Γεώργιος Μινόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής
Αντρέας Παναγίδης

Μάιος 2016

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Τεχνολογίες Ανοικτού Κώδικα για τη Μετάδοση Βίντεο σε
Ασύρματα Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς Χρησιμοποιώντας το Πρότυπο
Κωδικοποίησης HEVC**

Γεώργιος Μινόπουλος

**Επιβλέπων Καθηγητής
Αντρέας Παναγίδης**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας
από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Μάιος 2016

Περίληψη

Στις μέρες μας η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει κάνει σημαντικά βήματα προόδου και στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Ταυτόχρονα βέβαια αυτή η εξέλιξη έχει κάνει και τους χρήστες των δικτύων πιο απαιτητικούς σε σχέση με το παρελθόν, όπου πλέον θεωρείται αυτονόητο ότι οι κινητές συσκευές δε χρησιμεύουν μόνο για την μετάδοση της φωνής, αλλά όλο και περισσότερο γίνονται απαραίτητες για την μεταφορά δεδομένων. Η μετάδοση βίντεο μέσω ασύρματων δικτύων είναι μια υπηρεσία που γίνεται όλο και δημοφιλέστερη και γι' αυτό δίνεται μεγάλο βάρος για την βελτιστοποίηση της εμπειρίας του χρήστη κατά την αναπαραγωγή του βίντεο.

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραματικών μετρήσεων πάνω στο αναδυόμενο πρότυπο κωδικοποίησης High Efficiency Video Coding (HEVC) για την αξιολόγηση της αποδοτικότητάς του στη κωδικοποίηση βίντεο σε σχέση με το σημερινό πρότυπο Advanced Video Coding (AVC). Ο στόχος είναι να αναδειχθούν και να αναλυθούν τα προτερήματα του νέου προτύπου και κυρίως το πόσο μεγαλύτερη συμπίεση επιτυγχάνει, έτσι ώστε να προσφέρει ποιοτικότερες υπηρεσίες στο χρήστη κατά την μετάδοση του βίντεο μέσω των ασύρματων καναλιών.

Για την υλοποίηση των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν μόνο εφαρμογές ανοικτού κώδικα, οι οποίες διατίθενται δωρεάν, κυρίως μέσω του διαδικτύου και προσφέρουν ακριβή αποτελέσματα. Η αξιολόγηση της απόδοσης των δύο προτύπων έγινε σε συνάρτηση των αντικειμενικών μετρικών αξιολόγησης και του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Τα δύο πρότυπα δοκιμάστηκαν υπό τις ίδιες συνθήκες με τα ίδια βίντεο, ώστε να κριθεί με ακρίβεια το ποσοστό βελτίωσης της συμπίεσης που προσφέρει το πρότυπο HEVC.

Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική μείωση στο απαιτούμενο εύρος ζώνης, που σε κάποιες περιπτώσεις αγγίζει και το 80%, διατηρώντας στα ίδια επίπεδα την ποιότητα της εικόνας. Σε συνδυασμό με τις νέες τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών, που προσφέρουν όλο και μεγαλύτερες ταχύτητες, το νέο πρότυπο HEVC αποτελεί προπομπός για το πέρασμα στην επόμενη εποχή της ανάλυσης εικόνας, την εποχή της υπέρ-υψηλής ευκρίνειας.

Summary

Nowadays, the rapid development of technology has made great progress in the telecommunications sector. At the same time that evolution has done the network users more demanding than in the past, as now is considered obvious that mobile devices not only serve for the transmission of voice, but more and more are necessary for data transfer. The video transmission over wireless networks is a service that is becoming increasingly popular and therefore great weight is given to optimize the user experience when playing a video.

In this dissertation a series of experimental measurements performed on the emerging encoding standard High Efficiency Video Coding (HEVC) for assessing the efficiency of the video encoding compared to the current standard Advanced Video Coding (AVC). The goal is to highlight and analyze the advantages of the new standard and especially the higher compression rates that achieves, in order to offer quality services to the user during the transmission of video over wireless channels.

For the implementation of the experimental measurements only open source software were used which is free, mainly through the internet and provide accurate results. The evaluation of the performance of both models was a function of the objective video quality metrics and the required bandwidth. These two models were tested under the same conditions with the same videos to determine accurately the percentage of compression improvement offered by HEVC.

The results showed significant reduction in the required bandwidth, which in some cases reaches 80%, while maintaining the same level of image quality. In conjunction with the new wireless communications technologies, which offer increasingly higher speeds, the new standard HEVC is the forerunner for the transition to the next era of image analysis, the era of ultra-high definition.

Ευχαριστίες

Κατά τη διάρκεια αυτής της επίπονης περιόδου πολλά άτομα συνεισέφεραν, ο καθένας με τον τρόπο του, για την εκπλήρωση αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής. Δεν θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση της χωρίς τη βοήθεια και την υποστήριξη τους.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου Δρ. Αντρέα Παναγίδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ανοίγοντάς μου μια νέα πόρτα και δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Η εξαιρετική καθοδήγηση του, οι συμβουλές του και η υπομονή του είναι οι παράγοντες που οδήγησαν σε ένα επιτυχημένο αποτέλεσμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το ακαδημαϊκό προσωπικό του Πανεπιστημίου και κυρίως τους καθηγητές μου για τη συμβολή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Η μετάδοση των γνώσεων τους με βοήθησε για τη δημιουργία αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής.

Τέλος, ιδιαίτερης μνείας χρίζουν η οικογένεια μου και οι φίλοι μου για την αγάπη και τη στήριξη που έδωσαν όσο ασχολούμουν με τη συγγραφή αυτής της διατριβής. Κάθε φορά που τους χρειάστηκα ήταν εκεί για μένα.

Περιεχόμενα

	Περίληψη	III
	Summary	IV
	Ευχαριστίες	V
	Περιεχόμενα	VI
1	Εισαγωγή	1
2	Τεχνικές και Πρότυπα Κωδικοποίησης Ψηφιακού Βίντεο	3
2.1	Κωδικοποίηση	3
2.1.1	Κωδικοποίηση Εντροπίας	4
2.1.2	Κωδικοποίηση με Πρόβλεψη	5
2.1.3	Πρόβλεψη με Εκτίμηση και Αντιστάθμιση Κίνησης	5
2.2	Τύποι Πλαισίων (Frames)	5
2.2.1	Intracoded Frames (I Frames)	6
2.2.2	Predicted Frames (P Frames)	6
2.2.3	Bidirectional Frames (B Frames)	6
2.3	Πρότυπα Κωδικοποίησης Ψηφιακού Βίντεο	7
2.3.1	H.261	7
2.3.2	MPEG-1	8
2.3.3	H.262/MPEG-2	8
2.3.4	M-JPEG	9
2.3.5	H.263	9
2.3.6	MPEG-4	9
2.4	Πρότυπο H.264/AVC MPEG-4 Part 10	10
2.4.1	Διαδικασία Κωδικοποίησης και Αποκωδικοποίησης	10
2.5	Πρότυπο H.265/HEVC	11
2.5.1	Διαδικασία Κωδικοποίησης και Αποκωδικοποίησης	12
3	Τεχνολογίες Μετάδοσης και Πρωτόκολλα Επικοινωνίας	13
3.1	Ασύρματες Τεχνολογίες Εσωτερικών Χώρων	13
3.1.1	802.11a	15
3.1.2	802.11b	17
3.1.3	802.11g	18
3.1.4	802.11n	19
3.1.5	802.11ac	21
3.2	Ασύρματες Τεχνολογίες Εξωτερικών Χώρων	24
3.2.1	Πρώτη Γενιά (1G)	24
3.2.2	Δεύτερη Γενιά (2G)	25
3.2.3	Τρίτη Γενιά (3G)	27
3.2.4	Τέταρτη Γενιά (4G)	30
3.3	Πρωτόκολλα Επικοινωνίας	32
3.3.1	UDP	32
3.3.2	TCP	33
3.3.2	RTP - RTCP	33
4	Εφαρμογές Ανοικτού Κώδικα	35
4.1	Εφαρμογές Συμπίεσης Βίντεο	35
4.1.1	FFmpeg	35
4.1.2	x264	36
4.1.3	x265	36
4.1.4	JM Reference Software	36
4.1.5	HM Software	36
4.2	Εφαρμογές Αναπαραγωγής Βίντεο	37
4.2.1	VLC	37
4.2.2	YUVviewer	38
4.3	Εφαρμογές Προσομοίωσης	38

4.3.1	TruNet	38
5	Μεθοδολογία	40
5.1	Σύγκριση Προτύπων H.264/AVC και H.265/HEVC	40
5.1.1	Ταχύτητα Κωδικοποίησης	41
5.1.2	Αποδοτικότητα Συμπίεσης	41
5.1.2.1	Σύγκριση Προτύπων H.264/AVC και H.265/HEVC Χρησιμοποιώντας τα Λογισμικά Αναφοράς JM και HM	42
5.1.2.2	Σύγκριση Αποδοτικότητας Προτύπων Χρησιμοποιώντας Βάση Δεδομένων Βίντεο.....	42
5.1.3	Προσαρμοστική Κωδικοποίηση Βίντεο σε Πραγματικό Χρόνο	43
5.1.3.1	Σενάριο 1: Προσαρμοστική Μετάδοση Βίντεο Χρησιμοποιώντας Ασύρματες Τεχνολογίες Εσωτερικού Χώρου	44
5.1.3.2	Σενάριο 2: Προσαρμοστική Μετάδοση Βίντεο Χρησιμοποιώντας Ασύρματες Τεχνολογίες Εξωτερικού Χώρου.....	44
6	Αποτελέσματα	45
6.1	Αξιολόγηση Ταχύτητας Κωδικοποίησης	45
6.2	Αξιολόγηση Αποδοτικότητας Συμπίεσης	47
6.3	Αξιολόγηση Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης Βίντεο σε Πραγματικό Χρόνο	55
6.3.1	Αποτελέσματα Σεναρίου 1	55
6.3.2	Αποτελέσματα Σεναρίου 2	61
7	Συμπεράσματα	67
	Βιβλιογραφία	69

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η μετάδοση βίντεο είναι η πιο απαιτητική υπηρεσία που παρέχεται από τα ασύρματα κανάλια, καταναλώνοντας ταυτόχρονα και τους περισσότερους πόρους. Υπολογίζεται ότι οι εφαρμογές βίντεο σε ασύρματα δίκτυα θα καλύπτουν το 70% των συνολικών εφαρμογών μέχρι το 2018 [4]. Καινούρια πρότυπα κωδικοποίησης όπως το High Efficiency Video Coding (HEVC), ασύρματα κανάλια όπως το LTE και LTE-Advanced και αλγόριθμοι αξιολόγησης βίντεο δεν έχουν ερευνηθεί επαρκώς, ιδιαίτερα σε ένα δυναμικό πλαίσιο που να λαμβάνει υπόψιν τις ιδιαιτερότητες τόσο των επιμέρους τεχνολογιών όσο και των εφαρμογών. Η στροφή της Ευρώπης και των Η.Π.Α. σε λογισμικά ανοικτού κώδικα, που θα επιτρέπουν την διείσδυση της τεχνολογίας σε όλα τα φάσματα του πληθυσμού και ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες χώρες και οικονομίες, όπως αποτυπώνεται στο πρόγραμμα της Ε.Ε. «Ορίζοντας 2020» (H2020) [20] και του National Science Foundation (NSF), αποτελεί ένα κομβικό σημείο ιδιαίτερα για εφαρμογές κινητής και ηλεκτρονικής υγείας όπως η «τηλε-διάγνωση» από απόσταση σε επείγοντα περιστατικά ή η μαζική εξέταση πληθυσμού που βασίζεται στην ποιοτική μετάδοση του ψηφιακού βίντεο. Βέβαια και οι απαιτήσεις των καταναλωτών πλέον είναι αυξημένες και επιθυμούν την καλύτερη δυνατή ποιότητα εικόνας σε συνδυασμό με την όσο το δυνατόν ταχύτερη εξυπηρέτηση τους ακόμα και όταν βρίσκονται εν κινήσει.

Το βασικό ερευνητικό ερώτημα είναι κατά πόσο το νέο πρότυπο κωδικοποίησης HEVC μπορεί να αποδώσει βελτιωμένη συμπίεση σε σχέση με το τωρινό πρότυπο AVC και να εγγυηθεί την ικανοποιητική ποιότητα στη εικόνα του μεταδιδόμενου βίντεο, καθ' όλη τη διάρκεια της ασύρματης αποστολής δεδομένων. Για βίντεο γενικού σκοπού το πιο πάνω ερώτημα μεταφράζεται στην παροχή αντίστοιχης ποιότητας υπηρεσίας και κατ' επέκταση εμπειρίας χρήστη με συνδρομητικές υπηρεσίες. Η απάντηση του πιο πάνω ερωτήματος υπαγορεύει την εξέταση μιας σειράς ερευνητικών ζητημάτων που σχετίζονται με το επίπεδο συμπίεσης βίντεο υψηλής ευκρίνειας που επιτυγχάνει το πιο

σύγχρονο πρότυπο κωδικοποίησης HEVC, την αποδοτικότητα στην μετάδοση βίντεο σε πραγματικό χρόνο των ασύρματων δικτύων τέταρτης γενιάς και 802.11x και την αξιολόγηση της ποιότητας του βίντεο όπως την αντιλαμβάνεται ο χρήστης μέσω μιας αλληλουχίας αλγορίθμων.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή θα εξετάσει ζητήματα που άπτονται της αποδοτικής μετάδοσης βίντεο, ικανοποιητικής ποιότητας πάνω από ασύρματα κανάλια επικοινωνίας τέταρτης γενιάς, αλλά και Wi-Fi (802.11x) χρησιμοποιώντας το αναδυόμενο πρότυπο κωδικοποίησης HEVC, βασιζόμενη εξ' ολοκλήρου σε λογισμικό ανοικτού κώδικα. Πιο συγκεκριμένα, θα μελετηθεί πως οι τελευταίες εξελίξεις στις επιμέρους τεχνολογίες της συμπίεσης βίντεο, της ασύρματης μετάδοσης και της αξιολόγησης βίντεο επιδρούν στα συστήματα ασύρματης μετάδοσης βίντεο.

Η δομή της μεταπτυχιακής διατριβής έχει ως εξής:

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται οι συνήθεις τεχνικές και τα σημαντικότερα πρότυπα κωδικοποίησης δίνοντας έμφαση στο πρότυπο H.264/AVC που χρησιμοποιείται σήμερα και στο ανερχόμενο πρότυπο H.265/HEVC.

Το 3^ο κεφάλαιο περιγράφει τις ασύρματες τεχνολογίες, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάδοση βίντεο σε εσωτερικούς ή/και εξωτερικούς χώρους και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά στις τεχνολογίες ανοικτού κώδικα που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση, αποστολή και αναπαραγωγή ψηφιακού βίντεο.

Το 5^ο κεφάλαιο περιέχει μια λεπτομερή αναφορά στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων.

Τέλος, στο 7^ο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα και κάποιες σχετικές μελλοντικές εργασίες πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Κεφάλαιο 2

Τεχνικές και Πρότυπα Κωδικοποίησης Ψηφιακού Βίντεο

Η κωδικοποίηση του ψηφιακού βίντεο αποτελεί τη βασική διαδικασία για την πετυχημένη αποστολή και αναπαραγωγή του. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κωδικοποίησης βίντεο, οι οποίοι χρησιμοποιούν είτε όλα, είτε κάποια από τα τρία είδη πλαισίων για την συμπίεση της εικόνας. Με το πέρασμα των χρόνων δημιουργούνται όλο και καινούργια πρότυπα κωδικοποίησης που πετυχαίνουν καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη συμπίεση και την ποιότητα της εικόνας.

2.1 Κωδικοποίηση

Το ψηφιακό βίντεο αποτελείται από ένα σύνολο εικόνων που εναλλάσσονται γρήγορα και πολλές φορές ανά δευτερόλεπτο. Αυτή η αλληλουχία εικόνων δημιουργεί ένα τεράστιο όγκο συνολικής πληροφορίας και γι' αυτό έχουν δημιουργηθεί και αναπτυχθεί οι τεχνικές συμπίεσης των δεδομένων. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούν το διακριτό μετασχηματισμό συνημίτονου, το διαχωρισμό του μετασχηματισμού Fourier, του σχήματος σε ζώνες και την τεχνική του διανυσματικού κβαντισμού.

Η βασική αρχή στην οποία στηρίζονται όλες οι μέθοδοι ψηφιακής συμπίεσης είναι το γεγονός ότι το σήμα εμπεριέχει ένα ποσοστό πλεονασμού. Ο όρος πλεονασμός περιγράφει την πληροφορία που είτε μπορεί να παραληφθεί, είτε να κωδικοποιηθεί με λιγότερη ακρίβεια χωρίς να έχει εμφανή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.

Υπάρχουν δύο είδη πλεονασμού σε ένα σήμα βίντεο. Ο Χωρικός Πλεονασμός (Spatial Redundancy) αναφέρεται στα γειτονικά pixel μιας εικόνας, τα οποία είναι πολύ πιθανόν να είναι όμοια μεταξύ τους και έτσι το εκμεταλλεύεται για την κωδικοποίηση, γιατί το

ανθρώπινο μάτι μπορεί να ανεχτεί ένα ποσοστό παραμόρφωσης χωρίς να γίνει αντιληπτό. Για παράδειγμα, η ανθρώπινη όραση είναι πιο ευαίσθητη στην φωτεινότητα της εικόνας παρά στα χρώματα. Το άλλο είδος πλεονασμού είναι ο Χρονικός Πλεονασμός (Temporal Redundancy) που προκύπτει από το ότι οι τιμές φωτεινότητας και χρώματος μπορούν σε κάθε δεδομένη στιγμή να μην έχουν πολλές διαφορές μεταξύ τους και έτσι μπορούν να προϋπολογιστούν από τις προηγούμενες ή από τις επόμενες τιμές τους. Δηλαδή, υπολογίζει κάποια σημεία της εικόνας από την προηγούμενη και στη συνέχεια προσθέτει στην υπάρχουσα τις διαφορές που έχουν προκύψει. Έτσι, αποφεύγουμε την κωδικοποίηση ολόκληρης της εικόνας που έχει πλεονάζουσα πληροφορία.

Επιπλέον, για την κωδικοποίηση του ψηφιακού βίντεο υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις ανάλογα με την σχέση που έχει το αρχικό βίντεο με το αποτέλεσμα της κωδικοποίησης. Αυτές είναι η κωδικοποίηση χωρίς απώλειες και η κωδικοποίηση με απώλειες. Κατά την κωδικοποίηση χωρίς απώλειες η εικόνα μπορεί να αποκωδικοποιηθεί ακριβώς όπως ήταν πριν τη συμπίεση, όπου δεν έχουμε μεγάλη διαφορά στο μέγεθος του αρχείου. Κατά την κωδικοποίηση με απώλειες οι οπτικές πλεονάζουσες πληροφορίες αφαιρούνται, χωρίς όμως να γίνεται αντιληπτή η διαφορά στο ανθρώπινο μάτι. Έτσι, μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερο βαθμό συμπίεσης και το μέγεθος του αρχείου να μειωθεί σημαντικά [9].

2.1.1 Κωδικοποίηση Εντροπίας

Η κωδικοποίηση εντροπίας είναι συμπίεση χωρίς απώλειες και δεν λαμβάνει το είδος της πληροφορίας που πρόκειται να συμπιεστεί. Γι' αυτό η συμπίεση γίνεται σε επίπεδο των ακολουθιών των bits. Έτσι, η κωδικοποίηση εντροπίας μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από το είδος της πληροφορίας. Οι τεχνικές κωδικοποίησης εντροπίας χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η μία κατηγορία σχετίζεται με τον περιορισμό των επαναλαμβανόμενων ακολουθιών, που η βασική ιδέα είναι ότι σε μια τυχαία ακολουθία από bits είναι πιθανόν να εμφανιστούν κάποια τμήματα που αποτελούνται από κάποιο επαναλαμβανόμενο χαρακτήρα και αυτά τα τμήματα μπορούν να αντικατασταθούν από ένα ειδικό χαρακτήρα και το πλήθος των επαναλήψεων του χαρακτήρα σε αυτά. Η άλλη βασική κατηγορία είναι η στατιστική κωδικοποίηση, που βασίζεται στον εντοπισμό των πιο συχνά εμφανιζόμενων ακολουθιών χαρακτήρων και στην κωδικοποίηση τους με λιγότερα bits. Απαιτεί την ύπαρξη λεξικού που περιέχει τις

ακολουθίες που αντιστοιχούν σε κάθε κωδικό, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η αποσυμπίεση [9].

2.1.2 Κωδικοποίηση με Πρόβλεψη

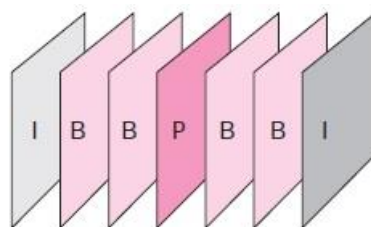
Στην κωδικοποίηση με πρόβλεψη γίνεται εκμετάλλευση του πλεονασμού που υπάρχει στα γειτονικά pixels. Δημιουργείται μια κατά προσέγγιση πρόβλεψη της τιμής του χρώματος για κάθε pixel σύμφωνα με την τιμή που έχουν τα γειτονικά pixels ή τα pixels της προηγούμενης εικόνας και στην συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά ανάμεσα στην προβλεπόμενη και στην πραγματική τιμή του και γίνεται η κωδικοποίηση τής [9].

2.1.3 Πρόβλεψη με Εκτίμηση και Αντιστάθμιση Κίνησης

Με την βοήθεια αυτής της μεθόδου πρόβλεψης μπορούμε να περιγράψουμε την αλληλουχία των εικόνων ως σειρά ομοιοτήτων και διαφορών. Αποστέλλοντας την πρώτη εικόνα και έπειτα αποστέλλοντας σαν πίνακα τα διανύσματα ομοιοτήτων και δημιουργείται στη δεύτερη εικόνα με πάρα πολύ μικρό κόστος, αφού ο πίνακας αυτών των διανυσμάτων θα έχει πολύ πιο μικρό μέγεθος. Αυτό όμως δημιουργεί πολλά σφάλματα αφού στην πραγματικότητα κάποια από τα στοιχεία δεν υπάρχουν στην προηγούμενη εικόνα ή το χρώμα τους έχει μεταβληθεί. Έτσι, χρησιμοποιείται η αντιστάθμιση κίνησης για τη μείωση αυτών των σφαλμάτων [9].

2.2 Τύποι Πλαισίων (Frames)

Στην συμπίεση ενός βίντεο τα frames χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά τους, των οποίων ένα δείγμα της ακολουθίας τους απεικονίζεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Ακολουθία από I, B και P frames

2.2.1 Intracoded Frames (I Frames)

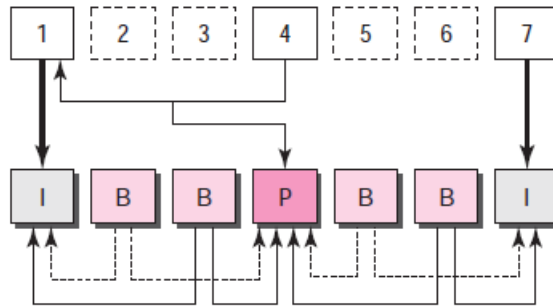
Ένα I frame είναι ένα ανεξάρτητο πλαίσιο που δεν σχετίζεται με οποιοδήποτε άλλο πλαίσιο, δηλαδή δεν γίνεται αναφορά σε κάποιο προηγούμενο ή επόμενο frame. Τα I frames παρουσιάζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. κάθε ένατο πλαίσιο τοποθετείται ένα I frame). Ένα I frame πρέπει να εμφανίζεται σε συχνά χρονικά διαστήματα για να χειριστεί κάποια ξαφνική αλλαγή σε κάποιο πλαίσιο που τα προηγούμενα ή τα επόμενα καρέ δεν μπορούν να δείξουν. Επίσης, στα broadcast βίντεο ο θεατής μπορεί να συντονιστεί ανά πάσα στιγμή. Ενώ, αν υπάρχει μόνο ένα I frame στην έναρξη του βίντεο, ο θεατής που συντονίζεται μετά την έναρξη του δεν θα μπορεί να λάβει πλήρη εικόνα. Τα I frames είναι ανεξάρτητα από τα άλλα πλαίσια και δεν μπορούν να κατασκευαστούν από άλλα πλαίσια [16].

2.2.2 Predicted Frames (P Frames)

Τα P frames είναι τα frames που υπολογίζονται με πρόβλεψη και σχετίζονται με ένα προηγούμενο I ή P frame. Με άλλα λόγια, κάθε P frame περιέχει μόνο τις αλλαγές από το προηγούμενο πλαίσιο. Οι αλλαγές, όμως, δεν μπορούν να καλύψουν ένα μεγάλο τμήμα. Για παράδειγμα, για ένα ταχέως κινούμενο αντικείμενο, οι νέες αλλαγές δεν μπορούν να καταγραφούν σε ένα P frame. Τα P frames μπορούν να κατασκευαστούν μόνο από προηγούμενα I ή P frames. Τα P frames φέρουν πολύ λιγότερη πληροφορία, άρα και μικρότερο μέγεθος απ' ό,τι τα άλλα είδη πλαισίων και να φέρουν ακόμη λιγότερα bits μετά τη συμπίεση δημιουργώντας καλύτερο ποσοστό συμπίεσης [16].

2.2.3 Bidirectional Frames (B Frames)

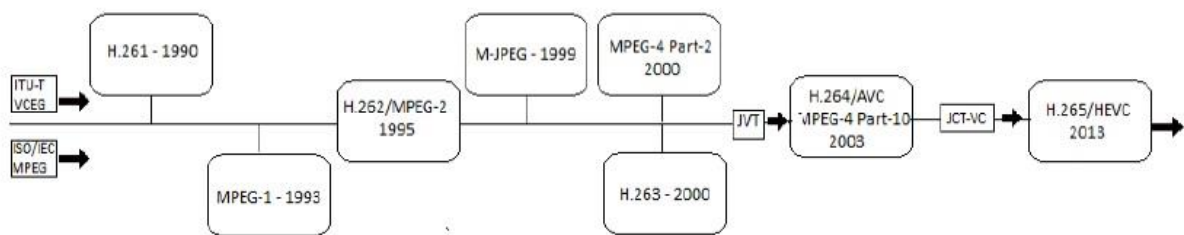
Τα B frames σχετίζονται με το προηγούμενο και το επόμενο I ή P frame. Με άλλα λόγια, κάθε B frame είναι σχετικό προς το παρελθόν και το μέλλον και έτσι χρησιμοποιούνται για τη μείωση του σφάλματος. Δεν συντελούν πολύ κατά την διάδοση των σφαλμάτων αφού δεν χρησιμοποιούνται σαν σημεία αναφοράς. Επιπλέον, μειώνουν σημαντικά το σφάλμα που μπορεί να προκύψει παίρνοντας τον μέσο όρο από δύο πλαίσια. Έχουν μικρό κύκλο ζωής αφού περιορίζεται μόνο σε αυτά και δεν επεκτείνονται κληροδοτώντας πληροφορίες σε άλλα πλαίσια [16]. Η Εικόνα 2 δείχνει πως τα I, P και B frames κατασκευάζονται από μία σειρά επτά πλαισίων.



Εικόνα 2. Κατασκευή των frames

2.3 Πρότυπα Κωδικοποίησης Ψηφιακού Βίντεο

Τα διαφορετικά πρότυπα κωδικοποίησης βίντεο χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους για τη συμπίεση των δεδομένων και ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα διαφέρουν σε bit rate, ποιότητα και χρόνο καθυστέρησης. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η εξέλιξη των προτύπων κωδικοποίησης που αναλύονται παρακάτω.



Εικόνα 3. Εξέλιξη προτύπων κωδικοποίησης

2.3.1 H.261

Το πρότυπο H.261 εισάχθηκε το 1990. Εκμεταλλεύεται και τον χωρικό και τον χρονικό πλεονασμό για την επίτευξη υψηλής συμπίεσης. Είχε προταθεί για μεταφορά βίντεο μέσω γραμμών χαμηλού bandwidth και για αυτό υποστηρίζει χαμηλή ανάλυση όπως CIF 352x288, QCIF 176x144 και περιορισμένο αριθμό frames ανά δευτερόλεπτο που κυμαίνεται από 7.5 ως 30 fps. Για αντιστάθμιση της κίνησης χρησιμοποιεί μόνο πρόβλεψη προς τα εμπρός, δηλαδή επιτρέπονται μόνο τα P frames. Έχει συμμετρική πολυπλοκότητα γιατί χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για συμπίεση και αποσυμπίεση. Η εκτίμηση κίνησης γίνεται σε τμήματα μεγέθους 16x6 [19].

2.3.2 MPEG-1

Το MPEG-1 εισάχθηκε από την ομάδα MPEG (Moving Picture Experts Group). Βασίζεται στην συσχέτιση που έχουν τα συνεχόμενα frames, δηλαδή στο ότι συνεχόμενες εικόνες θα έχουν πολύ μικρή διαφορά κι έτσι υπάρχει αρκετή πλεονάζουσα πληροφορία. Αρχικά, στόχευε στην αποθήκευση συγχρονισμένου ήχου και εικόνας σε CD και έτσι είχε περιορισμένο εύρος σε bit rate. Στο MPEG-1 χρησιμοποιώντας B frames η εκτίμηση κίνησης γίνεται πιο περίπλοκη και δημιουργήθηκε η ανάγκη για χρήση μιας πολυπλοκότερης μονάδας για την αντιστάθμιση της κίνησης. Μέσω προηγούμενων ή επόμενων I ή P frames γίνεται ο υπολογισμός των διανυσμάτων κίνησης. Επιπλέον, χρησιμοποιείται η δομή του συνόλου των εικόνων (Group of Pictures - GoP) που ξεκινά από ένα I frame και στην συνέχεια ακολουθείται από B και P frames, όπου αυτό επιτρέπει την τυχαία προσπέλαση της ακολουθίας fast forward και reverse. Υποστηρίζει μεγάλο αριθμό παραμέτρων εισόδου περιλαμβάνοντας μεταβλητό μέγεθος εικόνας και ρυθμό πλαισίων που μπορεί να προσδιοριστεί από τον χρήστη. Υποστηρίζει ανάλυση εικόνας 352x240 pixels (NTSC) ή 352x288 pixels (PAL) [29].

2.3.3 H.262/MPEG-2

Το MPEG-2 ή H.262 εισάχθηκε το 1995 από την ομάδα της MPEG και της ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector). Βασίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας όπως το MPEG-1. Αναπτύχθηκε για εφαρμογή στην ψηφιακή τηλεόραση, αφού ο προκάτοχος του το MPEG1 παρουσίαζε κάποιες ελλείψεις στην ψηφιακή εικόνα, όπως χαμηλή ποιότητα στα πρότυπα PAL και HDTV της τηλεόρασης. Επίσης, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιούσε ο προκάτοχος του ήταν αρκετά αναποτελεσματικός. Ο νέος αλγόριθμος που δημιουργήθηκε ήταν συμβατός και με αυτόν του MPEG1 για να υπάρχει συνοχή. Απαιτεί μεταβλητούς ρυθμούς μετάδοσης, καθώς ο βαθμός συμπίεσης μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την πολυπλοκότητα των πλαισίων που κωδικοποιούνται. Εφαρμόζεται σε ψηφιακή, δορυφορική και επίγεια τηλεόραση. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και για ψηφιακή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας. Με πολλές επιλογές στην ποιότητα στόχευε σε εφαρμογές που απαιτούσαν μεσαία και υψηλή ποιότητα. Η βασική ανάλυση της εικόνας είναι 704x480 (NTSC) ή 704x576 (PAL). Ο ρυθμός μετάδοσης κυμαίνεται από 3 - 100 Mbps. Ακόμη ένα κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι μπορεί να κωδικοποιήσει συνυφασμένες εικονοσειρές στο format 4:2:0 ενώ η εκτίμηση κίνησης γίνεται σε τμήματα μεγέθους 16x8 [16].

2.3.4 M-JPEG

Το Motion-JPEG βασίζει την συμπίεση του βίντεο στον εντοπισμό και στην εξάλειψη του χωρικού πλεονάσματος των εικόνων που αποτελούν το βίντεο. Αυτό του δίνει αντοχή σε λάθη κατά την μετάδοση. Αρχικά, αναπτύχθηκε για εφαρμογές πολυμέσων ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τώρα, χρησιμοποιείται για λήψη βίντεο από ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, κάμερες IP και σε κονσόλες παιχνιδιών. Το κάθε πλαίσιο μιας ακολουθίας βίντεο κωδικοποιείται ξεχωριστά σαν μια JPEG εικόνα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χρειάζεται λιγότερη υπολογιστική δύναμη και λιγότερη μνήμη από τις συσκευές. Επειδή, είναι καθαρά ένας ενδοπλαισιακός (intra frame) αλγόριθμος, η ποιότητα της εικόνας εξαρτάται αποκλειστικά από την πολυπλοκότητα του κάθε πλαισίου. Πλαίσια με πολύ ομαλές κινήσεις ή μονότονες επιφάνειες έχουν καλύτερη συμπίεση [36].

2.3.5 H.263

Το H.263 προτάθηκε από την ITU-T και ολοκληρώθηκε σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση ολοκληρώθηκε το 1995, η δεύτερη το 1997 και η τρίτη στα τέλη του 2000. Βασίζεται στο πρότυπο H.261 αλλά έχει σχεδιαστεί για μετάδοση μέσω του πρωτοκόλλου IP σε δίκτυα χαμηλών ταχυτήτων (64 - 128 Kbps). Χρησιμοποιεί I, P και B frames για να επιτύχει μεγαλύτερη συμπίεση. Αυτό το πρότυπο προσέφερε μια νέα σημαντική λειτουργία στα διανύσματα κίνησης που επιτρεπόταν να αναφέρονται σε θέσεις ανάμεσα σε pixels και έτσι παρείχε σημαντική βελτίωση στις περιοχές με υψηλή ανάλυση. Χρησιμοποιώντας τρισδιάστατο πίνακα κωδικών λέξεων μεταβλητού μήκους, παρουσίαζε σημαντική βελτίωση στην κωδικοποίηση του μεταβλητού μήκους. Υποστήριζε περισσότερες αναλύσεις σε σχέση με τον προκάτοχο του και μερικές από αυτές είναι οι Sub-QCIF, QCIF, CIF, 4CIF και 16CIF [17].

2.3.6 MPEG-4

Το MPEG-4 δημοσιεύτηκε το 2000 από την ομάδα της MPEG, ώστε να αντιμετωπιστούν οι ανάγκες που δημιουργήθηκαν από μια νέα γενιά εφαρμογών πολυμέσων που απαιτούσαν νέες λειτουργίες, όπως διαδραστικότητα με αντικείμενα, κλιμάκωση αντικειμένων και μεγαλύτερη ανεκτικότητα σε σφάλματα κατά την μετάδοση. Παρέχει υψηλή συμπίεση και μεγάλη ανοχή σε σφάλματα κατά την μετάδοση. Αυτό το πρότυπο παρέχει δύο βασικά προφίλ. Το απλό προφίλ που υποστηρίζει I frames και P frames καθώς και μικρότερο header που το κάνει συμβατό με τον προκάτοχο του, το H.263. Το άλλο προφίλ που παρέχει είναι το προχωρημένο που υποστηρίζει όλες τις λειτουργίες

του απλού προφίλ, καθώς επίσης και interlaced βίντεο, B frames, quarter-pel motion compensation, επιπλέον πίνακες κβαντοποίησης και global motion compensation. Οι ρυθμοί μετάδοσης κυμαίνονται από 4.8 - 64 Kbps [32].

2.4 Πρότυπο H.264/AVC MPEG-4 Part 10

Το πρότυπο H.264/MPEG-4 Part 10 ή Advanced Video Coding (AVC) είναι το πλέον διαδεδομένο πρότυπο για κωδικοποίηση βίντεο υψηλής ευκρίνειας. Αναπτύχθηκε από την Joint Video Team (JVT) που αποτελείται από εμπειρογνώμονες από την ITU-T Video Coding Experts Group (VCEG) και την ISO/IEC MPEG. Η αυξανόμενη ζήτηση για ψηφιακές υπηρεσίες και η αύξηση των τηλεοράσεων υψηλής ευκρίνειας δημιούργησαν την ανάγκη για όλο και πιο αποδοτική κωδικοποίηση. Επίσης, η μεταφορά πολυμέσων σε υπάρχουσες τεχνολογίες, όπως το xDSL, προσφέρουν χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης αντίθετα με τα κανάλια αναμετάδοσης. Έτσι, η πιο αποδοτική κωδικοποίηση θα δώσει την ευχέρεια μετάδοσης περισσότερων καναλιών ή καλύτερη ποιότητα βίντεο με τις υπάρχουσες τεχνολογίες μετάδοσης. Η κωδικοποίηση βίντεο για εφαρμογές τηλεπικοινωνιών εξελίχθηκε από τα προηγούμενα πρότυπα και διαφοροποιήθηκε για τις ψηφιακές υπηρεσίες (Integrated Services Digital Network - ISDN) και T1/E1 για να υποστηρίξει τις απλές αναλογικές υπηρεσίες (Public Switched Telephone Network - PSTN), τα κινητά ασύρματα δίκτυα και τα τοπικά δίκτυα (Local Area Networks - LAN). Είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να παρέχει τεχνικές λύσεις συμπεριλαμβάνοντας μεταξύ άλλων την αναμετάδοση μέσω καλωδίων, δορυφόρου, καλωδιακού modem, xDSL, για αποθήκευση σε οπτικούς και μαγνητικούς δίσκους, όπως DVD, αποθήκευση και διανομή επαγγελματικών ταινιών, βίντεο κατά παραγγελία (Video on Demand - VoD) ή για υπηρεσίες πολυμέσων συνεχούς ροής, υπηρεσίες συνομιλίας και τέλος, υπηρεσίες μηνυμάτων με πολυμέσα (Multimedia Messaging Service - MMS). Χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για κωδικοποίηση στους δίσκους Blue-ray και για live streaming [54].

2.4.1 Διαδικασία Κωδικοποίησης και Αποκωδικοποίησης

Ο κωδικοποιητής επεξεργάζεται το κάθε πλαίσιο του βίντεο σε macroblocks (16x16 pixels). Αρχικά κάνει πρόβλεψη (prediction) του macroblock βασιζόμενο σε δεδομένα από προηγούμενη κωδικοποίηση, ή ακόμα και από το ίδιο το πλαίσιο (intra prediction) ή από πλαίσια τα οποία έχουν ήδη κωδικοποιηθεί και αποσταλεί (inter prediction). Έπειτα, ένα σετ από δείγματα μετασχηματίζεται χρησιμοποιώντας ένα 4x4 ή 8x8 μετασχηματισμό ακεραίων, παρόμοιο με τον διακριτό μετασχηματισμό συνημίτονου.

Αυτός ο μετασχηματισμός παράγει ένα σύνολο από συντελεστές όπου ο καθένας χρησιμοποιείται σαν βάρος στο σετ των δειγμάτων για την πρότυπη βάση της ακολουθίας. Συνδυάζοντας την πρότυπη βάση με βάρη ξαναδημιουργούνται τα δείγματα στο αρχικό σετ. Στην έξοδο του μετασχηματισμού γίνεται κβαντοποίηση, δηλαδή ο κάθε συντελεστής διαιρείται με μια ακέραια τιμή. Η κβαντοποίηση μειώνει την ακρίβεια του μετασχηματισμού σύμφωνα με την παράμετρο κβαντοποίησης. Μεγάλη τιμή της παραμέτρου σημαίνει μεγαλύτερη συμπίεση, αρά μείωση της ποιότητας της εικόνας. Η διαδικασία της κωδικοποίησης παράγει ένα αριθμό από τιμές που πρέπει να κωδικοποιηθούν στην μορφή του συμπιεσμένου bit stream. Αυτές οι τιμές περιλαμβάνουν τους κβαντοποιημένους μετασχηματισμένους συντελεστές, πληροφορίες που βοηθούν τον αποκωδικοποιητή να αναπαράγει την πρόβλεψη και πληροφορίες που αφορούν την δομή των συμπιεσμένων δεδομένων και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κωδικοποίηση. Επίσης, περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν ολόκληρη την ακολουθία του βίντεο. Οι πιο πάνω τιμές μετατρέπονται σε δυαδικούς κώδικες χρησιμοποιώντας variable length encoding ή/και arithmetic coding.

Κατά την αποκωδικοποίηση ο αποκωδικοποιητής παραλαμβάνει ένα συμπιεσμένο H.264 bit stream. Τότε, αποκωδικοποιεί το κάθε στοιχείο του και εξάγει τις πληροφορίες. Έπειτα, οι κβαντοποιημένοι μετασχηματισμένοι συντελεστές ανακλιμακώνονται πολλαπλασιάζοντας τους με μια ακέραια τιμή για να επανέλθουν στην αρχική τους κλίμακα. Είναι η αντίστροφη διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε κατά τον μετασχηματισμό και την κβαντοποίηση για να ξαναδημιουργηθεί η ακολουθία των πλαισίων του βίντεο. Για κάθε macroblock ο αποκωδικοποιητής δημιουργεί μία παρόμοια πρόβλεψη σύμφωνα με αυτή που δημιούργησε ο κωδικοποιητής [37].

2.5 Πρότυπο H.265/HEVC

Το πρότυπο High Efficiency Video Coding (HEVC) είναι το πιο πρόσφατο έργο της Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC), δηλαδή την από κοινού συνεργασία της ITU-T VCEG και της ISO/IEC MPEG. Ο κύριος στόχος της προσπάθειας του προτύπου HEVC είναι να αποφέρει σημαντικά βελτιωμένη απόδοση συμπίεσης σε σχέση με τα υπάρχοντα πρότυπα που θα αγγίζει τη μείωση κατά 50% του ρυθμού δεδομένων για ίση ποιότητα βίντεο. Η αυξανόμενη δημοτικότητα των βίντεο υψηλής ευκρίνειας (High Definition - HD) και η απαίτηση για αναλύσεις μεγαλύτερες από HD (π.χ. 4k×2k ή 8k×4k ανάλυση) δημιουργούν ακόμη πιο ισχυρή ανάγκη για αποδοτικότερη κωδικοποίηση

ανώτερη της δυνατότητας του H.264/MPEG-4 AVC. Η ανάγκη αυτή είναι ακόμη μεγαλύτερη όταν η υψηλότερη ανάλυση συνοδεύεται από multiview απεικόνιση. Επιπλέον, η κίνηση δεδομένων που προκαλείται από εφαρμογές βίντεο που στοχεύουν κινητές συσκευές, ταμπλέτες, υπολογιστές, καθώς και οι ανάγκες μετάδοσης για video-on-demand υπηρεσίες, επιβάλλουν σοβαρές προκλήσεις στα σημερινά δίκτυα. Η αυξημένη επιθυμία για υψηλότερη ποιότητα και ανάλυση προκύπτει επίσης και σε κινητές εφαρμογές. Το HEVC έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει ουσιαστικά όλες τις υπάρχουσες εφαρμογές του H.264/MPEG-4 AVC και να επικεντρωθεί κυρίως σε δύο βασικά ζητήματα: την αυξημένη ανάλυση βίντεο και την αυξημένη χρήση των παράλληλων αρχιτεκτονικών επεξεργασίας [44].

2.5.1 Διαδικασία Κωδικοποίησης και Αποκωδικοποίησης

Πώς μπορεί το HEVC να κωδικοποιεί αρχεία βίντεο δύο φορές πιο αποτελεσματικά απ' όσα τα προηγούμενα πρότυπα κωδικοποίησης; Το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος των προτύπων συμπίεσης βίντεο προέρχεται από μια τεχνική γνωστή ως motion compensated prediction. Τα blocks των pixels που κωδικοποιούνται κάνοντας αναφορά σε μια άλλη περιοχή στο ίδιο πλαίσιο (intra reference) ή σε άλλο πλαίσιο (inter reference). Ενώ το H.264/AVC ορίζει macroblocks έως και 16×16 pixels, το HEVC μπορεί να περιγράψει μια πολύ μεγαλύτερη ποικιλία μεγεθών blocks, έως και 64×64 pixels. Το HEVC επιτρέπει στα blocks να κωδικοποιηθούν σε διάφορα μεγέθη σε σχέση με το υπολειπόμενο σφάλμα. Κάθε μονάδα κωδικοποίησης ανώτατου επιπέδου (CTU) πρώτα κωδικοποιείται ως πρόβλεψη quad-tree, όπου σε κάθε βάθος ο κωδικοποιητής αποφασίζει για κωδικοποίηση με συγχώνευση/παράλειψη, inter ή intra κωδικοποίηση. Το υπόλοιπο από αυτές τις προβλέψεις στη συνέχεια κωδικοποιείται με ένα δεύτερο quad-tree το οποίο προαιρετικά μπορεί να έχει μεγαλύτερο βάθος από ότι η πρώτη πρόβλεψη quad-tree. Για παράδειγμα, αυτό επιτρέπει στο υπολειπόμενο σφάλμα από 32×32 inter coded κωδικοποίηση μονάδας (CU) να εκπροσωπηθεί από ένα μείγμα 16×16 , 8×8 και 4×4 μετασχηματισμών. Επίσης, το HEVC μπορεί να κωδικοποιήσει τα διανύσματα κίνησης με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια, δίνοντας μια καλύτερη πρόβλεψη των blocks με λιγότερο υπολειπόμενο σφάλμα. Υπάρχουν 35 κατευθύνσεις intra picture, σε σύγκριση με τις 9 μόνο κατευθύνσεις για το H.264/AVC. Επιπλέον, το HEVC περιλαμβάνει το μηχανισμό adaptive motion vector prediction, μια νέα μέθοδο για τη βελτίωση του inter prediction [44].

Κεφάλαιο 3

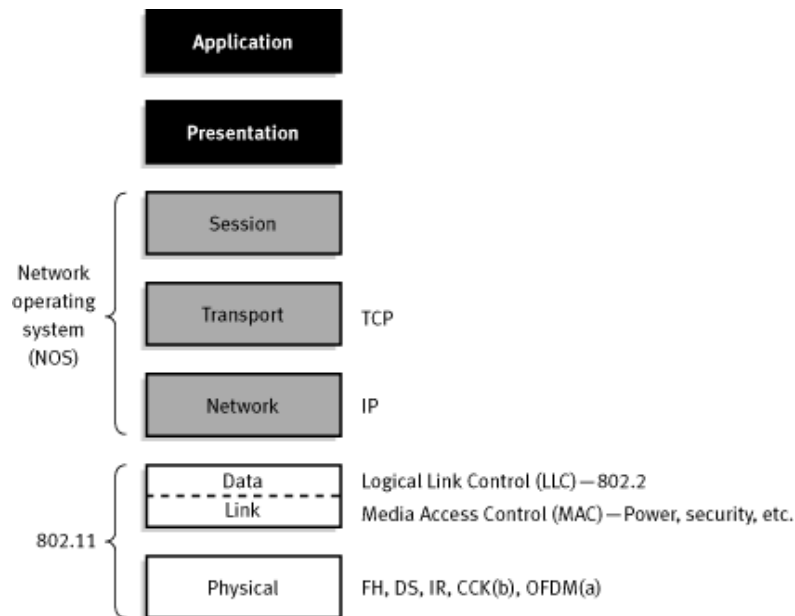
Τεχνολογίες Μετάδοσης Βίντεο και Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Οι υπάρχουσες τεχνολογίες για αποστολή βίντεο χωρίζονται σε αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους, όπως σπίτια, εμπορικά καταστήματα κ.α. και αυτές που θεωρούνται τεχνολογίες εξωτερικών χώρων και χρησιμοποιούνται κατά τη μετακίνηση στους δρόμους των πόλεων κ.α. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι υπεύθυνα για την ορθή αποστολή των δεδομένων από μια εφαρμογή σε μια άλλη εφαρμογή μέσω του ασύρματου δικτύου.

3.1 Ασύρματες Τεχνολογίες Εσωτερικών Χώρων

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο είναι αυτό στο οποίο ένας κινούμενος χρήστης μπορεί να συνδεθεί σε ένα τοπικό δίκτυο μέσω μια ασύρματης σύνδεσης. Το πρότυπο IEEE 802.11 περιγράφει τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks - WLAN). Το 802.11 είναι μια οικογένεια προδιαγραφών, ευρύτερα γνωστή ως Wi-Fi, από τον όρο Wireless Fidelity, για ασύρματα τοπικά δίκτυα που αναπτύχθηκαν από ομάδες εργασίας του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, το γνωστό Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Όλα τα πρότυπα που περιλαμβάνει το 802.11, χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο Ethernet και μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA/CA). Η μέθοδος διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε αρχικά ήταν το κλείδωμα μεταλλαγής φάσης ή διαμόρφωση διακριτής φάσης, Phase Shift Keying (PSK). Σε νεότερες προδιαγραφές όμως, χρησιμοποιούνται και άλλα σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης, όπως το Complementary Code Keying (CCK). Οι νεότερες μέθοδοι διαμόρφωσης παρέχουν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων [35].

Όπως όλα τα 802.x πρότυπα, έτσι και το 802.11 επικεντρώνεται στα δύο χαμηλότερα στρώματα του μοντέλου OSI (Open System Interconnection), δηλαδή στο φυσικό στρώμα (Physical Layer - PHY) και στο υπόστρωμα ελέγχου προσπέλασης μέσω (Medium Access Control - MAC) του στρώματος διασύνδεσης δεδομένων (Data Link Layer), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.

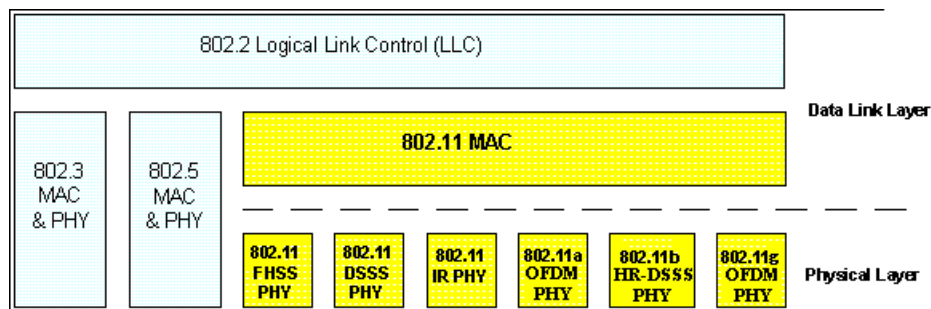


Εικόνα 4. Μοντέλο αναφοράς OSI

Το υπόστρωμα MAC ορίζει πώς γίνεται η εκχώρηση του καναλιού, δηλαδή ποιος θα μεταδώσει στη συνέχεια. Το υπόστρωμα ελέγχου λογικού συνδέσμου (Logical Link Control - LLC) του στρώματος Data Link βρίσκεται πάνω από το υπόστρωμα MAC, έχει υλοποιηθεί ως IEEE 802.2 και δουλειά του είναι να κρύβει τις διαφορές ανάμεσα στις διαφορετικές παραλλαγές του 802, έτσι ώστε να κάνει τις παραλλαγές αυτές «αόρατες» όσον αφορά το επίπεδο δικτύου.

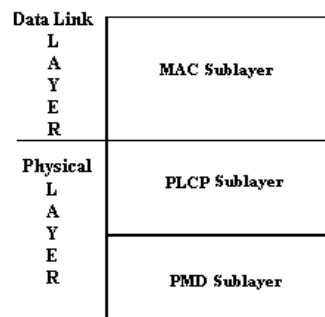
Η πρώτη έκδοση του Wi-Fi το 1997 καθορίζει τρεις επιτρεπόμενες τεχνικές μετάδοσης για το φυσικό στρώμα (PHY). Η μία μέθοδος περιλάμβανε μια υπέρυθρη εκδοχή (IR). Οι άλλες δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν ραδιοκύματα μικρής εμβέλειας χρησιμοποιώντας τεχνικές που ονομάζονται FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), που υποστήριζε ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps και DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), που υποστήριζε ρυθμό μετάδοσης 1-2 Mbps. Και οι δύο χρησιμοποιούν ένα τμήμα του φάσματος στο οποίο δεν απαιτείται ειδική άδεια, τη ζώνη ISM στα 2.4 GHz. Το 1999 παρουσιάστηκαν δύο νέες τεχνικές για επίτευξη υψηλότερου εύρους ζώνης. Οι τεχνικές αυτές ονομάζονται

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και HR-DSSS (High Rate DSSS) οι οποίες παρέχουν μέχρι τα 54 Mbps και τα 11 Mbps αντίστοιχα. Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται η διαστρωμάτωση του προτύπου 802.11.



Εικόνα 5. Διαστρωμάτωση του προτύπου 802.11

Η φιλοσοφία που ακολουθεί το πρότυπο 802.11 είναι η ύπαρξη ενός μόνο MAC που όμως υποστηρίζει περισσότερα του ενός φυσικά στρώματα. Κάθε φυσικό στρώμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, χωρίζεται σε δύο υποστρώματα.



Εικόνα 6. Φυσικό στρώμα προτύπου 802.11

Το υπόστρωμα PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) χρησιμεύει στην προσαρμογή των διαφόρων φυσικών στρωμάτων στο κοινό MAC. Το υπόστρωμα PMD (Physical Medium Dependent) περιέχει όλες τις λειτουργίες που απαιτούνται για τη μετάδοση της πληροφορίας από το εκάστοτε φυσικό στρώμα [41].

3.1.1 802.11a

Το πρωτόκολλο 802.11a χρησιμοποιεί την OFDM τεχνική διαμόρφωσης, λειτουργεί στη μπάνα των 5.2 GHz και παρέχει ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 54 Mbps. Στη πραγματικότητα όμως ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων πραγματοποιείται το πολύ στα 24 Mbps. Το 802.11a χρησιμοποιεί ένα εύρος ζώνης της τάξης των 300 MHz στη

ελεύθερη μπάντα των 5.2 GHz. Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communications Commission – FCC) των ΗΠΑ έχει διαιρέσει αυτό το φάσμα σε τρεις διακριτές περιοχές των 100 MHz, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, με διαφορετική ανώτατη ισχύ εκπομπής. Η χαμηλή μπάντα λειτουργεί από τα 5.15 έως τα 5.25 GHz και έχει μέγιστο στα 40 mW, η μεσαία μπάντα βρίσκεται στα 5.25 έως τα 5.35 GHz, με ανώτατο όριο τα 200 mW και η υψηλή μπάντα χρησιμοποιεί τα 5.725 έως τα 5.825 GHz, με μέγιστη ισχύ 800 mW, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 2.

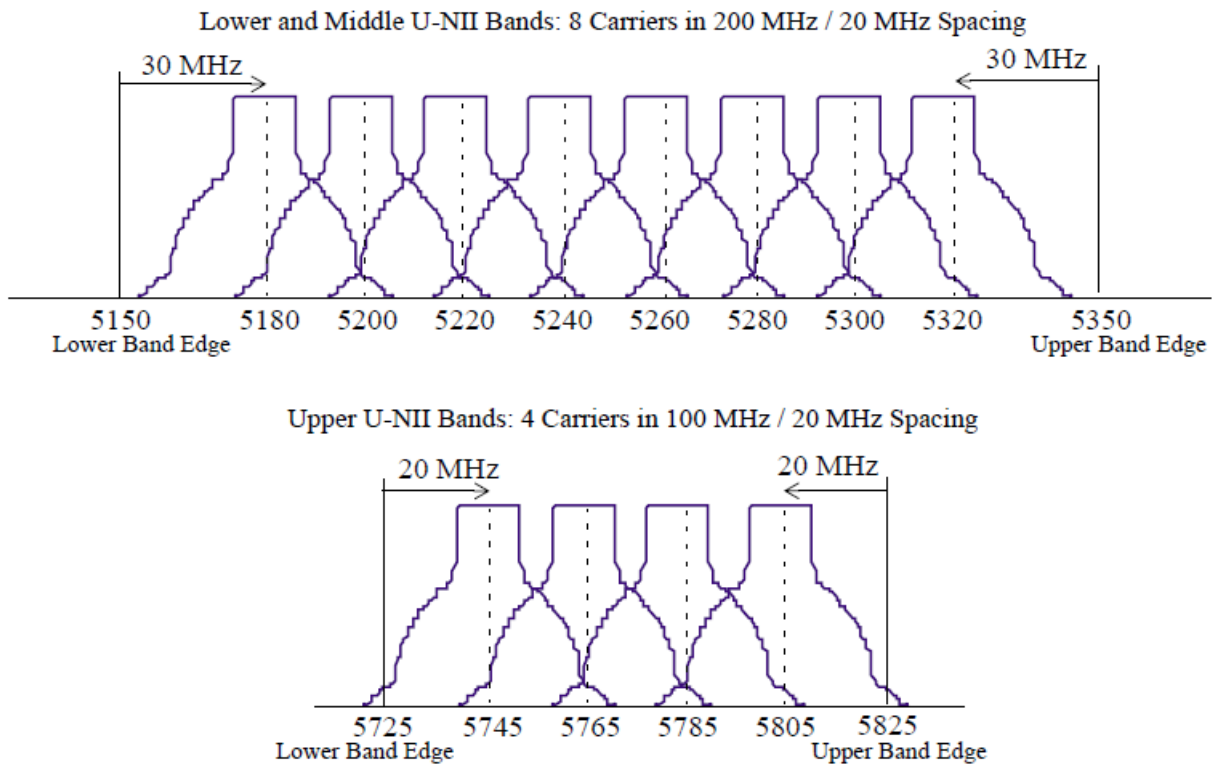
Regulatory domain	Band (GHz)	Operating channel numbers	Channel center frequencies (MHz)
United States	U-NII lower band (5.15–5.25)	36	5180
		40	5200
		44	5220
		48	5240
United States	U-NII middle band (5.25–5.35)	52	5260
		56	5280
		60	5300
		64	5320
United States	U-NII upper band (5.725–5.825)	149	5745
		153	5765
		157	5785
		161	5805

Πίνακας 1. Φάσμα συχνοτήτων 802.11a

Frequency band (GHz)	Maximum output power with up to 6 dBi antenna gain (mW)
5.15–5.25	40 (2.5 mW/MHz)
5.25–5.35	200 (12.5 mW/MHz)
5.725–5.825	800 (50 mW/MHz)

Πίνακας 2. Μέγιστη ισχύς εκπομπής 802.11a

Σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου έχουν διατεθεί διαφορετικά ποσά του φάσματος, έτσι η γεωγραφική θέση ουσιαστικά καθορίζει πόσο εύρος της ζώνης των 5.2 GHz είναι διαθέσιμο. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η FCC έχει παραχωρήσει και τις τρεις ζώνες για μεταδόσεις χωρίς άδεια. Στην Ευρώπη όμως, μόνο η χαμηλή και η μεσαία μπάντα είναι διαθέσιμες [21]. Μέσα στο συνολικό φάσμα των 300 MHz υπάρχουν δώδεκα κανάλια των 20 MHz, διαχωρισμένα όπως φαίνονται στην Εικόνα 7.



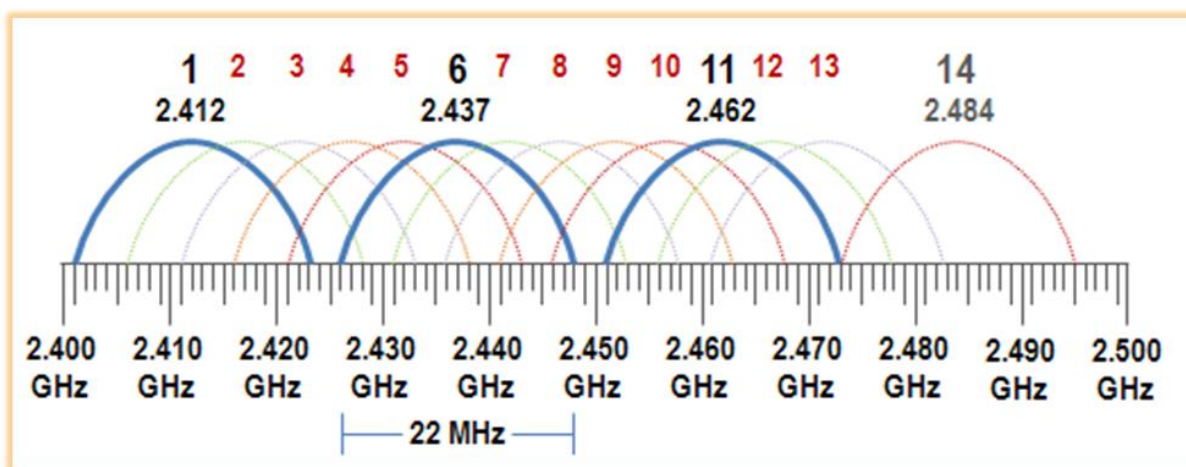
Εικόνα 7. Διαχωρισμός καναλιών 802.11a

Η χρήση της ζώνης των 5.2 GHz δίνει στο 802.11a ένα σημαντικό πλεονέκτημα, δεδομένου ότι η ζώνη των 2.4 GHz χρησιμοποιείται τόσο έντονα και από άλλες συσκευές έως σε σημείο συνωστισμού. Η υποβάθμιση που προκαλείται από τις συγκρούσεις αυτές μπορεί να προκαλέσει συχνές διακοπές σύνδεσης και την υποβάθμιση των υπηρεσιών. Ωστόσο, η υψηλή συχνότητα λειτουργίας του 802.11a έχει επίσης και ένα μικρό μειονέκτημα. Τα σήματα δεν μπορούν να διεισδύσουν τόσο όσο εκείνα του 802.11b επειδή απορροφώνται πιο εύκολα από τοίχους και άλλα στερεά αντικείμενα στην πορεία τους, επειδή η απώλεια διαδρομής της ισχύς του σήματος είναι ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας σήματος [33].

3.1.2 802.11b

Στο πρωτόκολλο 802.11b η μέθοδος διαμόρφωσης που επιλέχθηκε είναι μια εξέλιξη του DSSS γνωστή ως Complementary Code Keying (CCK). Αρχικά, το 802.11b ήταν το πιο δημοφιλές πρότυπο λόγω του χαμηλού κόστους του, αλλά όταν τα επόμενα πρότυπα που προσέφεραν γρηγορότερες ταχύτητες κόστιζαν ελαφρώς περισσότερο, το 802.11b άρχισε να χάνει τη δημοτικότητα του. Αυτό το πρότυπο εκπέμπει στη συχνότητα των 2.4 GHz και μπορεί να μεταδώσει μέχρι 11 Mbps. Υπάρχουν 14 κανάλια με εύρος 22 MHz το καθένα και σε απόσταση 5 MHz μεταξύ τους (με εξαίρεση ένα διάστημα 12 MHz πριν από

το κανάλι 14), όπως φαίνεται στην Εικόνα 8. Προκειμένου δύο κανάλια να μη συμπίπτουν, πρέπει να υπάρχουν τέσσερα κανάλια ανάμεσα τους. Τα κανάλια 1, 6, 11 και 14 είναι θεωρητικά τα μόνα μη αλληλεπικαλυπτόμενα κανάλια [40].



Εικόνα 8. Διαχωρισμός καναλιών 802.11 b/g

Η μέγιστη ισχύς εκπομπής στην Ευρώπη, συμπεριλαμβανομένης της κεραίας 5 dBi, είναι 20 dBm EIRP μέγιστο σε όλο το φάσμα των 802.11b/g [34]. Στις ΗΠΑ, οι ακτινοβολούμενες εκπομπές θα πρέπει επίσης να συμμορφώνονται με τα πρότυπα εκπομπών ANSI. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εξόδου σύμφωνα με τις πρακτικές που καθορίζονται από τους κατάλληλους ρυθμιστικούς φορείς δίνεται στον Πίνακα 3 [24].

Maximum output power	Geographic location
1000 mW	USA
100 mW (EIRP)	Europe
10 mW/MHz	Japan

Πίνακας 3. Μέγιστη ισχύς εκπομπής 802.11 b/g

3.1.3 802.11g

Η IEEE πιστοποίησε ένα νέο πρότυπο, το 802.11g, από τη συγχώνευση δύο ασύμβατων προτύπων ασύρματης δικτύωσης, το 802.11b (πηγαίνει μακριά, αλλά όχι γρήγορα) και το 802.11a (πηγαίνει γρήγορα, αλλά όχι μακριά). Το νέο πρότυπο φτάνει σε απόσταση 45 μέτρων περίπου και η τελική του ταχύτητα είναι 54 Mbps [34]. Το σύστημα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στο 802.11g είναι OFDM (όπως στο 802.11a) με ρυθμούς δεδομένων 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 και 54 Mbps και μετατρέπεται σε CCK (όπως

το πρότυπο 802.11b) για 5.5 και 11 Mbps και σε DBPSK / DQPSK + DSSS για 1 και 2 Mbps. Παρ' όλο που το 802.11g λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με το 802.11b, μπορεί να επιτύχει υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, λόγω της κληρονομιάς του από το 802.11a [27]. Το πρωτόκολλο είναι συμβατό με το 802.11b οπότε και αυτό διαχωρίζεται σε 14 κανάλια των 22 MHz, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8, επίσης για τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τηρούνται οι ίδιες προδιαγραφές με το πρωτόκολλο 802.11b, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Για τα παραπάνω πρότυπα ο Πίνακας 4 δείχνει την ευαισθησία δέκτη (receiver sensitivity) και το ρυθμό δεδομένων (data rate) ανά διαμόρφωση (modulation).

Minimum Sensitivity (dBm)	Modulation	Data Rate (Mb/s)
-82	BPSK	6
-81	BPSK	9
-79	QPSK	12
-77	QPSK	18
-74	16-QAM	24
-70	16-QAM	36
-66	64-QAM	48
-65	64-QAM	54

Πίνακας 4. Ευαισθησία δέκτη και ρυθμός δεδομένων ανά διαμόρφωση 802.11b/g.

3.1.4 802.11n

Το 802.11n είναι ένα πρότυπο ασύρματης δικτύωσης που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για να αυξήσει τον αριθμό δεδομένων. Σκοπός του είναι να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου των δύο προηγούμενων προτύπων, 802.11a και 802.11g, με μια σημαντική αύξηση στο μέγιστο αριθμό δεδομένων από τα 54 Mbps στα 600 Mbps με τη χρήση των τεσσάρων spatial streams με πλάτος καναλιού 40 MHz [42]. Το 802.11n υποστηρίζει το σύστημα Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων (Multiple Input Multiple Output - MIMO), όπως επίσης έχει και βελτιώσεις σε θέματα ασφάλειας. Το πρότυπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις δύο ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων (2.4 GHz ή 5.2 GHz). Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για την ανταλλαγή περισσότερων πληροφοριών από ότι είναι δυνατόν χρησιμοποιώντας μία μόνο κεραία. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι μέσω του Spatial Division Multiplexing (SDM), το

οποίο πολυπλέκει πολλαπλές ανεξάρτητες ροές δεδομένων που μεταφέρονται ταυτόχρονα μέσα σε ένα κανάλι του εύρους ζώνης. Το MIMO Space Division Multiplexing (SDM) μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ταχύτητα δεδομένων όσο ο αριθμός των spatial streams αυξάνεται. Κάθε spatial stream απαιτεί μια κεραία τόσο για τον πομπό όσο και για τον δέκτη. Επιπλέον, η τεχνολογία MIMO απαιτεί μια ξεχωριστή αλυσίδα ραδιοσυχνοτήτων και έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό για κάθε κεραία MIMO, καθιστώντας το πιο ακριβό να εφαρμοστεί σε σχέση με τα άλλα συστήματα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του 802.11n είναι τα κανάλια με πλάτος 40 MHz. Αυτό διπλασιάζει το πλάτος του καναλιού από τα 20 MHz των προηγούμενων προτύπων και παρέχει το διπλάσιο αριθμό δεδομένων σε σχέση με ένα μόνο κανάλι των 20 MHz [31]. Η μέγιστη ισχύς εκπομπής για την Αμερική και την Ευρώπη ορίζεται μέχρι το 1 W, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5 και στον Πίνακα 6 αντίστοιχα, ενώ για την Ιαπωνία μέχρι τα 25 mW [23].

Regulatory class	Channel starting frequency (GHz)	Channel spacing (MHz)	Channel set	Transmit power limit (mW)	Transmit power limit (EIRP)	Emissions limits set	Behavior limits set
2	5	20	52, 56, 60, 64	200	—	1	1,4,16
4	5	20	100, 104, 108, 112, 116, 120, 124, 128, 132, 136, 140	200	—	1	1,4,16
16–25521	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved
22	5	40	36, 44	40	—	1	1,2,13
23	5	40	52, 60	200	—	1	1,4,13
24	5	40	100, 108, 116, 124, 132	200	—	1	1,4,13,16
25	5	40	149, 157	800	—	1	1,13
26	5	40	149, 157	1000	—	4	10,13
27	5	40	40, 48	40	—	1	1,2,14
28	5	40	56, 64	200	—	1	1,4,14
29	5	40	104, 112, 120, 128, 136	200	—	1	1,4,14,16
30	5	40	153, 161	800	—	1	1,14
31	5	40	153, 161	1000	—	4	10,14
32	2,407	40	1–7	1000	—	4	10,13
33	2,407	40	5–11	1000	—	4	10,14
34–255	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved

Πίνακας 5. Μέγιστη ισχύς εκπομπής 802.11n στις ΗΠΑ

Regulatory class	Channel starting frequency (GHz)	Channel spacing (MHz)	Channel set	Transmit power limit (mW)	Emissions limits set	Behavior limits set
5	5	40	36, 44	200	1	2,3,13
6	5	40	52, 60	200	1	1,3,4,13
7	5	40	100, 108, 116, 124, 132	1000	1	1,3,4,13
8	5	40	40, 48	200	1	2,3,14
9	5	40	56, 64	200	1	1,3,4,14
10	5	40	104, 112, 120, 128, 136	1000	1	1,3,4,14
11	2.407	40	1-9	100	4	10,13
12	2.407	40	5-13	100	4	10,14
513-255	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved

Πίνακας 6. Μέγιστη ισχύς εκπομπής 802.11n στην Ευρώπη.

Ο Πίνακας 7 δείχνει την ευαισθησία δέκτη (receiver sensitivity) και το ρυθμό δεδομένων (data rate) ανά διαμόρφωση (modulation).

Minimum Sensitivity (dBm) 20MHz Channel	Minimum Sensitivity (dBm) 40MHz Channel	Modulation	Data Rate (Mb/s) GI=800ns 20MHz Channel	Data Rate (Mb/s) GI=800ns 40MHz Channel	Data Rate (Mb/s) GI=400ns 20MHz Channel	Data Rate (Mb/s) GI=400ns 40MHz Channel
-82	-79	BPSK	6.5	13.5	7.2	15
-79	-76	QPSK	13	27	14.4	30
-77	-74	QPSK	19.5	40.5	21.7	45
-74	-71	16-QAM	26	54	28.9	60
-70	-67	16-QAM	39	81	43.3	90
-66	-63	64-QAM	52	108	57.8	120
-65	-62	64-QAM	58.5	121.5	65	135
-64	-61	64-QAM	65	135	72.2	150

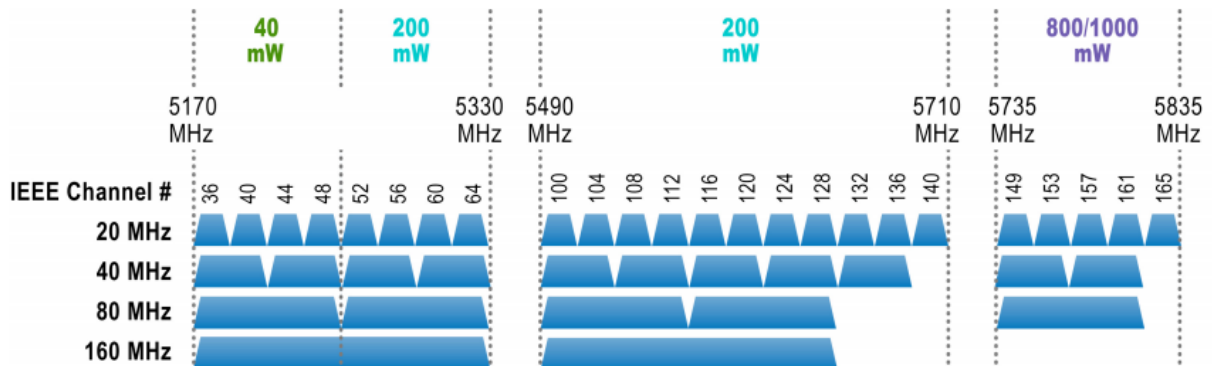
Πίνακας 7. Ευαισθησία δέκτη και ρυθμός δεδομένων ανά διαμόρφωση στο 802.11n.

3.1.5 802.11ac

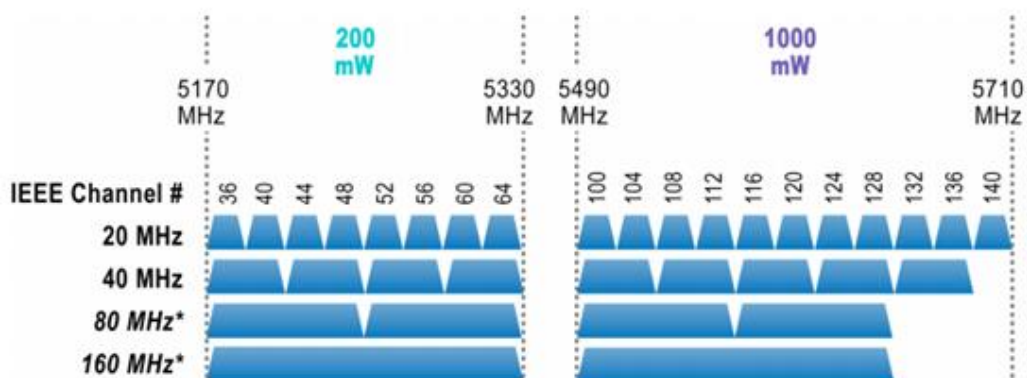
Το 802.11ac λειτουργεί στη συχνότητα των 5.2 GHz. Το 802.11ac επιτυγχάνει αύξηση της ταχύτητας εστιάζοντας σε τρεις διαφορετικές μεθόδους. Μεγαλύτερο εύρος καναλιού, το οποίο από τα 40 MHz πηγαίνει μέχρι και τα 80 ή ακόμα και τα 160 MHz. Πυκνότερη διαμόρφωση, χρησιμοποιώντας 256-QAM από τα 64-QAM και την τεχνολογία MIMO. Ενώ το 802.11n σταματάει στα τέσσερα spatial streams, το 802.11ac μπορεί να φτάσει τα οκτώ. Οι δυσκολίες στο σχεδιασμό και το κόστος κράτησαν το 802.11n σε ένα, δύο, ή τρία

spatial streams και δεν έχουν αλλάξει πολύ ούτε στο 802.11ac κατά τη πρώτη έκδοση του, οπότε στα 80 MHz εύρος καναλιού φτάνει έως τα 1.3 Gbps. Οι επόμενες γενιές υπόσχονται ακόμα πιο μεγάλη συγχώνευση καναλιών και περισσότερα spatial streams που θα αυξήσουν το ρυθμό δεδομένων μέχρι τα 6.93 Gbps, με τη χρήση 8 spatial streams και 160 MHz κανάλι. Το 802.11ac είναι το μέλλον των ασύρματων τοπικών δικτύων, αλλά πιστοποιημένα Wi-Fi Access Points 802.11ac δεν υπάρχουν ακόμη διαθέσιμα. Το 802.11ac μπορεί να προβάλλει πλήρη HD βίντεο σε πολλαπλούς χρήστες, πετυχαίνει υψηλότερη πυκνότητα χρηστών, μεγαλύτερο Quality of Service (QoS) και περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας [10].

Το 802.11ac διευκρινίζει ότι τα κανάλια των 80 MHz αποτελούνται από δύο παρακείμενα κανάλια των 40 MHz χωρίς καμία επικάλυψη μεταξύ των καναλιών των 80 MHz. Αυτό οδηγεί στη κατανομή των καναλιών όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 9 και στην Εικόνα 10 για τις ΗΠΑ και την Ευρώπη αντίστοιχα. Για τις ΗΠΑ αντιστοιχούν πέντε διαθέσιμα κανάλια των 80 MHz, ενώ στην Ευρώπη και την Ιαπωνία αντιστοιχούν τέσσερα κανάλια [39]. Επίσης η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς φτάνει το 1 Watt και για τις δύο περιοχές [22].



Εικόνα 9. Διαχωρισμός καναλιών 802.11ac στις ΗΠΑ



Εικόνα 10. Διαχωρισμός καναλιών 802.11ac στην Ευρώπη

Ο Πίνακας 8 δείχνει την ευαισθησία δέκτη (receiver sensitivity) και το ρυθμό δεδομένων (data rate) ανά διαμόρφωση (modulation).

Min. Sensitivity (dBm) 20MHz Ch.	Min. Sensitivity (dBm) 40MHz Ch.	Min. Sensitivity (dBm) 80MHz Ch.	Min. Sensitivity (dBm) 80+80MHz Ch.	Modulation	Data Rate (Mb/s) GI=800ns 20MHz 1SS	Data Rate (Mb/s) GI=400ns 20MHz 1SS
-82	-79	-76	-73	BPSK	6.5	7.2
-79	-76	-73	-70	QPSK	13	14.4
-77	-74	-71	-68	QPSK	19.5	21.7
-74	-71	-68	-65	16-QAM	26	28.9
-70	-67	-64	-61	16-QAM	39	43.3
-66	-63	-60	-57	64-QAM	52	57.8
-65	-62	-59	-56	64-QAM	58.5	65
-64	-61	-58	-55	64-QAM	65	72.2
-59	-56	-53	-50	256-QAM	78	86.7
-57	-54	-51	-48	256-QAM	86.7	96.3

Channel Width	Spatial Streams	Data Rate (Mb/s) GI=800ns 160MHz 8SS	Data Rate (Mb/s) GI=400ns 160MHz 8SS
		468	520
	x2 for 2SS	939	1040
	x3 for 3SS	1404	1560
x2.1 for 40MHz	x4 for 4SS	1872	2080
x4.5 for 80MHz	x5 for 5SS	2808	3120
x9 for 160MHz	x6 for 6SS	3744	4160
	x7 for 7SS	4212	4680
	x8 for 8SS	4680	5200
		5616	6240
		6240	6933.3

Πίνακας 8. Ευαισθησία δέκτη και ρυθμός δεδομένων ανά διαμόρφωση στο 802.11ac.

3.2 Ασύρματες Τεχνολογίες Εξωτερικών Χώρων

Η εποχή των κινητών δικτύων άρχισε το 1980 αλλά από τότε έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτών, όπως κυρίως τα κυψελοειδή συστήματα, επηρεάζει τις παραμέτρους του καναλιού που έχουν μεγάλη σημασία. Αυτά τα συστήματα έχουν τρεις βασικούς στόχους [38]:

- **Κάλυψη και κινητικότητα:** Το σύστημα θα πρέπει να είναι διαθέσιμο σε όλες τις περιοχές όπου οι χρήστες επιθυμούν να το χρησιμοποιήσουν. Επίσης, το σύστημα πρέπει να παρέχει κινητικότητα σε σχέση με την κατανομή των πόρων και τη στήριξη της συνεργασίας μεταξύ των διαφορετικών προτύπων.
- **Χωρητικότητα:** Καθώς ο αριθμός των χρηστών σε ένα κινητό σύστημα μεγαλώνει, οι απαιτήσεις που υπάρχουν για την διαθεσιμότητα των πόρων από το φάσμα αυξάνονται αναλογικά. Αυτές οι απαιτήσεις επιδεινώνονται από την αυξανόμενη χρήση των υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων. Αυτό απαιτεί την αύξηση του αριθμού των καναλιών και πυκνότερη επαναχρησιμοποίηση των καναλιών μεταξύ των κυψελών, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα αποκλεισμού ή διακοπής κλήσεων. Μία κλήση αποκλείεται όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα κανάλια στο δίκτυο και έτσι ο χρήστης δεν έχει πρόσβαση σε αυτό. Εάν μια κλήση πέσει, μπορεί να διακόπτεται επειδή ο χρήστης κινείται σε μια κυψέλη χωρίς ελεύθερα κανάλια. Διακοπή κλήσεων μπορεί να επίσης να προκύψει από ανεπαρκή κάλυψη.
- **Ποιότητα:** Σε ένα «ώριμο» δίκτυο, δίνεται έμφαση στη διασφάλιση ότι οι υπηρεσίες που παρέχονται στους χρήστες είναι υψηλής ποιότητας. Αυτό περιλαμβάνει την «καθαρή» ποιότητα ομιλίας σε ένα σύστημα φωνής και το ποσοστό λάθους δυαδικών ψηφίων (Bit Error Rate - BER), απόδοσης και καθυστέρησης σε ένα σύστημα δεδομένων.

3.2.1 Πρώτη Γενιά (1G)

Αρχικά, η κινητή τηλεφωνία χρησιμοποιούσε αναλογικές τεχνολογίες για την πραγματοποίηση τηλεφωνικών κλήσεων και αποτελούταν από διάφορα πρότυπα που το καθένα χρησιμοποιούταν και σε διαφορετικές χώρες. Μερικά από αυτά ήταν το Advanced Mobile Phone Service (AMPS), το Nordic Mobile Telephone (NMT) και το Total Access Communication System (TACS). Όλα τα πρότυπα χρησιμοποιούσαν τεχνικές διαμόρφωσης συχνότητας για τις τηλεφωνικές κλήσεις και όλες οι αποφάσεις για

συντονισμό των κλήσεων λαμβάνονταν από κεντρικούς σταθμούς. Το φάσμα των συχνοτήτων χωριζόταν σε κανάλια και για κάθε κλήση παραχωρούταν δύο κανάλια. Επειδή υποστήριζε μόνο τηλεφωνικές κλήσεις η ταχύτητα του ήταν μέχρι 2.4 Kbps [52].

3.2.2 Δεύτερη Γενιά (2G)

Η δεύτερη γενιά (2G) των κινητών δικτύων εισάχθηκε αρχικά το 1991. Χρησιμοποιούσε ψηφιακά σήματα αντίθετα από την πρώτη γενιά που ήταν αναλογικά, έτσι υπήρχε μεγαλύτερη και πιο αποδοτική συμπίεση και έτσι μπορούσαν να πραγματοποιούνται περισσότερες κλήσεις χρησιμοποιώντας το ίδιο εύρος ζώνης. Κύριος στόχος της ήταν οι τηλεφωνικές κλήσεις αλλά και η αποστολή δεδομένων μικρού μεγέθους όπως αποστολή γραπτών μηνυμάτων, εικόνων και μηνυμάτων πολυμέσων. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνταν χωριζόνταν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο πολυπλεξίας, Time Division Multiple Access (TDMA) και Code Division Multiple Access (CDMA). Τα βασικά πρότυπα του ήταν το Global System for Mobile communications (GSM) που λειτουργούσε με TDMA, το cdmaOne που λειτουργούσε με CDMA, Το Digital AMPS (D-AMPS) που λειτουργούσε με TDMA και το Pacific Digital Cellular (PDC) που λειτουργούσε με TDMA. Η ταχύτητα του ήταν μέχρι 64 Kbps [11].

Η εξέλιξη της δεύτερης γενιάς, όπου έχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες μέχρι και 144 Kbps, μπορούσε να χρησιμοποιήσει και το δίκτυο της δεύτερης γενιάς, αλλά η διαφορά τους είναι ότι το δίκτυο είναι packet switching αντί για circuit switching που ήταν το δίκτυο της δεύτερης γενιάς. Εισάχθηκαν νέες τεχνολογίες όπως το High Speed Circuit Switched Data (HSCSD), το General Packet Radio Service (GPRS) και Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE) που βασικά ήταν επεκτάσεις του GSM. Με την εισαγωγή των νέων τεχνολογιών μπορούσε να υποστηρίξει αποστολή και λήψη email και πλοήγηση στο διαδίκτυο. Το HSCSD χρησιμοποιούσε ταυτόχρονα πολλαπλά time slots για την αποστολή και λήψη των δεδομένων, έτσι επιτύγχανε αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων σε 14.4 Kbps από τα 9.6 Kbps που πρόσφερε το GSM. Το GPRS βασιζόταν στην λειτουργία μεταγωγής πακέτου και έτσι μπορούσε να παρέχει την πρόσβαση στο διαδίκτυο. Χρησιμοποιούσε 8 time slots και είχε θεωρητικές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων 144 Kbps. Αργότερα, εισάχθηκε και το EDGE που επιτύγχανε θεωρητικές ταχύτητες δεδομένων μέχρι και 473 Kbps με χρήση 8 time slots [53].

Για την τεχνολογία GSM υπάρχουν τέσσερις τύποι handover [18]:

- Intra-BTS handover: Αυτή η μορφή handover προκύπτει εάν απαιτείται αλλαγή στη συχνότητα που χρησιμοποιείται από το κινητό, λόγω παρεμβολών ή άλλων λόγων. Σε αυτήν την περίπτωση το κινητό παραμένει συνδεδεμένο με τον ίδιο πομποδέκτη του σταθμού βάσης, αλλά αλλάζει κανάλι.
- Inter-BTS Intra BSC handover: Αυτό το είδος handover λαμβάνει χώρα όταν το κινητό κινείται έξω από την περιοχή κάλυψης ενός BTS προς ένα άλλο το οποίο ελέγχεται από το ίδιο BSC. Σε εαυτή τη περίπτωση το BSC εκτελεί το handover και παραχωρεί ένα νέο κανάλι στο κινητό πριν αποδεσμεύσει το παλιό BTS από την επικοινωνία του με το κινητό.
- Inter-BSC handover: Όταν το κινητό κινείται εκτός των κυψελών που ελέγχονται από ένα BSC, πραγματοποιείται μια πιο περίπλοκη μορφή handover, το οποία δε συμβαίνει μόνο μεταξύ των BTS αλλά και από ένα BSC σε ένα άλλο. Γι' αυτό το λόγο το handover ελέγχεται από το MSC.
- Inter-MSC handover: Αυτό το handover συμβαίνει όταν υπάρχει αλλαγή μεταξύ των δικτύων. Τα δύο MSC που εμπλέκονται διαπραγματεύονται τον έλεγχο του handover.

Οι συχνότητες λειτουργίας της 2G τεχνολογίας χωρίζονται σε 8 μπάντες όπως φαίνεται στον Πίνακα 9, με την Ευρώπη να χρησιμοποιεί τις GSM 900 (E-GSM) και DCS 1800 και την Αμερική τις GSM 850 και PCS 1900 [12].

System	Band	Uplink	Downlink	Channel Number
GSM 450	450	450.4 - 457.6	460.4 - 467.6	259 - 293
GSM 480	480	478.8 - 486.0	488.8 - 496.0	306 - 340
GSM 850	850	824.0 - 849.0	869.0 - 894.0	128 - 251
GSM 900 (P-GSM)	900	890.0 - 915.0	935.0 - 960.0	1 - 124
GSM 900 (E-GSM)	900	880.0 - 915.0	925.0 - 960.0	975 - 1023, (0, 1-124)
GSM-R (R-GSM)	900	876.0 - 915.0	921.0 - 960.0	955 - 973, (0, 1-124, 975 - 1023)
DCS 1800	1800	1710.0 - 1785.0	1805.0 - 1880.0	512 - 885
PCS 1900	1900	1850.0 - 1910.0	1930.0 - 1990.0	512 - 810

Πίνακας 9. Συχνότητες λειτουργίας της τεχνολογίας 2G

Η ισχύς εκπομπής για τους σταθμούς βάσης κυμαίνεται από τα 2.5 W μέχρι τα 640 W, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 10, βέβαια στην Ελλάδα υπάρχουν οι αντίστοιχοι περιορισμοί για την μέγιστη ισχύ εκπομπής που θέτονται από την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ) και ορίζουν τα τυπικά επίπεδα ισχύος σε

αγροτικό περιβάλλον στα 40 W και για αστικό περιβάλλον στα 10 W [58]. Για τις κινητές συσκευές η ισχύς εκπομπής κυμαίνεται από τα 0.25 W έως τα 8 W, όπως φαίνεται στον Πίνακα 11 και η ευαισθησία του δέκτη ορίζεται μέχρι τα -104 dBm για τους σταθμούς βάσης και -102 dBm για τις κινητές συσκευές [12].

GSM 400 & GSM 900 & GSM 850 & MXM 850		DCS 1 800 & PCS 1 900 & MXM 1900	
TRX power class	Maximum output power	TRX power class	Maximum output power
1	320 - (< 640) W	1	20 - (< 40) W
2	160 - (< 320) W	2	10 - (< 20) W
3	80 - (< 160) W	3	5 - (< 10) W
4	40 - (< 80) W	4	2,5 - (< 5) W
5	20 - (< 40) W		
6	10 - (< 20) W		
7	5 - (< 10) W		
8	2,5 - (< 5) W		

Πίνακας 10. Ισχύς εκπομπής σταθμών βάσης τεχνολογίας 2G

Power class	GSM 400 & GSM 900 & GSM 850 Nominal Maximum output power	DCS 1 800 Nominal Maximum output power	PCS 1 900 Nominal Maximum output power	Tolerance (dB) for conditions	
				normal	extreme
1	-----	1 W (30 dBm)	1 W (30 dBm)	±2	±2,5
2	8 W (39 dBm)	0,25 W (24 dBm)	0,25 W (24 dBm)	±2	±2,5
3	5 W (37 dBm)	4 W (36 dBm)	2 W (33 dBm)	±2	±2,5
4	2 W (33 dBm)			±2	±2,5
5	0,8 W (29 dBm)			±2	±2,5

Πίνακας 11. Ισχύς εκπομπής κινητών συσκευών τεχνολογίας 2G/3G/4G

3.2.3 Τρίτη Γενιά (3G)

Η τρίτη γενιά (3G) κινητών δικτύων εισάχθηκε το 2000. Τα δίκτυα της χρησιμοποιούν νέα αρχιτεκτονική για να μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων και πιο προηγμένες υπηρεσίες. Υποστηρίζει την δημιουργία βιντεοκλήσεων, κινητή πρόσβαση στο διαδίκτυο, κινητή τηλεόραση και ευζωνικές ασύρματες υπηρεσίες δεδομένων. Περιλαμβάνει δύο βασικές τεχνολογίες, την Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) για την Ευρώπη που βασίζεται στο Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) με θεωρητικές ταχύτητες μέχρι 11 Mbps και την τεχνολογία CDMS2000 για την Βόρεια Αμερική που έχει θεωρητικές ταχύτητες μέχρι 14.7 Mbps [28].

Η εξέλιξη του 3G εισάγει την τεχνολογία High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) που βασικά είναι αναβάθμιση των WCDMA δικτύων. Με αυτή την αναβάθμιση επιτυγχάνει αύξηση στο ρυθμό κατεβάσματος με θεωρητική ταχύτητα κατεβάσματος 84 Mbps και θεωρητική ταχύτητα ανεβάσματος 21 Mbps. Επίσης, επιτυγχάνει μείωση στις καθυστερήσεις σε 100 ms από 180 - 200 ms που υπάρχουν στη τρίτη γενιά. Επιπλέον, μπορεί να αυξήσει την χωρητικότητα δεδομένων του κάθε σταθμού βάσης μέχρι και 5 φορές περισσότερο από πριν, εισάγοντας ένα νέο κανάλι μεταφοράς δεδομένων το High Speed Downlink Shared Channel (HSDSC). Το High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) είναι μια περαιτέρω εξέλιξη του HSDPA που αποσκοπεί την αύξηση στον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για ανέβασμα με ταχύτητες μέχρι και 5.76 Mbps, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα πιο συμμετρικό κανάλι με μειωμένες καθυστερήσεις που θα είναι πιο αποδοτικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Το HSUPA αποτελεί ένα κομμάτι του 3GPP Release 6. Χρησιμοποιώντας συστήματα διαμόρφωσης κατώτερης τάξης μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας στην συσκευή του χρήστη [26].

Για την τεχνολογία WCDMA υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι handover [49]:

- **Hard handover:** Αυτή η μορφή handover μπορεί να είναι ομοιογενής ή μη ομοιογενής. Ομοιογενής hard handover σημαίνει ότι η εναλλαγή δεν γίνεται αντιληπτή από το χρήστη. Στην πράξη, ένα handover που απαιτεί την αλλαγή της συχνότητας του φέροντος εκτελείται πάντα ως hard handover.
- **Soft handover:** Αυτός ο τύπος handover εκτελείται λόγω της μάρκο-ποικιλομορφίας, δηλαδή ότι αρκετές ραδιοζεύξεις είναι ενεργές την ίδια στιγμή. Κανονικά το soft handover μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν αλλάξουν οι κυψέλες που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα.
- **Softer handover:** Πρόκειται για μια ειδική περίπτωση του soft handover, όπου οι ασύρματες συνδέσεις που προστίθενται και αφαιρούνται ανήκουν στον ίδιο σταθμό βάσης.

Οι συχνότητες λειτουργίας της 3G τεχνολογίας χωρίζονται σε 26 μπάντες όπως φαίνεται στον Πίνακα 12, με την Ευρώπη να χρησιμοποιεί τις GSM 900 (E-GSM) – Band 8 και IMT 2100 – Band 1 και την Αμερική τις CLR 850 – Band 5 και PCS 1900 – Band 2 [13].

Operating Band	UL Frequencies UE transmit, Node B receive	DL frequencies UE receive, Node B transmit
I	1920 - 1980 MHz	2110 -2170 MHz
II	1850 -1910 MHz	1930 -1990 MHz
III	1710-1785 MHz	1805-1880 MHz
IV	1710-1755 MHz	2110-2155 MHz
V	824 - 849MHz	869-894MHz
VI	830-840 MHz	875-885 MHz
VII	2500 - 2570 MHz	2620 - 2690 MHz
VIII	880 - 915 MHz	925 - 960 MHz
IX	1749.9 - 1784.9 MHz	1844.9 - 1879.9 MHz
X	1710-1770 MHz	2110-2170 MHz
XI	1427.9 - 1447.9 MHz	1475.9 - 1495.9 MHz
XII	699 - 716 MHz	729 - 746 MHz
XIII	777 - 787 MHz	746 - 756 MHz
XIV	788 - 798 MHz	758 - 768 MHz
XV	Reserved	Reserved
XVI	Reserved	Reserved
XVII	Reserved	Reserved
XVIII	Reserved	Reserved
XIX	830 – 845 MHz	875 -890 MHz
XX	832 - 862 MHz	791 - 821 MHz
XXI	1447.9 - 1462.9 MHz	1495.9 - 1510.9 MHz
XXII	3410 – 3490 MHz	3510 – 3590 MHz
XXV	1850 -1915 MHz	1930 -1995 MHz
XXVI	814-849 MHz	859-894 MHz

Πίνακας 12. Συχνότητες λειτουργίας της τεχνολογίας 3G

Η τυπική ισχύς εκπομπής για τους σταθμούς βάσης ορίζεται αναλόγως του περιβάλλοντος, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 13 [13] και για τις κινητές συσκευές κυμαίνεται από τα 0.25 W έως τα 8 W, όπως είδαμε στον Πίνακα 11 και η ευαισθησία του δέκτη ορίζεται μέχρι τα -117 dBm [50].

BS class	PRAT
Wide Area BS	- (note)
Medium Range BS	$\leq +38$ dBm
Local Area BS	$\leq +24$ dBm
Home BS	$\leq +20$ dBm (without transmit diversity or MIMO) $\leq +17$ dBm (with transmit diversity or dual branch MIMO) $< +14$ dBm (with four branch MIMO)
NOTE:	There is no upper limit required for the rated output power of the Wide Area Base Station like for the base station for General Purpose application in Release 99, 4, and 5.

Πίνακας 13. Ισχύς εκπομπής σταθμών βάσης τεχνολογίας 3G

3.2.3 Τέταρτη Γενιά (4G)

Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G) βασίζονται στην τεχνολογία LTE (Long Term Evolution), η οποία αυξάνει την χωρητικότητα του δικτύου και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και επιπλέον μειώνει τις καθυστερήσεις. Οι θεωρητικοί ρυθμοί μετάδοσης φτάνουν τα 100 Mbps, που είναι περίπου 10 φορές καλύτεροι από τα δίκτυα 3G και η μέγιστη καθυστέρηση υπολογίζεται στα 10 ms. Για να είναι δυνατή η επίτευξη πλήρους απόδοσης των δυνατοτήτων του LTE είναι αναγκαία η μετατροπή των σημερινών υβριδικών δικτύων (κυκλώματος/πακέτου) σε δίκτυα πλήρως βασισμένα σε IP (Internet Protocol). Δηλαδή, οι υποδομές 4G αποτελούνται από διάφορα δίκτυα που χρησιμοποιούν το IP ως κοινό πρωτόκολλο, ώστε οι χρήστες να μπορούν να επιλέγουν κάθε εφαρμογή και περιβάλλον. Η λύση αυτή επιτρέπει τη δημιουργία νέων υπηρεσιών με επαναχρησιμοποίηση του λογισμικού εφαρμογών, ενώ η ανεξαρτησία του IP, του επιτρέπει να δουλεύει πάνω σε οποιαδήποτε τεχνολογία πρόσβασης. Αυτό σημαίνει ότι τα ετερογενή ασύρματα δίκτυα θα συγχωνευτούν σε ένα μοναδικό δίκτυο, κάνοντας έτσι την πλειοψηφία των υπηρεσιών ανεξάρτητη από τις τεχνολογίες πρόσβασης [1].

Το LTE βασίζεται πάνω σε νέες τεχνικές αρχές. Ενσωματώνει OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) τα οποία δίνουν προτεραιότητα στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ των καναλιών, και συστήματα κεραιών MIMO [2].

Το 2008 η ITU-R (International Telecommunications Union - Radio Communications Sector) όρισε ένα σύνολο από απαιτήσεις για το πρότυπο 4G με το όνομα IMT-Advanced (International Mobile Telecommunication-Advanced), καθορίζοντας απαιτήσεις μέγιστης ταχύτητας στα 100 Mbps σε κινητό περιβάλλον και στο 1 Gbps σε ακίνητο περιβάλλον [25]. Έτσι, αφού το LTE υποστηρίζει χαμηλότερες ταχύτητες, δεν αποτελεί συμβατό δίκτυο τέταρτης γενιάς. Μετέπειτα, το 2010, η ITU-R αναγνώρισε ότι αυτή η τεχνολογία, καθώς και άλλες που είναι πέραν της τρίτης γενιάς, παρ' όλο που δεν πληρούν τις IMT-Advanced απαιτήσεις, θα μπορούσαν εντούτοις να θεωρηθούν 4G, υπό την προϋπόθεση ότι είναι πρόδρομοι για IMT-Advanced συμβατές εκδόσεις και ότι έχουν βελτιστοποιήσει σε ένα σημαντικό επίπεδο τις επιδόσεις και τις δυνατότητες των αρχικών συστημάτων τρίτης γενιάς. Το LTE-Advanced (LTE-A) είναι IMT-Advanced συμβατή έκδοση και έτσι μπορεί να θεωρηθεί και επίσημα τεχνολογία τέταρτης γενιάς [3].

Οι τύποι handover για την LTE τεχνολογία είναι οι εξής [30]:

- Intra-LTE Handover: Σε αυτή τη περίπτωση οι κυψέλες της πηγής και του δέκτη είναι μέρος του ίδιου LTE δικτύου.
- Inter-LTE Handover: Σε αυτή τη μορφή το handover συμβαίνει προς άλλους LTE σταθμούς βάσης.
- Inter-RAT: Ο συγκεκριμένος τύπος αναφέρεται σε handover που λαμβάνει χώρα μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών, για παράδειγμα μετάβαση από LTE σε WCDMA.

Οι συχνότητες λειτουργίας της 4G τεχνολογίας χωρίζονται σε 44 μπάντες όπως φαίνεται στον Πίνακα 14, με την Ευρώπη να χρησιμοποιεί τις DCS 1800 – Band 3, AWS 1700 – Band 4, IMT-E 2600 – Band 7, EUDD 800 – Band 20 και IMT-E 2600 – Band 38 [14].

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	F _{UL_low} – F _{UL_high}	F _{DL_low} – F _{DL_high}	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
6 ¹	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
15	Reserved	Reserved	FDD
16	Reserved	Reserved	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz	FDD
20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz – 1462.9 MHz	1495.9 MHz – 1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz – 3490 MHz	3510 MHz – 3590 MHz	FDD
23	2000 MHz – 2020 MHz	2180 MHz – 2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	FDD
25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	FDD
27	807 MHz – 824 MHz	852 MHz – 869 MHz	FDD
28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
29	N/A	717 MHz – 728 MHz	FDD ²
...			
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
42	3400 MHz – 3600 MHz	3400 MHz – 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz – 3800 MHz	3600 MHz – 3800 MHz	TDD
44	703 MHz – 803 MHz	703 MHz – 803 MHz	TDD

Note 1: Band 6 is not applicable.
Note 2: Restricted to E-UTRA operation when carrier aggregation is configured. The downlink operating band is paired with the uplink operating band (external) of the carrier aggregation configuration that is supporting the configured Pcell.

Πίνακας 14. Συχνότητες λειτουργίας της τεχνολογίας 4G

Η τυπική ισχύς εκπομπής για τους σταθμούς βάσης ορίζεται αναλόγως του περιβάλλοντος, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 15 και για τις κινητές συσκευές κυμαίνεται από τα 0.25 W έως τα 8 W, όπως είδαμε στον Πίνακα 11 και η ευαισθησία του δέκτη ορίζεται μέχρι τα -117 dBm.

BS class	PRAT
Wide Area BS	- (note)
Medium Range BS	< + 38 dBm
Local Area BS	≤ + 24 dBm
Home BS	≤ + 20 dBm (for one transmit antenna port) ≤ + 17 dBm (for two transmit antenna ports) ≤ + 14dBm (for four transmit antenna ports) < + 11dBm (for eight transmit antenna ports)
NOTE: There is no upper limit for the rated output power of the Wide Area Base Station.	

Πίνακας 15. Ισχύς εκπομπής σταθμών βάσης τεχνολογίας 4G

3.3 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας αποτελούν το επίπεδο μεταφοράς που είναι κάτω από το επίπεδο εφαρμογών σύμφωνα με το μοντέλο OSI. Ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία των εφαρμογών του χρήστη με τις εφαρμογές που τρέχουν σε άλλη μηχανή. Δηλαδή, παίρνει τα δεδομένα από μία εφαρμογή και είναι υπεύθυνο για την ορθή αποστολή τους σε άλλη εφαρμογή μέσω του δικτύου και το αντίστροφο [45].

3.3.1 UDP

Το User Datagram Protocol (UDP) είναι ένα πολύ απλό πρωτόκολλο. Δεν πραγματοποιεί καμία σύνδεση γιατί όλα τα UDP πακέτα αποστέλλονται ξεχωριστά αντί να αποτελούν μια συνεχόμενη ροή. Δεν παρέχει καμία εγγύηση ότι τα πακέτα θα παραληφθούν με την σειρά που έχουν αποσταλεί ή ακόμα και για το ότι έχουν παραληφθεί. Εκτελεί μόνο πολυπλεξία (multiplexing) και αποπολυπλεξία (demultiplexing). Μπορεί να προσφέρει έλεγχο μέσω του checksum, αν το πακέτο που έχει παραληφθεί έφθασε ολόκληρο. Δημιουργεί ελάχιστες καθυστερήσεις αφού δεν υλοποιεί κάποια σύνδεση. Αυτό είναι που κάνει το πρωτόκολλο UDP ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν ελάχιστη καθυστέρηση

και είναι πάρα πολύ ανεχτικές σε λάθη και χάσιμο πακέτων. Μερικές τέτοιες εφαρμογές είναι οι VoIP, DNS, SNMP, RIP και DHCP [45].

3.3.2 TCP

Το Transmission Control Protocol (TCP) είναι ένα εξαιρετικά αξιόπιστο πρωτόκολλο. Δημιουργεί σύνδεση ανάμεσα στον αποστολέα και στον παραλήπτη και μετά αποστέλλει τα πακέτα. Εξασφαλίζει ότι όλα τα πακέτα θα παραληφθούν, λόγω του ότι αν κάποιο πακέτο χαθεί ή καθυστερήσει να παραληφθεί τότε είναι υπεύθυνο για να το ξαναστείλει και ότι τα πακέτα θα παραληφθούν με την σωστή σειρά με την οποία αποστάλθηκαν. Επίσης, αν κάποιο πακέτο παραληφθεί πολλαπλές φορές τότε τα αναγνωρίζει και τα απορρίπτει. Για να μπορεί να δημιουργηθεί η σύνδεση και όλοι αυτοί οι έλεγχοι είναι απαραίτητο να αποστέλλονται επιπλέον πακέτα και έτσι δημιουργούνται πολύ μεγάλες καθυστερήσεις. Έτσι, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που είναι ανεκτικές στις καθυστερήσεις και δεν είναι καθόλου ανεχτικές σε λάθη και σε απώλεια πακέτων. Μερικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν TCP είναι οι FTP, SMTP, HTTP και Telnet [45].

3.3.3 RTP - RTCP

Το Real Time Protocol (RTP) χρησιμοποιείται για αποστολή και λήψη βίντεο και ήχου από εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Αυτό το πρωτόκολλο δημιουργήθηκε για εφαρμογές πραγματικού χρόνου γιατί το πρωτόκολλο UDP δεν εξασφαλίζει ότι τα πακέτα θα παραληφθούν με την ίδια σειρά που αποστάλθηκαν και το πρωτόκολλο TCP έχει μεγάλες καθυστερήσεις. Οι εφαρμογές τρέχουν τυπικά το RTP πάνω από το UDP ή το TCP, έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται οι υπηρεσίες πολυπλεξίας και checksum από το UDP. Επιπλέον, από το TCP μπορεί να παρέχει χρονοσφραγίδες (timestamps), μηχανισμούς ελέγχου και μηχανισμούς ανίχνευσης των χαμένων πακέτων προκειμένου να αναμεταδοθούν. Αυτό είναι εφικτό, γιατί οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου παρέχουν κάποια ανεκτικότητα σε απώλεια πακέτων, αφού χρησιμοποιούν τεχνικές ανεκτικότητας στα λάθη. Επίσης, το RTP υποστηρίζει την μεταφορά δεδομένων σε πολλαπλούς προορισμούς, χρησιμοποιώντας multicast διανομή, αν υποστηρίζεται από το διαθέσιμο δίκτυο.

Για να μπορεί να υπάρξει βελτίωση των υπηρεσιών σε multicast διανομές χρησιμοποιεί το Real Time Control Protocol (RTCP). Η κύρια λειτουργία του είναι να παρέχει τον έλεγχο της ποιότητας της υπηρεσίας (QoS). Επίσης, προσφέρει έλεγχο συμφόρησης,

αναγνώριση αποστολής, συγχρονισμό ανάμεσα στα μέσα και έλεγχο του αριθμού συμμετεχόντων. Οι παραλήπτες και ο αποστολέας σε τακτά χρονικά διαστήματα αποστέλλουν στατιστικά στοιχεία, όπως τον αριθμό των πακέτων που χάθηκαν, τον αριθμό πακέτων που στάλθηκαν, το jitter και το Round Trip Delay Time (RTT). Τα RTP πακέτα συνήθως στέλνονται σε μία πόρτα με ζυγό αριθμό (π.χ. 1234) και τα RTCP στέλνονται στην επόμενη πόρτα με μονό αριθμό (π.χ. 1235) [8].

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογές Ανοικτού Κώδικα

Εφαρμογές ανοικτού κώδικα ονομάζουμε τις εφαρμογές όπου ο πηγαίος κώδικας είναι ελεύθερα διαθέσιμος για να μπορεί να τροποποιηθεί ή και να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές. Αυτές οι εφαρμογές παρουσιάζουν μεγάλα πλεονεκτήματα έναντι των εφαρμογών κλειστού κώδικα. Επειδή πολλοί εθελοντές προγραμματιστές μπορούν εύκολα να έχουν πρόσβαση στον κώδικα, μπορούν να εντοπίσουν και να διορθώσουν τυχών λάθη. Επιπλέον το κόστος ανάπτυξης και συντήρησης των εφαρμογών είναι μικρότερο γιατί μπορεί να γίνει από οποιονδήποτε χωρίς αμοιβή.

4.1 Εφαρμογές Συμπίεσης Βίντεο

Τα αρχεία βίντεο συνήθως έχουν πολύ μεγάλα ποσά πληροφορίας και γι' αυτό το λόγο η ανάγκη συμπίεσης είναι επιτακτική. Η συμπίεση αποτελεί μέρος της κωδικοποίησης και είναι ο μηχανισμός λειτουργίας των προτύπων βίντεο.

4.1.1 FFmpeg

Το FFmpeg είναι ένα framework το οποίο μπορεί να κωδικοποιεί, να αποκωδικοποιεί, να κάνει πολυπλεξία, αποπολυπλεξία, streaming και φιλτράρισμα. Περιέχει τις βιβλιοθήκες libavcodec, libavutil, libavformat, libavfilter, libavdevice, libswscale and libswresample, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις διάφορες εφαρμογές. Επίσης, περιέχει τα εργαλεία FFmpeg, FFserver, FFplay και FFprobe, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους χρήστες για streaming, αναπαραγωγή, κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση. Το FFmpeg είναι ένα εργαλείο που τρέχει από την γραμμή εντολών για κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση αρχείων πολυμέσων σε διάφορες μορφές. Ο FFserver είναι ένας εξυπηρετητής πολυμέσων για ζωντανές αναμεταδώσεις σε πολλαπλούς παραλήπτες. Το FFplay είναι ένα απλός αναπαραγωγέας βασισμένος στο SDL και στις FFmpeg βιβλιοθήκες. Το FFprobe είναι ένα εργαλείο που επιστρέφει στατιστικά στοιχεία για ένα βίντεο. Η βιβλιοθήκη libavcodec περιέχει κωδικοποιήσεις ήχου και βίντεο. Η βιβλιοθήκη

libavformat περιέχει πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες για container formats εικόνας και ήχου [15].

4.1.2 x264

Η βιβλιοθήκη x264 είναι μια βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα για κωδικοποίηση βίντεο streams σε H.264/AVC. Υπάρχει σε command line interface και application programming interface (API). Ο FFmpeg χρησιμοποιεί το command line interface της βιβλιοθήκης. Θεωρείται η καλύτερη βιβλιοθήκη για κωδικοποίηση σε H.264/AVC, αφού παρέχει πάρα πολύ καλή απόδοση, συμπίεση και ποιότητα χρησιμοποιώντας βελτιστοποιήσεις. Υποστηρίζει χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται από διαφορετικές εφαρμογές όπως αναμετάδοση τηλεόρασης, εφαρμογές βίντεο Blue-ray μικρής καθυστέρησης και σε διαδικτυακές σελίδες, όπως το YouTube, το Facebook, το Vimeo και το Hulu [55].

4.1.3 x265

Η ανοικτού κώδικα βιβλιοθήκη x265 θεωρείται η καλύτερη για κωδικοποίηση βίντεο H.265/HEVC, μιας και παρέχει την υψηλότερη δυνατή ποιότητα έχοντας συγκεκριμένο ρυθμό δεδομένων και το χαμηλότερο ρυθμό δεδομένων έχοντας συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας εικόνας. Επιπλέον, παρέχει την υψηλότερη ταχύτητα κωδικοποίησης και την υψηλότερη ποιότητα εικόνας είτε για τοπική κωδικοποίηση, είτε για υψηλής ταχύτητας κωδικοποίηση σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, παρέχει κορυφαία χαρακτηριστικά HEVC codec, που υποστηρίζουν πλήρως το πρότυπο HEVC συμπεριλαμβανομένων και των επεκτάσεων του [56].

4.1.4 JM Reference Software

Το JM Software είναι το λογισμικό που χρησιμοποιείται ευρέως για την κωδικοποίηση βίντεο σύμφωνα με το πρότυπο H.264/AVC. Αποτελείται από μια πληθώρα εντολών, οι οποίες δίνονται μέσω του command line interface και ορίζουν όλες τις παραμέτρους για το εξαγόμενο συμπιεσμένο βίντεο [43].

4.1.5 HM Software

Το HM Software είναι το πλέον διαδεδομένο λογισμικό που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση βίντεο σύμφωνα με το πρότυπο H.265/HEVC. Μια μεγάλη γκάμα εντολών, οι οποίες ορίζονται μέσω του command line interface και διαμορφώνουν όλες τις παραμέτρους για το τελικό συμπιεσμένο βίντεο [7].

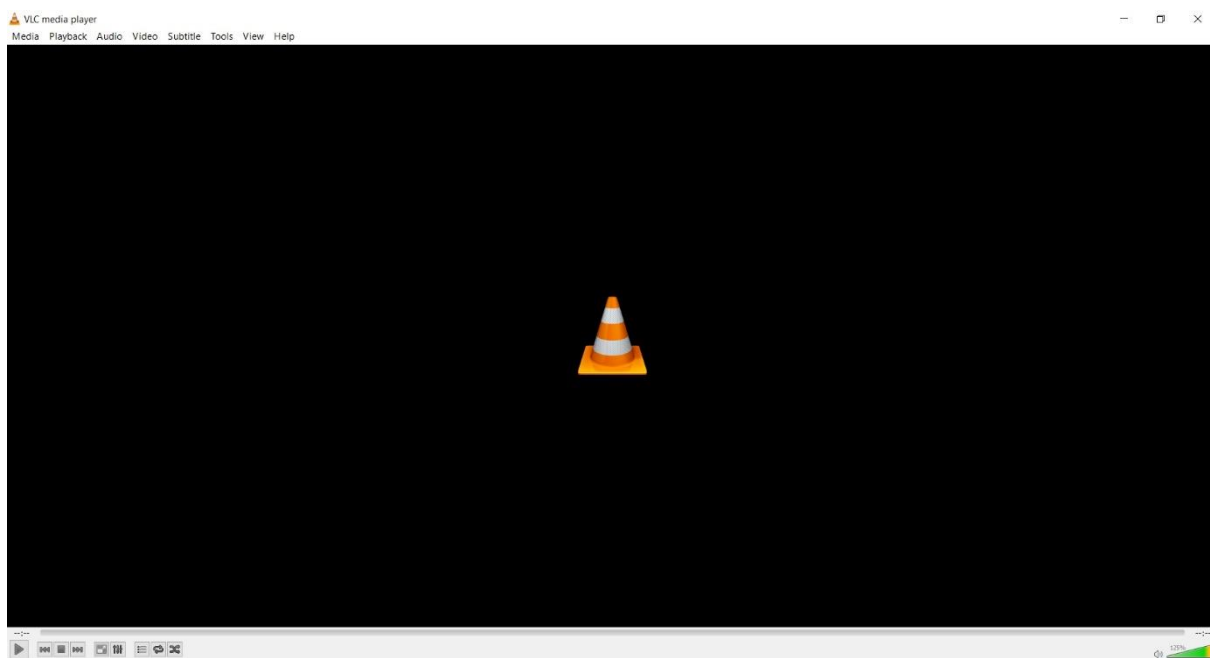
4.2 Εφαρμογές Αναπαραγωγής Βίντεο

Τα πρόγραμμα αναπαραγωγής βίντεο επιτρέπουν την αναπαραγωγή ουσιαστικά των πιο διαδεδομένων μορφών βίντεο και ήχου.

4.2.1 VLC

Το VLC media player είναι ένα πρόγραμμα λογισμικού ανοικτού κώδικα με απλό και εύκολο περιβάλλον χρήστη (Graphical User Interface - GUI), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναπαραγωγή πολυμέσων, κωδικοποίηση και streaming σε unicast και multicast. Υποστηρίζει πολλούς κωδικοποιητές ήχου, βίντεο, Blue-ray, DVD, CD και διάφορα πρωτόκολλα για streaming. Είναι διαθέσιμο για λειτουργικά συστήματα όπως Windows, Linux, Mac OS X, Unix, όπως επίσης είναι διαθέσιμο και για κινητές συσκευές με λειτουργικό Android και iOS.

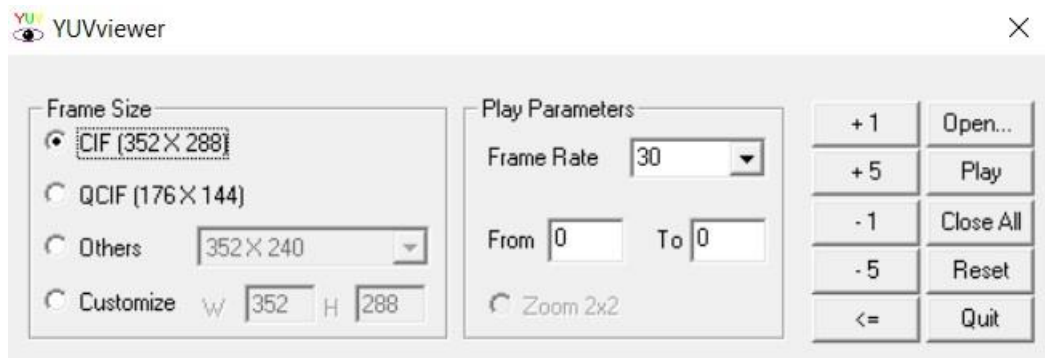
Η κανονική διανομή του VLC περιλαμβάνει ελεύθερες βιβλιοθήκες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης. Πολλοί κωδικοποιητές του προέρχονται από την βιβλιοθήκη του προγράμματος FFmpeg , αλλά κυρίως χρησιμοποιεί τους δικούς του πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες. Το VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μέσω γραφικού περιβάλλοντος, είτε μέσω της γραμμής εντολών [51].



Εικόνα 11. Περιβάλλον χρήστη του VLC media player

4.2.2 YUVviewer

Το πρόγραμμα YUVviewer, το GUI του οποίου απεικονίζεται στην Εικόνα 12, χρησιμοποιήθηκε για να αναπαράγει τα βίντεο τα οποία είναι σε ασυμπιεστη μορφή, δηλαδή τα .yuv αρχεία βίντεο. Ο όρος YUV αναφέρεται σε μια οικογένεια χρωματικών χώρων, οι οποίοι κωδικοποιούν την φωτεινότητα ανεξάρτητα από το χρώμα. Όπως και το RGB, το YUV χρησιμοποιεί τρεις τιμές για να αναπαραστήσει κάθε χρώμα, το Y, το U και το V. Η συνιστώσα Y αναπαριστά την φωτεινότητα του χρώματος και οι συνιστώσες U και V αναπαριστούν το χρώμα [57].



Εικόνα 12. Περιβάλλον χρήστη του YUVviewer

4.3 Εφαρμογές Προσομοίωσης

Η τεχνική της προσομοίωσης αφορά τη δημιουργία ενός εικονικού περιβάλλοντος πειραματισμού ή ενός μοντέλου εργασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε ο χρήστης να δουλέψει σε ένα ψηφιακό περιβάλλον με συνθήκες όσο πιο κοντά γίνεται με τις πραγματικές.

4.3.1 TruNet

Το TruNet είναι ένας τρισδιάστατος (3D) προσομοιωτής για σχεδιασμό ασύρματων δικτύων που αναπτύχθηκε από τη Sigint. Οι προσομοιώσεις του παρέχουν πληροφορίες για το μέγεθος και τη φάση του σήματος, όπως επίσης για τη γωνία άφιξης (Angle of Arrival - AoA), τη γωνία αναχώρησης (Angle of Departure - AoD), το SNR, το SNIR και το C/I. Η βασική λειτουργία του προσομοιωτή επεκτείνεται περαιτέρω μέσω της χρήσης μονάδων επικοινωνίας (communication modules) και υποδοχών (connectors). Μερικά παραδείγματα αυτών των επεκτάσεων περιλαμβάνουν τα MIMO modules, τα NS2/Matlab connectors για την υποστήριξη προσομοιώσεων υψηλότερων στρωμάτων, τα Wi-Fi/WiMAX modules, τις μονάδες εντοπισμού που επιτρέπουν τη δημιουργία

fingerprinting βάσεων δεδομένων και την αξιολόγηση της απόδοσής τους, τα Jammer modules, τα modules εξομοίωσης, τα modules Geolocation βάσεων δεδομένων, κ.τ.λ. Το κύριο περιβάλλον σχεδιασμού του TruNet περιλαμβάνει ένα διασθητικό σχεδιαστή CAD και κεραιών, που επιτρέπει στο χρήστη να σχεδιάσει και να ρυθμίσει γρήγορα το υπό διερεύνηση ασύρματο δίκτυο [48].

Κεφάλαιο 5

Μεθοδολογία

Οι εφαρμογές ανοικτού κώδικα που έχουν αναπτυχθεί στον τομέα της κωδικοποίησης, συμπίεσης και αποστολής βίντεο αποτελούν μεγάλη βοήθεια για το χρήστη, γιατί του προσφέρουν πολλές δυνατότητες και έτσι είναι εφικτό να γίνει έρευνα πάνω σε πραγματικά δεδομένα εξασφαλίζοντας έμπιστα και ασφαλή αποτελέσματα. Δεν είναι τυχαίο που όλο και περισσότερες εταιρείες αρχίζουν να εντάσσουν ή και να δουλεύουν αποκλειστικά με εφαρμογές ανοικτού κώδικα, είτε υλοποιώντας κάποια από την αρχή, είτε εξελίσσοντας κάποιες ήδη υφιστάμενες εφαρμογές. Από αυτή την εξέλιξη δε θα μπορούσε να απουσιάζει και η ακαδημαϊκή κοινότητα, η οποία με τη σειρά της χρησιμοποιεί όλο και περισσότερο τέτοιες εφαρμογές για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή διατριβή χρησιμοποιήθηκε μια σειρά από λογισμικά ανοικτού κώδικα αρχής γενομένης από λογισμικά κωδικοποίησης/συμπίεσης βίντεο. Οι συγκρίσεις που διεξήχθησαν αφορούν τα δύο πιο πρόσφατα πρότυπα κωδικοποίησης, και πιο συγκεκριμένα το H.264/AVC και το H.265/HEVC. Σκοπός η εντρύφηση στις δυνατότητες του κάθε προτύπου κάτω από διαφορετικές συνθήκες και σενάρια υλοποίησης με απώτερο σκοπό την αντικειμενική σύγκριση της αποδοτικότητάς τους.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη σύγκριση προτύπων (ως προς τις παραμέτρους κωδικοποίησης) ακολουθεί τις κατευθυντήριες γραμμές που εκδόθηκαν από την JCT-VC καθιστώντας τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής αντικειμενικά, αναπαράξιμα και επεκτάσιμα.

5.1 Σύγκριση Προτύπων H.264/AVC και H.265/HEVC

Τα δύο πρότυπα κωδικοποίησης μελετήθηκαν ως προς την ταχύτητα, την αποδοτικότητα της κωδικοποίησης που προσφέρουν και ως προς την προσαρμογή τους στην κωδικοποίηση σε πραγματικό χρόνο.

5.1.1 Ταχύτητα Κωδικοποίησης

Η πρώτη σύγκριση που διενεργήθηκε αφορούσε τη ταχύτητα κωδικοποίησης τόσο ενός πλαισίου (frame) όσο και του συνολικού χρόνου κωδικοποίησης ενός βίντεο, για κάθε ένα από τα λογισμικά H.264 και HEVC. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι εφαρμογές JM Reference Software (λογισμικό που υλοποιήθηκε και ανανεώνεται από την Joint Video Team, ομάδα ανάπτυξης του προτύπου H.264/AVC) και HM Software (λογισμικό που υλοποιήθηκε και ανανεώνεται από την Joint Collaborative Team on Video Coding, ομάδα ανάπτυξης του προτύπου H.265/HEVC). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν οι πιο δημοφιλείς και αποδοτικές εφαρμογές ανοικτού κώδικα των προτύπων H.264/AVC και HEVC, και πιο συγκεκριμένα τα λογισμικά x264 και x265, αντίστοιχα. Για την υλοποίηση αυτής της σύγκρισης χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά βίντεο τα οποία και κωδικοποιήθηκαν από τέσσερις φορές με τη κάθε εφαρμογή ορίζοντας κάθε φορά διαφορετικούς λόγους συμπίεσης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ξεκάθαρη υπεροχή, στο θέμα της ταχύτητας υλοποίησης της κωδικοποίησης, των εφαρμογών x264 και x265, κάτι που τα καθιστά ως την ενδεδειγμένη λύση για αποστολή βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη, οι εφαρμογές JM και HM αποσκοπούν κυρίως για την αξιολόγηση ερευνητικών μεθόδων και αλγορίθμων και για την κωδικοποίηση Video on Demand (VoD). Το πιο σημαντικό εύρημα αφορά στην χαμηλότερη ταχύτητα κωδικοποίησης που επιτυγχάνει το πρότυπο H.264/AVC σε σχέση με το HEVC. Σε κάθε περίπτωση, η εισαγωγή αλγορίθμων για την παράλληλη κωδικοποίηση περιοχών και εικόνων (frames) που εισάγεται για πρώτη φορά στο πρότυπο HEVC, μπορεί να εξισορροπήσει, αν όχι να υπερκεράσει, την ταχύτητα κωδικοποίησης του προτύπου H.264/AVC.

5.1.2 Αποδοτικότητα Συμπίεσης

Μια από τις πλέον εξέχουσες συγκρίσεις που διενεργήθηκαν στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η σύγκριση του προτύπου HEVC σε σχέση με το AVC και αν αυτό επιτυγχάνει τελικά το σκοπό για τον οποίο υλοποιήθηκε, που είναι να παρέχει την ίδια ποιότητα εικόνας υποδιπλασιάζοντας τις ανάγκες σε εύρος ζώνης (bit rate).

5.1.2.1. Σύγκριση Προτύπων H.264/AVC και H.265/HEVC Χρησιμοποιώντας τα Λογισμικά Αναφοράς JM και HM

Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων έγιναν πολλές και διαφορετικού τύπου κωδικοποιήσεις και για τα δυο πρότυπα στα ίδια βίντεο με διαφορετικές παραμέτρους κάθε φορά, ώστε να φανεί εάν ο HEVC είναι αποδοτικότερος σε κάθε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, στη πρώτη περίπτωση τα δύο πρότυπα κωδικοποιούσαν κάθε frame σαν να ήταν I frame, δηλαδή χωρίς να λαμβάνονται υπόψη ούτε τα προηγούμενα, ούτε τα επόμενα frames. Έπειτα, για την επόμενη σύγκριση ορίστηκε ότι μόνο το πρώτο frame θα κωδικοποιηθεί σαν I frame και τα επόμενα ως P frames. Στα P frames γίνεται κωδικοποίηση μόνο των αλλαγών που υπάρχουν σε σχέση με το προηγούμενο frame. Στην επόμενη περίπτωση πάλι το πρώτο frame ορίστηκε να κωδικοποιηθεί σαν I frame και τα ακόλουθα σαν B frames, δηλαδή να γίνεται κωδικοποίηση λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές και στο προηγούμενο, αλλά και στο επόμενο frame. Τέλος, η τέταρτη κωδικοποίηση που διεξήχθη χρησιμοποιεί και τους τρεις τύπους frame κρίνοντας αναλόγως με το frame που έχει να κωδικοποιήσει. Από τα αποτελέσματα αυτών των κωδικοποιήσεων μπορεί να οριστεί η αποδοτικότητα του αναδυόμενου προτύπου HEVC συγκρίνοντας το με το AVC συναρτήσει των αντικειμενικών μετρικών αξιολόγησης (objective video quality) και του απαιτούμενου εύρους ζώνης.

5.1.2.2. Σύγκριση Αποδοτικότητας Προτύπων Χρησιμοποιώντας Βάση Δεδομένων Βίντεο

Για τη σύγκριση της αποδοτικότητας των δύο προτύπων χρησιμοποιήθηκαν αρκετά βίντεο τα οποία και πληρούν διαφορετικά στοιχεία. Η βάση δεδομένων των βίντεο που μελετήθηκαν, επιλέχθηκε γιατί είναι αυτή που κατασκεύασε η ίδια η JCT-VC κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του προτύπου HEVC, για την αντικειμενική και εις βάθος αξιολόγηση/σύγκριση αλγορίθμων συμπίεσης και προτύπων κωδικοποίησης. Τα βίντεο που περιλαμβάνονται σε αυτή τη βάση δεδομένων έχουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά το ένα με το άλλο και γι' αυτό η ανάλυση τους μπορεί να δώσει σαφή αποτελέσματα. Η βάση δεδομένων αποτελείται από βίντεο με διαφορετικές διαστάσεις εικόνας (resolution), διαφορετικό ρυθμό εναλλαγής πλαισίων (frame rate) και διαφορετικό περιεχόμενο (content) και έχει ως σκοπό την κάλυψη κάθε πιθανού σεναρίου και εφαρμογής μετάδοσης βίντεο πάνω από ενσύρματα και ασύρματα κανάλια επικοινωνίας. Γενικότερα, θα λέγαμε ότι όλα είναι βίντεο διαφορετικής κλάσης μεταξύ τους. Στον Πίνακα 16 απεικονίζονται οι ονομασίες και τα χαρακτηριστικά του κάθε βίντεο.

Name	Resolution	Frame rate
RaceHorses	416x240	30
RaceHorses	832x480	30
SlideShow	1280x720	20
SlideEditing	1280x720	30
vidyo1	1280x720	60
vidyo3	1280x720	60
vidyo4	1280x720	60
Tennis	1920x1080	24
BasketballDrive	1920x1080	50
Traffic	2560x1600	30
SteamLocomotiveTrain	2560x1600	60

Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά των βίντεο της βάσης δεδομένων

5.1.3 Προσαρμοστική Κωδικοποίηση Βίντεο σε Πραγματικό Χρόνο

Ένα σημαντικό ζήτημα που μελετήθηκε στη μεταπτυχιακή διατριβή είναι η απόδοση του προτύπου HEVC όταν απαιτείται η άμεση αποστολή του συμπιεσμένου βίντεο μέσω ασύρματων τεχνολογιών. Σε τέτοιου είδους καταστάσεις, γνωστές ως live streaming, γίνεται δυναμική κωδικοποίηση του βίντεο με βάση το διαθέσιμο εύρος ζώνης, ώστε να μην υπάρχουν διακοπές κατά την αναπαραγωγή του βίντεο. Η ανάγκη για προσαρμοστική κωδικοποίηση βίντεο (adaptive encoding) πηγάζει λόγω του ευμετάβλητου διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η αντιμετώπιση του προαναφερθέντος προβλήματος μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε από το χρήστη, όπως ισχύει στο πρότυπο MPEG DASH [46], [47], όπου η (ανα)προσαρμογή γίνεται στο χρήστη, είτε -όπως τις περιπτώσεις που εξετάζουμε παρακάτω- η προσαρμογή του λόγου συμπίεσης γίνεται στη πηγή, χρησιμοποιώντας όμως γνώση από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του χρήστη. Σήμερα, είναι πολύ διαδεδομένο ένας χρήστης να παρακολουθεί βίντεο μέσω της κινητής συσκευής του και ταυτόχρονα να μετακινείται (π.χ. αυτοκίνητο, τρένο, λεωφορείο, κτλ.) και άρα να αλλάζει ο Σταθμός Βάσης (κεραία) με την οποία επικοινωνεί η συσκευή του και κατά συνέπεια αρκετά συχνά να αλλάζει και το δίκτυο το οποίο τον εξυπηρετεί. Για έναν χρήστη που μετακινείται, ιδιαίτερα σε μεγάλες αποστάσεις, θεωρείται δεδομένο ότι θα αλλάξει και δίκτυο και θα εξυπηρετηθεί από κάποιες από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες, όπως τα δίκτυα δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς. Σε αυτές τις

εναλλαγές πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα και η εκάστοτε εφαρμογή, παρέχοντας δυναμική κωδικοποίηση αναλόγως του εύρους ζώνης που μπορεί να προσφέρει η κάθε τεχνολογία μετάδοσης ψηφιακού βίντεο.

5.1.3.1 Σενάριο 1: Προσαρμοστική Μετάδοση Βίντεο Χρησιμοποιώντας Ασύρματες Τεχνολογίες Εσωτερικού Χώρου

Τα σενάρια live streaming που υλοποιήθηκαν αφορούν την επίτευξη δυναμικής κωδικοποίησης σε κλειστό χώρο με τη χρήση των τεχνολογιών 802.11b/g/n/ac. Μελετήθηκαν 4 βίντεο με διαφορετικές διαστάσεις εικόνας το κάθε ένα, δίνοντας τη δυνατότητα να αντιληφθούμε πόσο επηρεάζει το resolution στο bitrate σε ένα ψηφιακό βίντεο. Σε αυτά τα σενάρια το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταβάλλεται αναλόγως με το traffic που υπάρχει στο ασύρματο δίκτυο. Έτσι, αν υπάρχουν πολλοί χρήστες που συνδέονται στον ίδιο πομπό τότε μοιράζονται και το bandwidth του δικτύου, άρα το πρότυπο κωδικοποίησης προσαρμόζεται για να εξυπηρετήσει όλους τους χρήστες χαμηλώνοντας την ποιότητα της εικόνας. Ενώ, ισχύει και το αντίθετο, όπου με λίγους χρήστες το πρότυπο κωδικοποίησης πετυχαίνει βέλτιστη ποιότητα στην εικόνα.

5.1.3.2 Σενάριο 2: Προσαρμοστική Μετάδοση Βίντεο Χρησιμοποιώντας Ασύρματες Τεχνολογίες Εξωτερικού Χώρου

Τα επόμενα σενάρια σχετίζονται με τη μετάδοση βίντεο σε πραγματικό χρόνο σε εξωτερικούς χώρους με τη χρήση των κεραιών της κινητής τηλεφωνίας. Εδώ ο χρήστης κινείται από μια τοποθεσία σε μια άλλη αλλάζοντας κατά διαστήματα και το δίκτυο το οποίο τον εξυπηρετεί, μεταβαίνοντας σε 2G, 3G και 4G δίκτυα. Και πάλι μελετήθηκαν τα ίδια 4 βίντεο, όπως με τη τεχνολογία Wi-Fi. Και σε αυτή τη περίπτωση το πρότυπο κωδικοποίησης εκμεταλλεύεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης της κάθε τεχνολογίας για να προσφέρει όσο το δυνατόν ποιοτικότερη εικόνα στον τελικό χρήστη. Μελετώντας αυτά τα σενάρια θα μπορέσουμε να διαπιστώσουμε τη μέγιστη ποιότητα εικόνας που μπορεί να αποδώσει η κάθε τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας για το κάθε βίντεο και επίσης μπορεί να οριστεί το ελάχιστο bit rate που μπορεί να διαθέσει η κάθε τεχνολογία για να υπάρχει μια ικανοποιητική ποιότητα εικόνας σύμφωνα με τη κρίση του χρήστη.

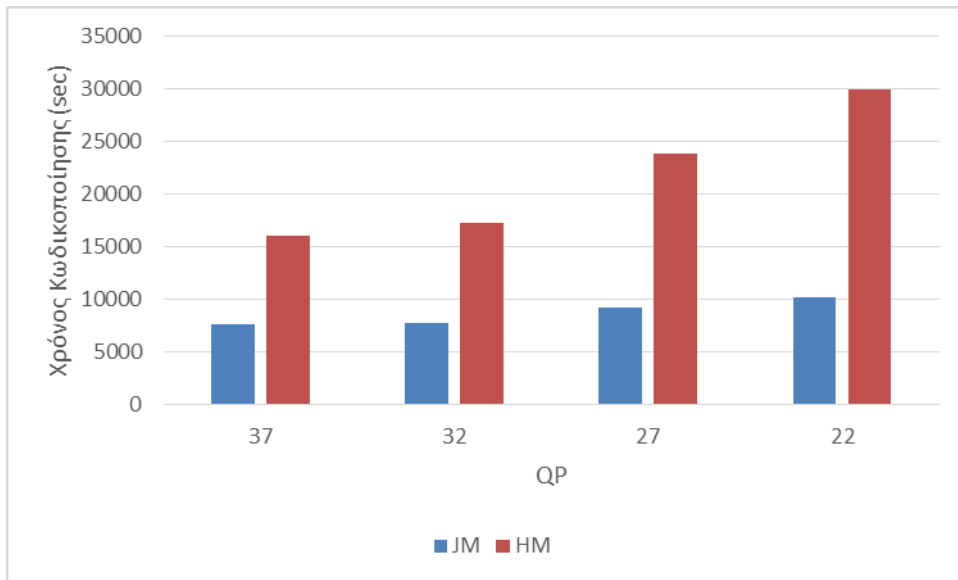
Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα

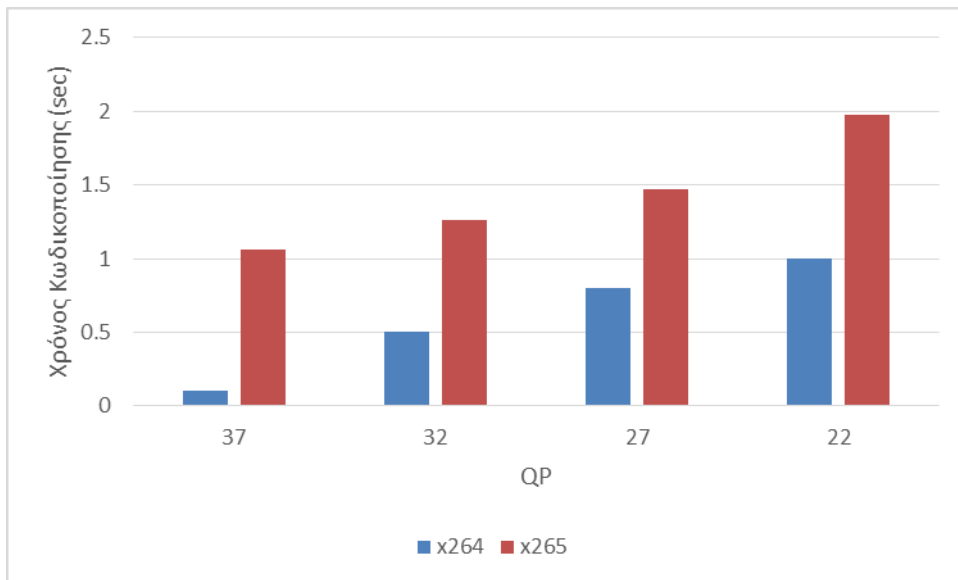
Η συνεισφορά της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής είναι εξόχως σημαντική, αφού βασίζεται σε λογισμικό ανοικτού κώδικα και μπορεί εύκολα να υιοθετηθεί από πληθώρα εφαρμογών κωδικοποίησης και αποστολής βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Η βιβλιογραφία είναι ελάχιστη σε σχέση με adaptive video coding techniques χρησιμοποιώντας το πρότυπο HEVC και η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε είναι τάχιστα, δουλεύει αποδοτικά, είναι διάφανη προς το χρήστη και είναι συμβατή τόσο για x264 και x265 κωδικοποιήσεις.

6.1 Αξιολόγηση Ταχύτητας Κωδικοποίησης

Ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης εφαρμογής κωδικοποίησης βίντεο, αποτελεί ο χρόνος που απαιτείται για την επιτυχή ολοκλήρωση της διαδικασίας. Η χρονική διάρκεια για την κωδικοποίηση ενός βίντεο παίζει σημαντικό ρόλο κυρίως όταν αυτό πρόκειται να μεταδοθεί σε πραγματικό χρόνο. Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το JM Software και το HM Software χρειάζονται αισθητά περισσότερο χρόνο για να ολοκληρώσουν την κωδικοποίηση σε σχέση με τα x264 και x265. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για το ίδιο βίντεο με τις ίδιες παραμέτρους και το ίδιο επίπεδο συμπίεσης (QP=32) στον HM Software χρειάζεται 16135.176 δευτερόλεπτα, που αντιστοιχεί σε περίπου 4.5 ώρες και για τον JM Software απαιτούνται 7770.933 δευτερόλεπτα, δηλαδή λίγο παραπάνω από 2 ώρες. Αντίστοιχα, ο x265 ολοκληρώνει τη συμπίεση σε μόλις 1.26 δευτερόλεπτα, ενώ ο x264 σε χρόνο μικρότερο του ενός δευτερολέπτου. Στο Διάγραμμα 1 απεικονίζεται ο χρόνος που απαιτείται για την κωδικοποίηση του ίδιου βίντεο από τα JM Software και HM Software για τέσσερις διαφορετικές τιμές επιπέδου συμπίεσης και στο Διάγραμμα 2 φαίνονται οι χρόνοι για τα x264 και x265 για τις ίδιες ακριβώς τιμές συμπίεσης.



Διάγραμμα 1. Απαιτούμενος χρόνος κωδικοποίησης για τα JM και HM Software



Διάγραμμα 2. Απαιτούμενος χρόνος κωδικοποίησης για τα x264 και x265

Ο λόγος που τα JM και x264 ολοκληρώνουν πιο γρήγορα την κωδικοποίηση από τα HM και x265, αντίστοιχα είναι ότι στο HEVC υλοποιούνται πιο σύνθετοι αλγόριθμοι κωδικοποίησης/συμπίεσης όπως η block based κωδικοποίηση περιοχών του βίντεο μέχρι 64x64 pixels σε σχέση με τα 16x16 pixels στο H.264, σε συνδυασμό με υπολογισμό σημαντικά περισσότερου αριθμού κατευθύνσεων πρόβλεψης κίνησης. Επίσης, χρησιμοποιεί υπολογιστικά σύνθετα φίλτρα κατά την κωδικοποίηση. Από την άλλη, το HEVC υλοποιεί για πρώτη φορά σε πρότυπο συμπίεσης αλγόριθμους παράλληλης συμπίεσης τόσο περιοχών εντός εικόνας όσο και παράλληλη κωδικοποίηση frames που εξισορροπεί την ταχύτητα κωδικοποίησης. Τα x264 και x265 είναι σημαντικά πιο

γρήγορα από τα JM και HM, αφού περιέχουν αλγορίθμους βελτιστοποίησης και δεν υλοποιούν όλες τις διαθέσιμες παραμέτρους αλλά μόνο της πιο σημαντικές/αποδοτικές. Κατά βάση τα JM και HM χρησιμοποιούνται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς.

6.2 Αξιολόγηση Αποδοτικότητας Συμπίεσης

Η σύγκριση των προτύπων H.264/AVC και H.265/HEVC από πλευράς encoding efficiency γίνεται σε συνάρτηση των αντικειμενικών μετρικών αξιολόγησης βίντεο και του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι αυξάνοντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης επιτυγχάνεται καλύτερης ποιότητας βίντεο. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την κωδικοποίηση κάποιου βίντεο γίνεται λιγότερη συμπίεση και άρα υπάρχει λιγότερη απώλεια πληροφορίας. Σε μετρικές όπως είναι και το PSNR, οι οποίες αποκαλούνται αντικειμενικές μετρικές αξιολόγησης ποιότητας βίντεο και βασίζονται στη σύγκριση του συμπιεσμένου βίντεο με το αρχικό, ασυμπιεστο βίντεο, αντιστοιχούν υψηλότερες τιμές (dB) όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης (bit rate). Αρχικά, τα προς σύγκριση πρότυπα «δοκιμάστηκαν» σε δύο διαφορετικά βίντεο με την ίδια διάσταση εικόνας 416x240, το ένα με την ονομασία Keiba, στο οποίο παρατηρείται μεγάλη κίνηση και το άλλο με την ονομασία Flower vase, όπου περιέχει λιγότερη κίνηση. Στις Εικόνες 13 και 14 αποτυπώνεται ένα frame από το κάθε βίντεο.

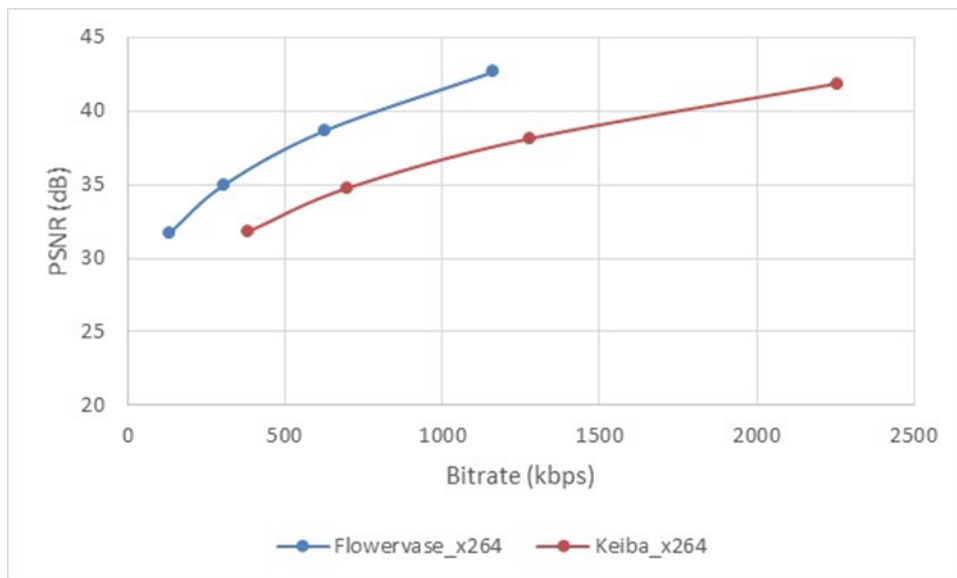


Εικόνα 13. Frame από το βίντεο Keiba



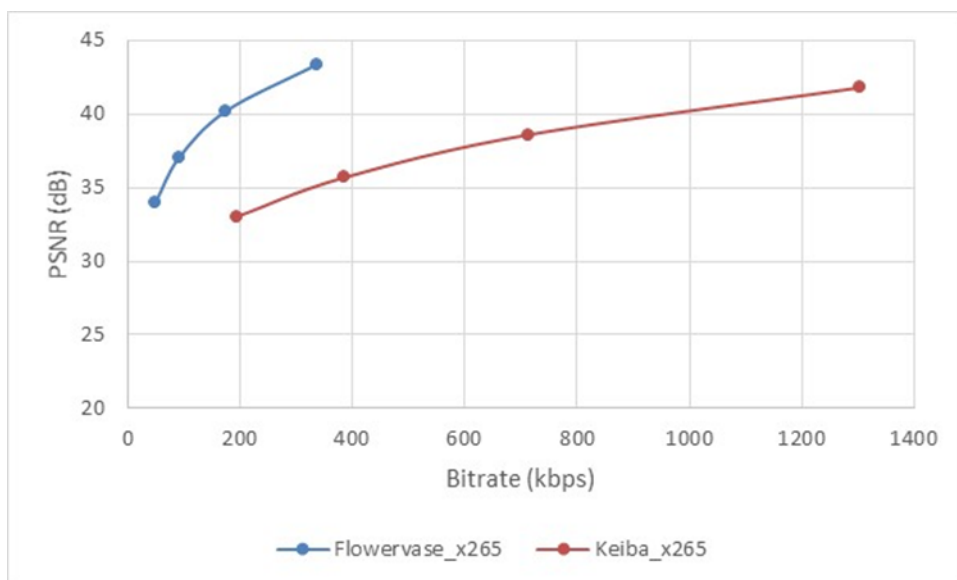
Εικόνα 14. Frame από το βίντεο Flower vase

Οι δυο γραφικές παραστάσεις του Διαγράμματος 3 ακολουθούν το ίδιο μοτίβο, όπως είναι αναμενόμενο. Υπάρχουν όμως σημαντικές διαφορές όσον αφορά το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τον ίδιο λόγο συμπίεσης. Αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά του εκάστοτε βίντεο και τον τρόπο λειτουργίας των πρότυπων συμπίεσης βίντεο. Τα πρότυπα συμπίεσης βίντεο βασίζονται στη λογική της κωδικοποίησης και αποστολής μόνο των διαφορών μεταξύ δυο διαδοχικών πλαισίων. Άρα όσο μεγαλύτερη η διαφορά μεταξύ δυο διαδοχικών πλαισίων τόσο μεγαλύτερη η πληροφορία που πρέπει να κωδικοποιηθεί και να αποσταλεί και κατά συνέπεια τόσο αυξάνει το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τον ίδιο λόγο συμπίεσης. Για τα δύο συγκεκριμένα βίντεο, που κωδικοποιήθηκαν με το x264, παρατηρούμε ότι για το βίντεο Keiba, όπου περιέχει μεγαλύτερη κίνηση, δηλαδή μεγαλύτερη εναλλαγή στο περιεχόμενο μεταξύ δυο διαδοχικών πλαισίων, το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο από το βίντεο Flower vase. Το τελευταίο είναι στατικό και με μικρή κίνηση βίντεο, με αποτέλεσμα το φόντο, άρα και η πληροφορία μεταξύ των διαδοχικών πλαισίων να μην αλλάζει ιδιαίτερα, οπότε δεν απαιτείται σημαντικό εύρος ζώνης για την κωδικοποίηση της πληροφορίας.



Διάγραμμα 3. PSNR vs Bitrate στο x264

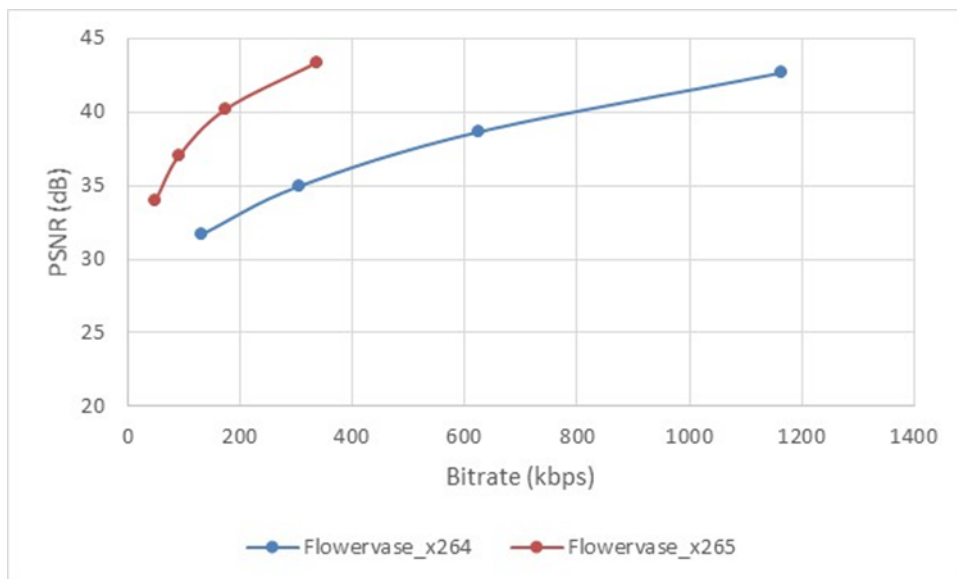
Αντιστοίχως, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4, στην κωδικοποίηση που υλοποιήθηκε με το x265 παρατηρούμε ότι για το βίντεο Keiba το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το βίντεο Flowervase. Το Flowervase λόγω του ότι είναι ένα ιδιαίτερα στατικό βίντεο δεν απαιτείται σημαντικό εύρος ζώνης για την κωδικοποίηση της πληροφορίας.



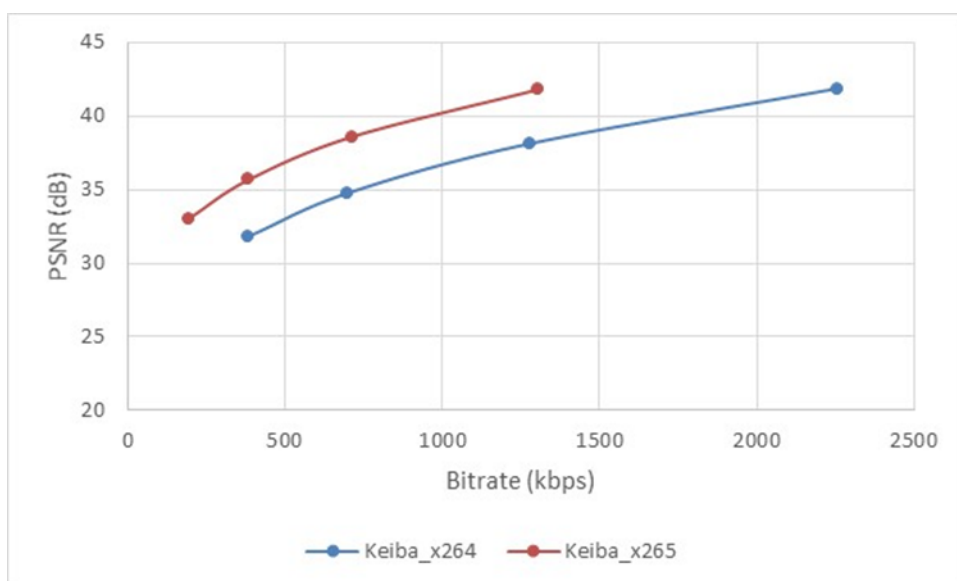
Διάγραμμα 4. PSNR vs Bitrate στο x265

Στα παρακάτω Διαγράμματα 5 και 6 συγκρίνονται οι απαιτήσεις σε bit rate που χρειάζονται τα δύο πρότυπα για την κωδικοποίηση των ίδιων βίντεο με τον ίδιο βαθμό συμπίεσης. Είναι πλέον φανερή η διαφορά στο bit rate που καταλαμβάνει ο x265 για να κωδικοποιήσει τα βίντεο σε σχέση με τον x264. Ακόμα πιο έντονη είναι η διαφορά τους

για το στατικό βίντεο Flowervase, όπου ο x265 απαιτεί ελάχιστο bit rate για όλες τις τιμές συμπίεσης που ορίστηκαν. Αυτές οι μετρήσεις αποδεικνύουν το πόσο πιο αποδοτική συμπίεση επιτυγχάνει το νέο πρότυπο κάτω από οποιαδήποτε συνθήκες.

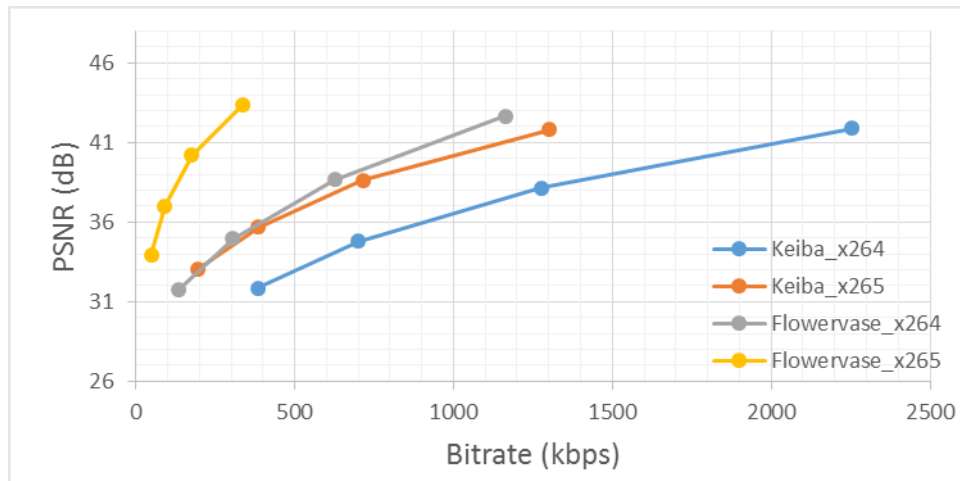


Διάγραμμα 5. Σύγκριση PSNR και bitrate μεταξύ x264 και x265 για το βίντεο Flowervase



Διάγραμμα 6. Σύγκριση PSNR και bitrate μεταξύ x264 και x265 για το βίντεο Keiba

Στο Διάγραμμα 7 απεικονίζονται συγκεντρωτικά όλες οι γραφικές παραστάσεις που αναλύθηκαν πιο πάνω σε ένα διάγραμμα για την ανάδειξη των διαφορών που υπάρχουν από βίντεο σε βίντεο, αλλά και στα πρότυπα κωδικοποίησης, όπου είναι και εμφανής η καλύτερη απόδοση του x265 μιας και μειώνει κατά πολύ το απαιτούμενο bit rate κατά την συμπίεση των βίντεο, διατηρώντας ανάλογη την ποιότητα της εικόνας.



Διάγραμμα 7. Συγκεντρωτική σύγκριση PSNR και bitrate μεταξύ x264 και x265 για τα βίντεο Flowervase και Keiba

Στον Πίνακα 17 εμφανίζεται και το επί τοις εκατό κερδισμένο ποσοστό συμπίεσης που επιτυγχάνει ο x265 σε σχέση με τον x264 για τα δύο βίντεο, που υπολογίστηκε σύμφωνα με τον διαδεδομένο αλγόριθμο του Bjøntegaard [6].

Name	Resolution	Frame rate	% Bit rate gain
Flowervase	416x240	30	-79.11252699
Keiba	416x240	30	-50.90688404

Πίνακας 17. Ποσοστό κέρδους μεταξύ x264 και x265 για τα βίντεο Flowervase και Keiba

Παρακάτω, έγιναν επιπλέον κωδικοποιήσεις με τα x264 και x265 για μια σειρά από βίντεο με διαφορετικό resolution και frame rate. Ο μέσος όρος αυτών των κωδικοποιήσεων υπολογίστηκε σύμφωνα με τον αλγόριθμο του Bjøntegaard [6] και έδειξε, όπως φαίνεται στον Πίνακα 18, ότι το x265 πετυχαίνει περίπου 56% μεγαλύτερη συμπίεση στο βίντεο σε σχέση με το x264.

Name	Resolution	Frame rate	% Bit rate gain
RaceHorses	416x240	30	-50.02231866
RaceHorses	832x480	30	-49.36332824
SlideShow	1280x720	20	-42.30272058
SlideEditing	1280x720	30	-23.37009602
vidyo1	1280x720	60	-76.22769256

vidyo3	1280x720	60	-79.57647379
vidyo4	1280x720	60	-76.52869109
Tennis	1920x1080	24	-68.70320182
BasketballDrive	1920x1080	50	-71.42533775
Traffic	2560x1600	30	-70.71821467
SteamLocomotiveTrain	2560x1600	60	-10.91380493
			Average
			-56.28653456

Πίνακας 18. Μέσος όρος κέρδους του x265 σε σχέση με το x264

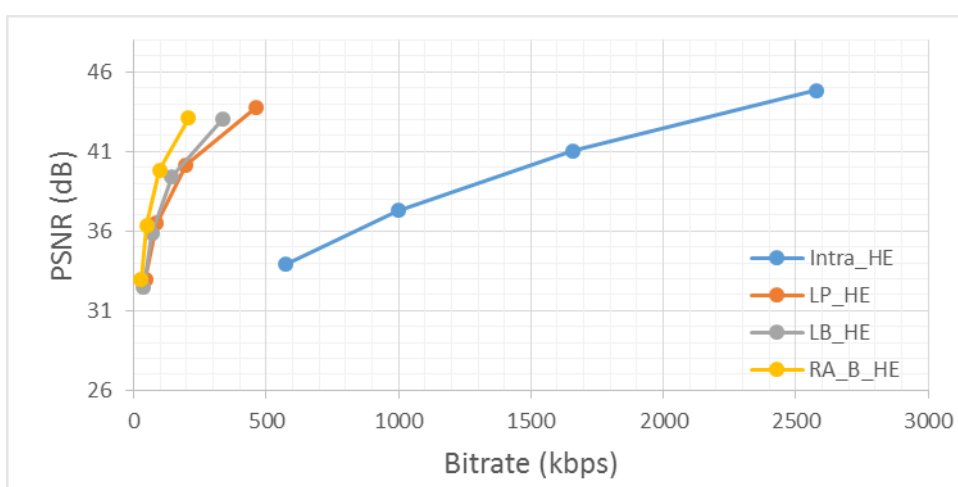
Συνεχίζοντας, με τη βοήθεια των JM Software και HM Software έγιναν μετρήσεις στα ίδια βίντεο χρησιμοποιώντας διαφορετική τεχνική κωδικοποίησης των ψηφιακών βίντεο. Συγκεκριμένα έγιναν μετρήσεις της απόδοσης των προτύπων δοκιμάζοντας τέσσερις διαφορετικές τεχνικές κωδικοποίησης, χρησιμοποιώντας δηλαδή στην πρώτη μόνο I frames, στη δεύτερη μόνο P frames, στη τρίτη μόνο B frames και τέλος μια κωδικοποίηση που περιλαμβάνει όλα τα frames. Στον Πίνακα 19 συνοψίζονται οι τεχνικές και οι ονομασίες που τους δόθηκαν, για τις δύο εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν.

Τεχνική Κωδικοποίησης	JM Software	HM Software
I Frames	Intra_HE	intra_main
P Frames	LP_HE	lowdelay_P_main
B Frames	LB_HE	lowdelay_main
I, P, B Frames	RA_B_HE	randomaccess_main

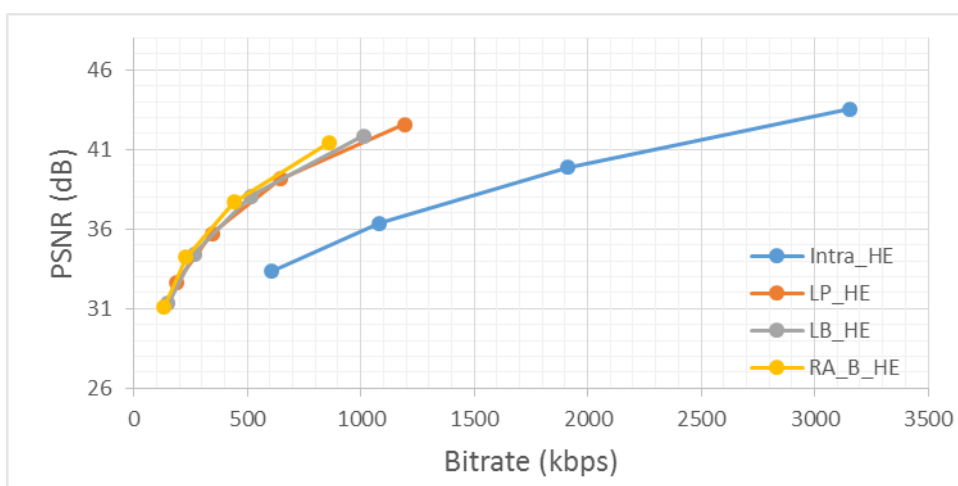
Πίνακας 19. Τεχνικές κωδικοποίησης ανά πρότυπο

Τα αποτελέσματα των κωδικοποιήσεων για το πρότυπο AVC έδειξαν ότι, η τεχνική Intra_HE έχει το μικρότερο χρόνο κωδικοποίησης (με μεγάλη διαφορά από τα υπόλοιπα) πετυχαίνει την καλύτερη ποιότητα εικόνας (το υψηλότερο PSNR), αλλά γίνεται μικρή συμπίεση στο βίντεο, οπότε έχει μεγάλη χωρητικότητα σε bits. Το LP_HE παρουσιάζει μικρό χρόνο συνολικής κωδικοποίησης (τον δεύτερο γρηγορότερο μετά το Intra_HE), έχει καλή ποιότητα εικόνας (τη δεύτερη καλύτερη μετά το Intra_HE) και έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη χωρητικότητα, αλλά χωρίς μεγάλη διαφορά από τις άλλες δύο μικρότερες. Το LB_HE παρουσιάζει το μεγαλύτερο συνολικό χρόνο κωδικοποίησης, το χαμηλότερο PSNR από τις δύο προηγούμενες μεθόδους και παρόμοιο με το RA_B_HE, όπως επίσης έχει

τη δεύτερη μικρότερη χωρητικότητα Bits μετά το RA_B_HE, το οποίο πετυχαίνει τη καλύτερη συμπίεση καταλαμβάνοντας τα λιγότερα bits με το συνολικό χρόνο να κυμαίνεται ανάμεσα από τα LP_HE και LB_HE. Ο λόγος του PSNR προς το bit rate για τα βίντεο Flower vase και Keiba απεικονίζεται στα Διαγράμματα 8 και 9. Η σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο βίντεο είναι κάτι που παρατηρήθηκε και παραπάνω, ότι δηλαδή λόγω της εντονότερης κίνησης που υπάρχει στο βίντεο Keiba απαιτείται μεγαλύτερο bit rate για την επίτευξη παρόμοιου PSNR με το βίντεο Flower vase.



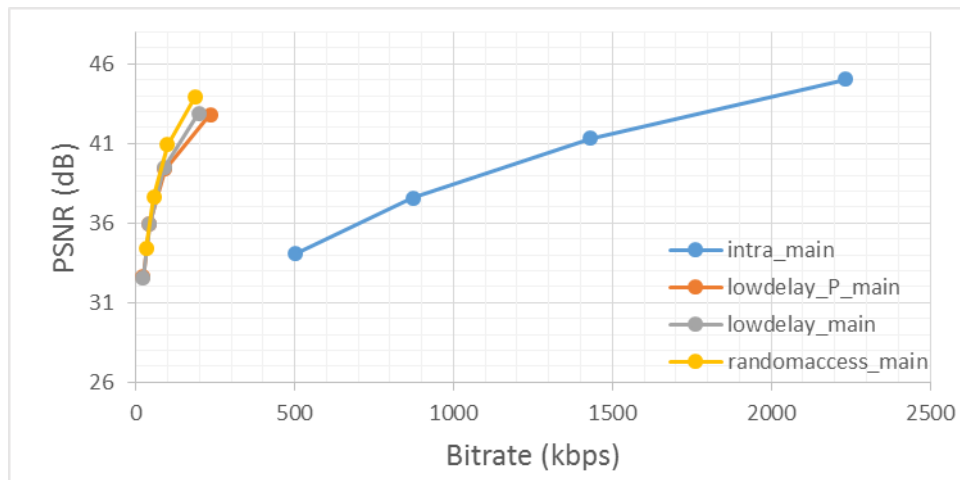
Διάγραμμα 8. PSNR vs Bitrate στο JM για το βίντεο Flower vase



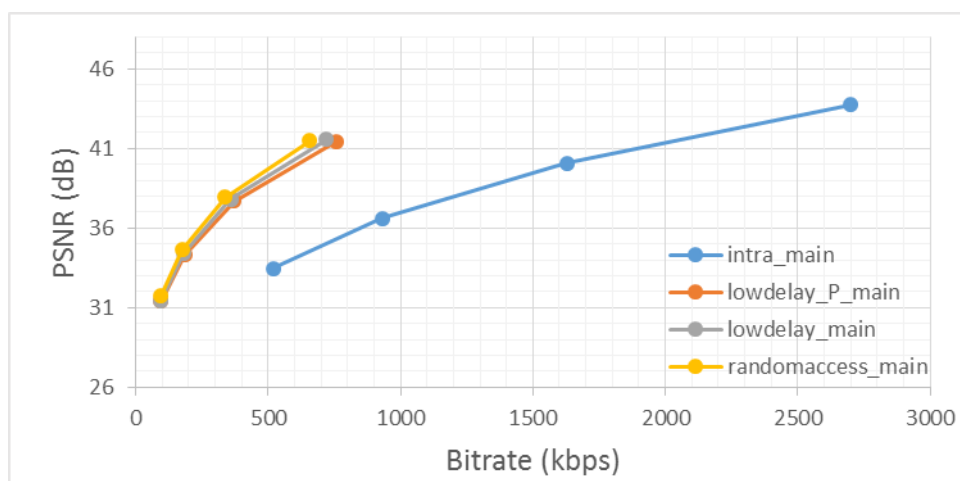
Διάγραμμα 9. PSNR vs Bitrate στο JM για το βίντεο Keiba

Αυτές οι τέσσερις τεχνικές αποδίδουν με παραπλήσιο τρόπο και για το πρότυπο HEVC με τη μεγάλη διαφορά να έγκειται στο ότι παρουσιάζεται εξαιρετικά μειωμένο το bit rate

διατηρώντας σταθερό το PSNR σε σχέση με το AVC, όπως φαίνεται και στα Διαγράμματα 10 και 11.

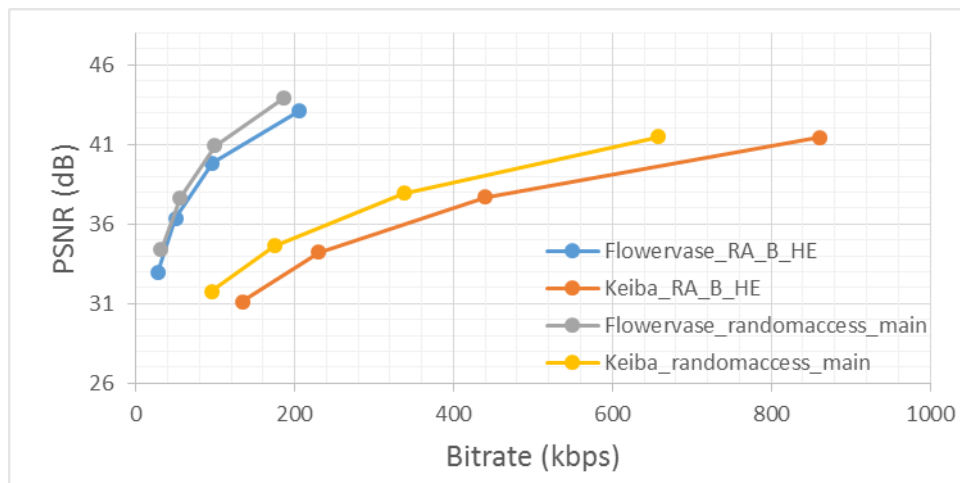


Διάγραμμα 10. PSNR vs Bitrate στο HM για το βίντεο Flowervase



Διάγραμμα 11. PSNR vs Bitrate στο HM για το βίντεο Keiba

Στο Διάγραμμα 12 φαίνονται οι διαφορές στο bit rate των AVC και HEVC και στα δύο βίντεο, αλλά κυρίως στο βίντεο Keiba, για την τεχνική όπου χρησιμοποιούνται και τα τρία είδη των frames.



Διάγραμμα 12. Σύγκριση PSNR και bitrate μεταξύ JM και HM των 2 βίντεο με την τεχνική που χρησιμοποιεί όλα τα frames

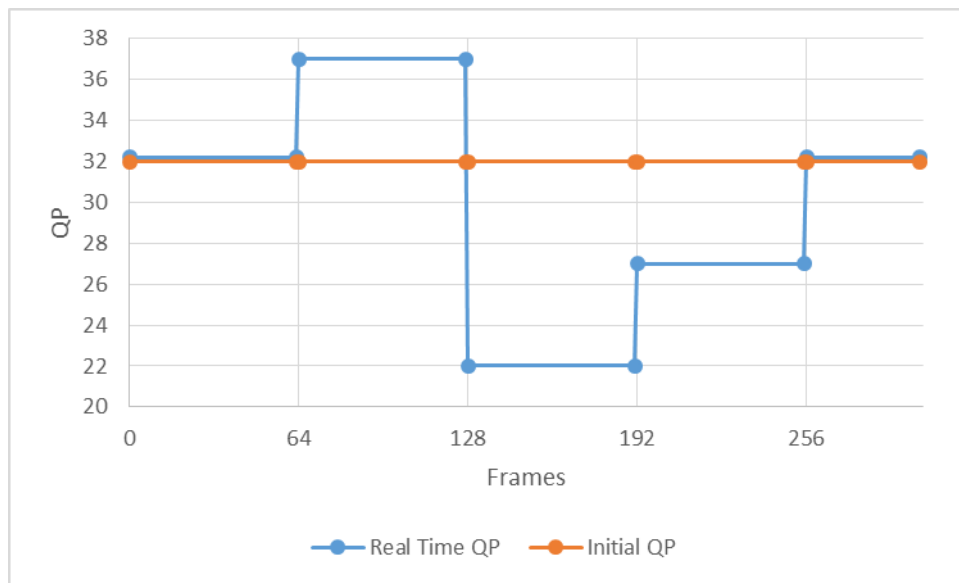
6.3 Αξιολόγηση Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης Βίντεο σε Πραγματικό Χρόνο

Η αποστολή βίντεο σε πραγματικό χρόνο εξαρτάται από την συνεργασία της εφαρμογής συμπίεσης ψηφιακού βίντεο, του προτύπου κωδικοποίησης του βίντεο και του ασύρματου δικτύου αποστολής των δεδομένων. Για την απόδοση του προτύπου HEVC σε live streaming εφαρμογές χρησιμοποιήθηκε το x265, μιας και όπως είδαμε παραπάνω προσφέρει ικανοποιητική συμπίεση σε μόλις μερικά δευτερόλεπτα. Για το σχηματισμό σφαιρικής άποψης έγινε κωδικοποίηση και αποστολή σε πραγματικό χρόνο, μέσω Wi-Fi και δικτύου κινητής τηλεφωνίας, τεσσάρων βίντεο με διαφορετικές διαστάσεις εικόνας και διαφορετικό ρυθμό εναλλαγής πλαισίων ανά δευτερόλεπτο (frames per second - fps). Τρία βίντεο έχουν διαστάσεις εικόνας 416x240, 832x480 και 1280x720 με 30 fps και ένα βίντεο έχει διαστάσεις 1920x1080 με 50 fps.

6.3.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1

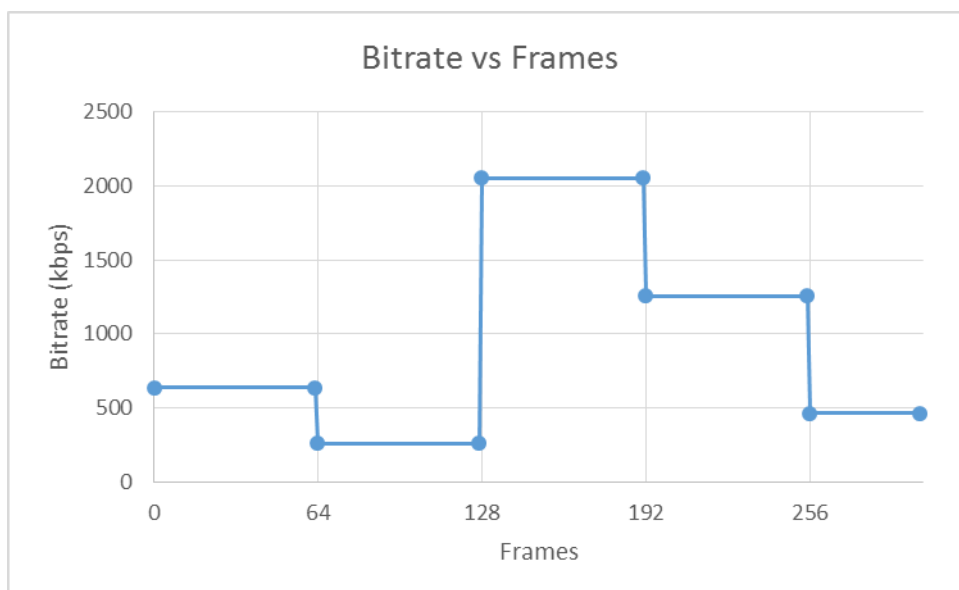
Για τη μελέτη του adaptation σε εσωτερικούς χώρους με τη χρήση του Wi-Fi, το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταβάλετε αναλόγως της πυκνότητας που επικρατεί στο δίκτυο. Για τον προσδιορισμό των εναλλαγών του bit rate μεταβάλαμε, κατά την κωδικοποίηση των βίντεο των 30 fps, κάθε 2 δευτερόλεπτα περίπου το ποσοστό συμπίεσης σε διάφορες τιμές ξεκινώντας από QP=32. Τα επόμενα δευτερόλεπτα παρατηρήθηκε αύξηση του αριθμού των χρηστών στο δίκτυο κι έτσι το ποσοστό συμπίεσης μεταβλήθηκε σε QP=37, ενώ στα αμέσως επόμενα 2 δευτερόλεπτα το δίκτυο είχε τον μικρότερο αριθμό χρηστών

με QP=22, έπειτα έχουμε μια μικρή αύξηση στο traffic με QP=27 καταλήγοντας στο αρχικό ποσοστό συμπίεσης, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 13.

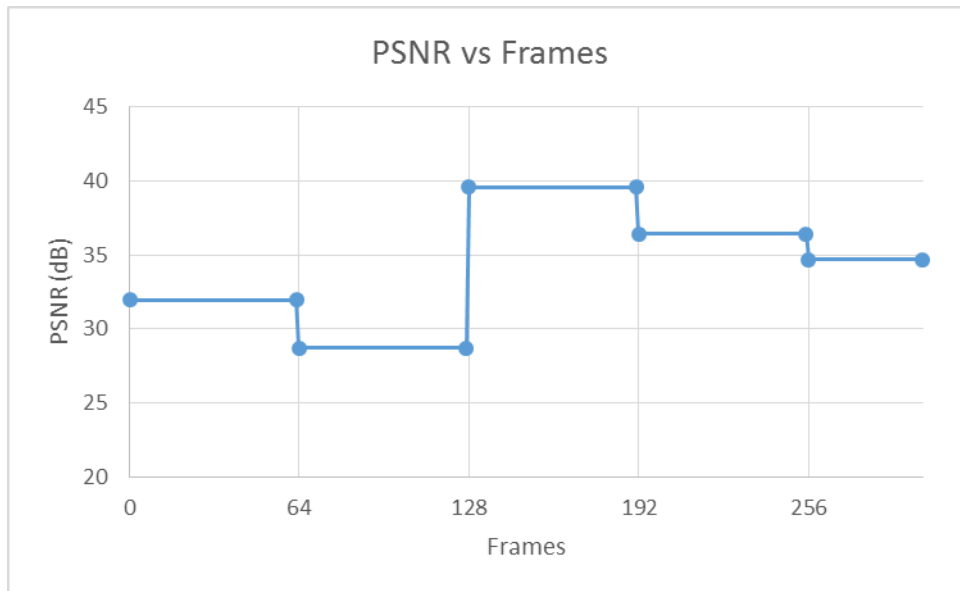


Διάγραμμα 13. Μεταβολή ποσοστού συμπίεσης κατά την κωδικοποίηση βίντεο των 30 fps με Wi-Fi σε πραγματικό χρόνο

Για το βίντεο με resolution 416x240 και 30 fps διαπιστώνουμε ότι τη μέγιστη ποιότητα εικόνας με PSNR 39.58 dB την επιτυγχάνουμε τη στιγμή που παρουσιάζεται η ελάχιστη πυκνότητα στο δίκτυο, έχοντας bit rate περίπου 2 Mbps, ενώ όταν το δίκτυο εξυπηρετεί πολλούς χρήστες η ποιότητα της εικόνας που μπορούμε να έχουμε έχει τιμή PSNR 28.7 dB με ένα bit rate της τάξεως των 260 Kbps, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 14 και 15.

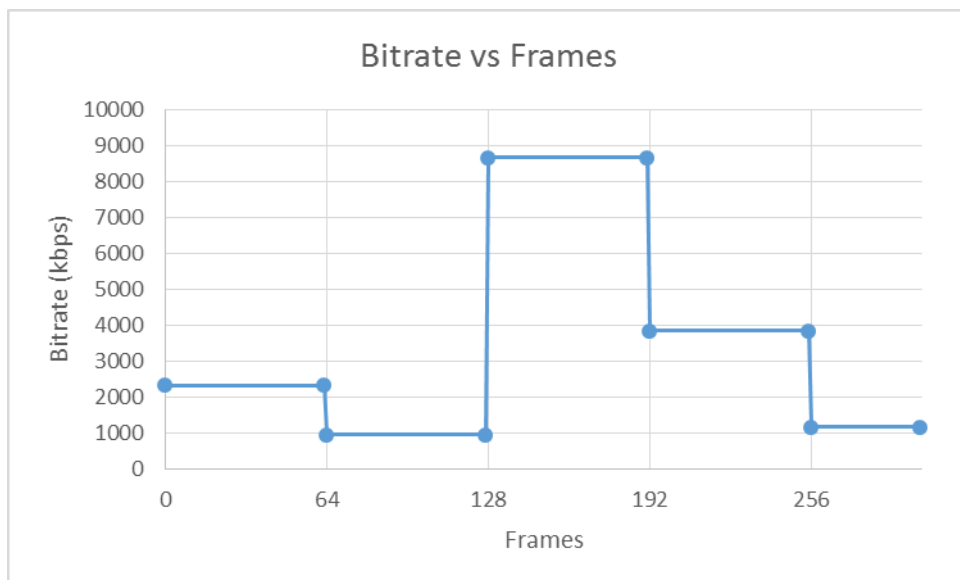


Διάγραμμα 14. Μεταβολή του bitrate για βίντεο 416x240 @30 fps

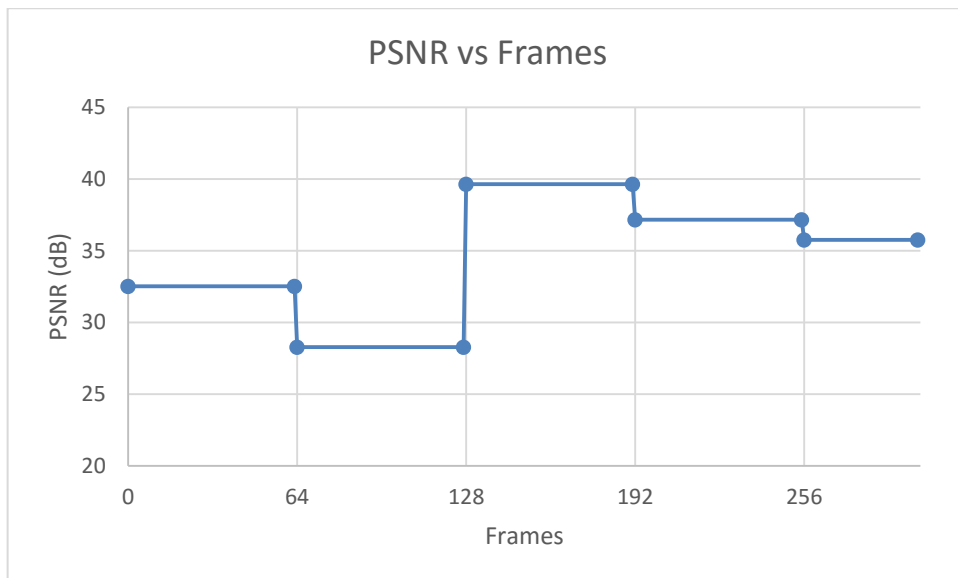


Διάγραμμα 15. Μεταβολή του PSNR για βίντεο 416x240 @30 fps

Στο standard definition βίντεο με resolution 832x480 και 30 fps η μέγιστη ποιότητα εικόνας επιτυγχάνει PSNR 39.63 dB όταν έχουμε μειωμένη πυκνότητα στο δίκτυο και το bit rate φτάνει περίπου τα 8.5 Mbps, ενώ όταν το δίκτυο είναι καταπονημένο η ποιότητα της εικόνας που μπορούμε να έχουμε έχει τιμή PSNR 28.29 dB με bit rate που αγγίζει τα 960 Kbps, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 16 και 17.

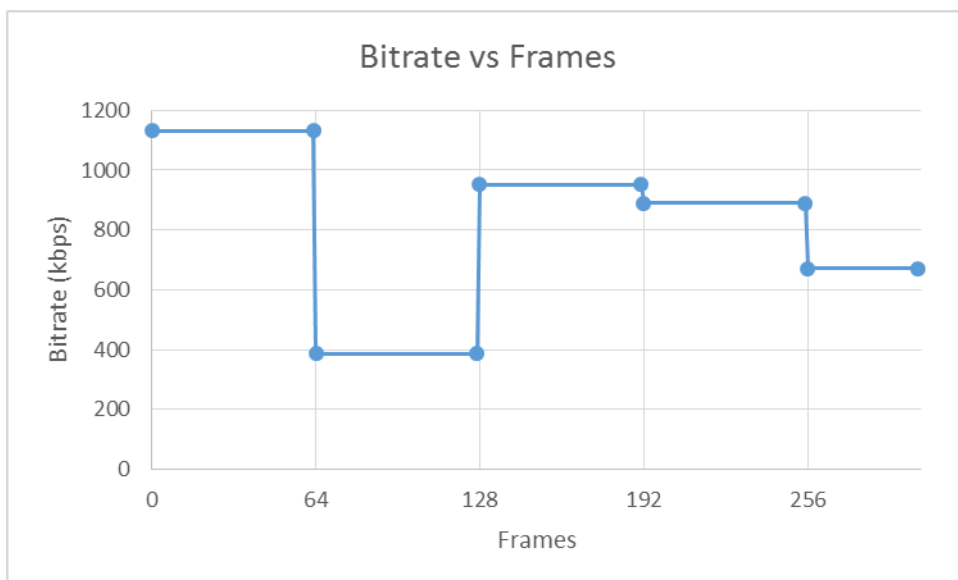


Διάγραμμα 16. Μεταβολή του bitrate για βίντεο 832x480 @30 fps

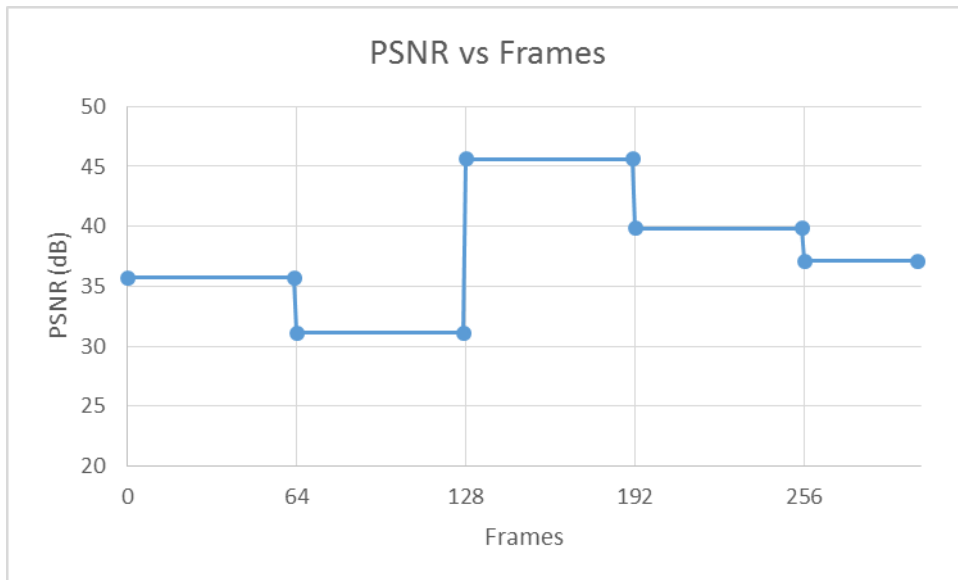


Διάγραμμα 17. Μεταβολή του PSNR για βίντεο 832x480 @30 fps

Για το high definition βίντεο με resolution 1280x720 και 30 fps παρατηρούμε ότι τη μέγιστη ποιότητα εικόνας με PSNR 45.63 dB την επιτυγχάνουμε τη στιγμή που παρουσιάζεται ελάχιστο traffic στο δίκτυο, έχοντας bit rate περίπου 1.15 Mbps, ενώ όταν το δίκτυο είναι φορτωμένο με χρήστες η ποιότητα της εικόνας που μπορούμε να έχουμε έχει τιμή PSNR 31.11 dB με bit rate στα 385 Kbps, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 18 και 19.

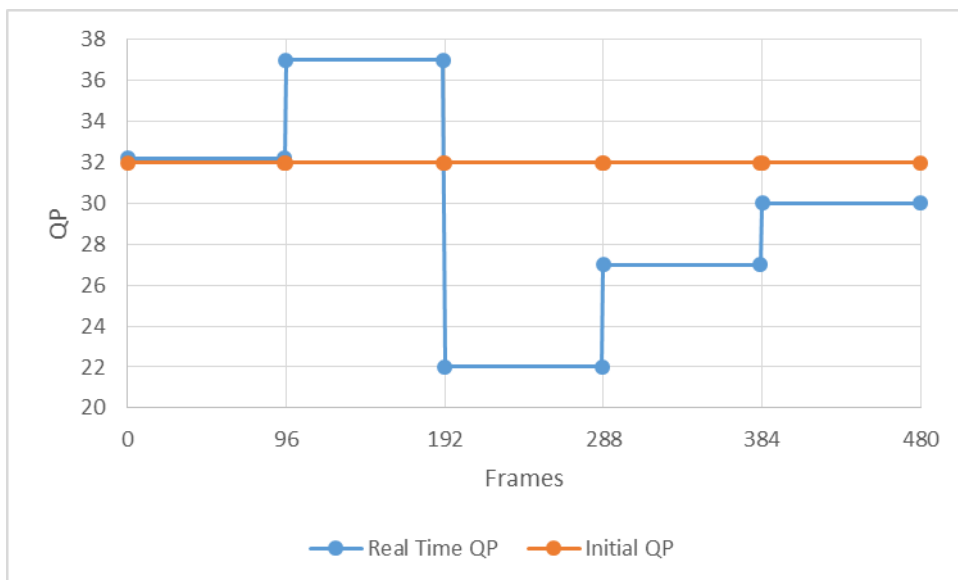


Διάγραμμα 18. Μεταβολή του bitrate για βίντεο 1280x720 @30 fps



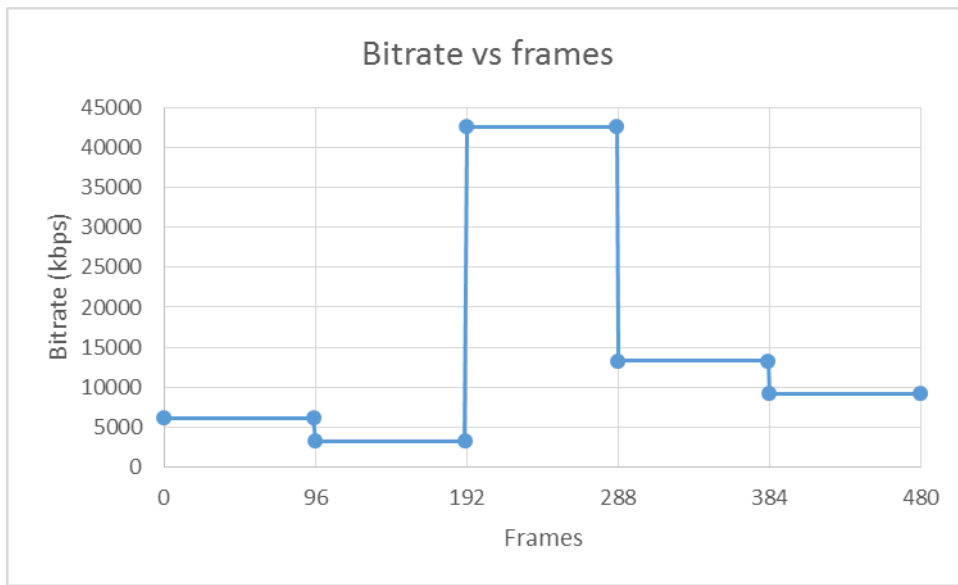
Διάγραμμα 19. Μεταβολή του PSNR για βίντεο 1280x720 @30 fps

Κατά την κωδικοποίηση του βίντεο των 50 fps, κάθε 2 δευτερόλεπτα περίπου το ποσοστό συμπίεσης σε διάφορες τιμές ξεκινώντας από QP=32. Τα επόμενα δευτερόλεπτα παρατηρήθηκε αύξηση του αριθμού των χρηστών στο δίκτυο κι έτσι το ποσοστό συμπίεσης μεταβλήθηκε σε QP=37, ενώ στα αμέσως επόμενα 2 δευτερόλεπτα το δίκτυο είχε τον μικρότερο αριθμό χρηστών με QP=22, έπειτα έχουμε μια μικρή αύξηση στο traffic με QP=27 καταλήγοντας σε ένα ποσοστό συμπίεσης κοντά στο αρχικό QP=30, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 20.

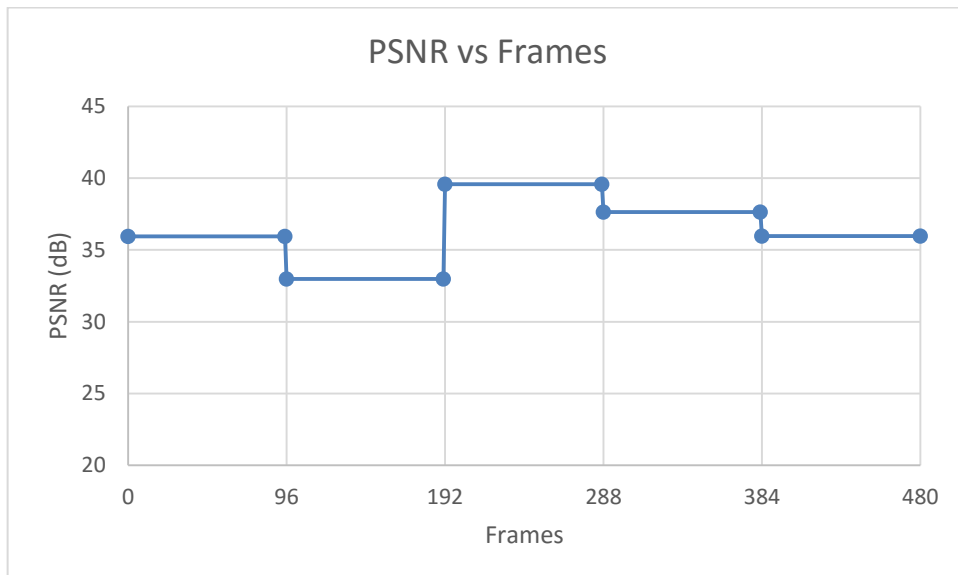


Διάγραμμα 20. Μεταβολή ποσοστού συμπίεσης κατά την κωδικοποίηση βίντεο των 50 fps με Wi-Fi σε πραγματικό χρόνο

Στο βίντεο full high definition με resolution 1920x1080 και 50 fps βλέπουμε ότι τη μέγιστη ποιότητα εικόνας με PSNR 39.58 dB την επιτυγχάνουμε τη στιγμή που παρουσιάζεται η ελάχιστη πυκνότητα στο δίκτυο, έχοντας bit rate περίπου 42.5 Mbps, ενώ όταν το δίκτυο παρουσιάζει μεγάλο traffic η ποιότητα της εικόνας που μπορούμε να έχουμε έχει τιμή PSNR 32.98 dB με ένα bit rate της τάξεως των 3.3 Mbps, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 21 και 22.



Διάγραμμα 21. Μεταβολή του bitrate για βίντεο 1920x1080 @50 fps



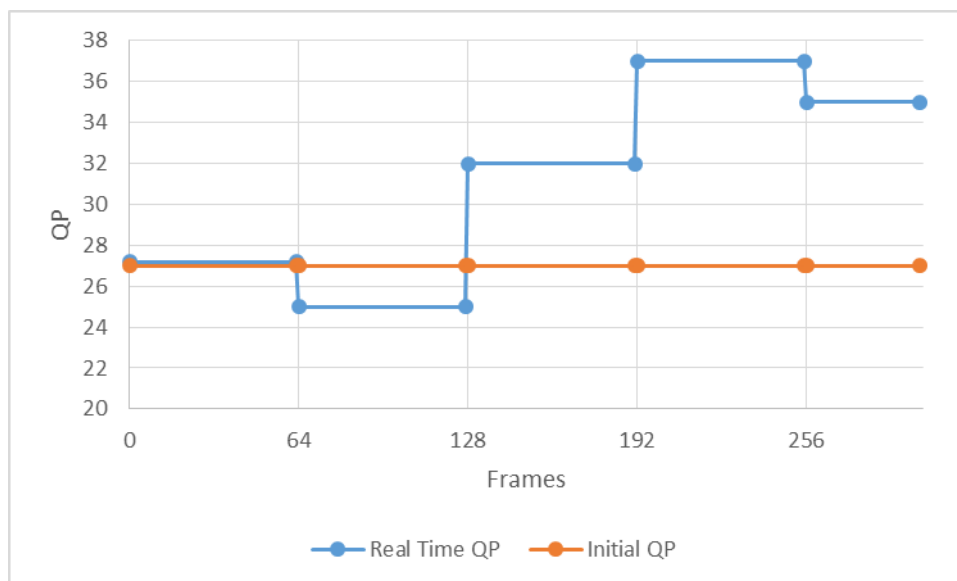
Διάγραμμα 22. Μεταβολή του PSNR για βίντεο 1920x1080 @50 fps

Από τα παραπάνω αποτελέσματα βγάζουμε το συμπέρασμα ότι οι τεχνολογίες 802.11b/g/n/ac μπορούν να υποστηρίξουν την απρόσκοπτη αποστολή όλων των βίντεο

που μελετήθηκαν, προσφέροντας ταυτόχρονα εξαιρετική ποιότητα εικόνας στον τελικό χρήστη, έχοντας κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα τιμές άνω του κατωφλίου των 35dB [5].

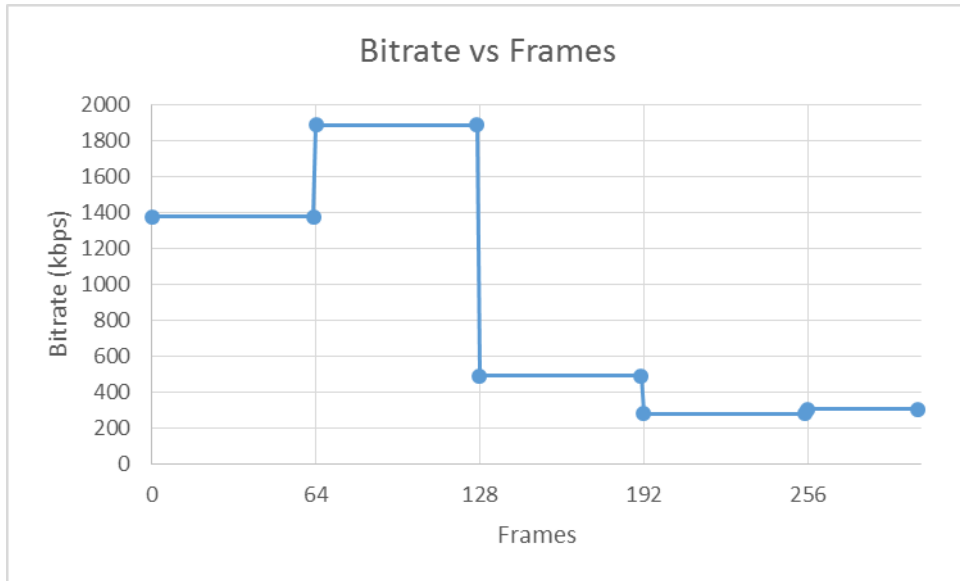
6.3.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2

Για τη μελέτη του adaptation σε εξωτερικούς χώρους με τη χρήση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταβάλετε αναλόγως με την απόσταση που έχει ο χρήστης από το σταθμό βάσης. Για τον προσδιορισμό των εναλλαγών του bit rate μεταβάλαμε, κατά την κωδικοποίηση των βίντεο των 30 fps, κάθε 2 δευτερόλεπτα περίπου το ποσοστό συμπίεσης σε διάφορες τιμές ξεκινώντας από QP=27. Τα επόμενα δευτερόλεπτα παρατηρήθηκε η είσοδος του χρήστη σε δίκτυο τέταρτης γενιάς και το ποσοστό συμπίεσης μεταβλήθηκε σε QP=25, ενώ στα αμέσως επόμενα 2 δευτερόλεπτα ο χρήστης απομακρύνθηκε από την κυψέλη δίνοντας QP=32, συνεχίζοντας τη πορεία του προκαλώντας ακόμα χαμηλότερο ποσοστό συμπίεσης QP=37, καταλήγοντας στο ποσοστό συμπίεσης QP=35, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 23.

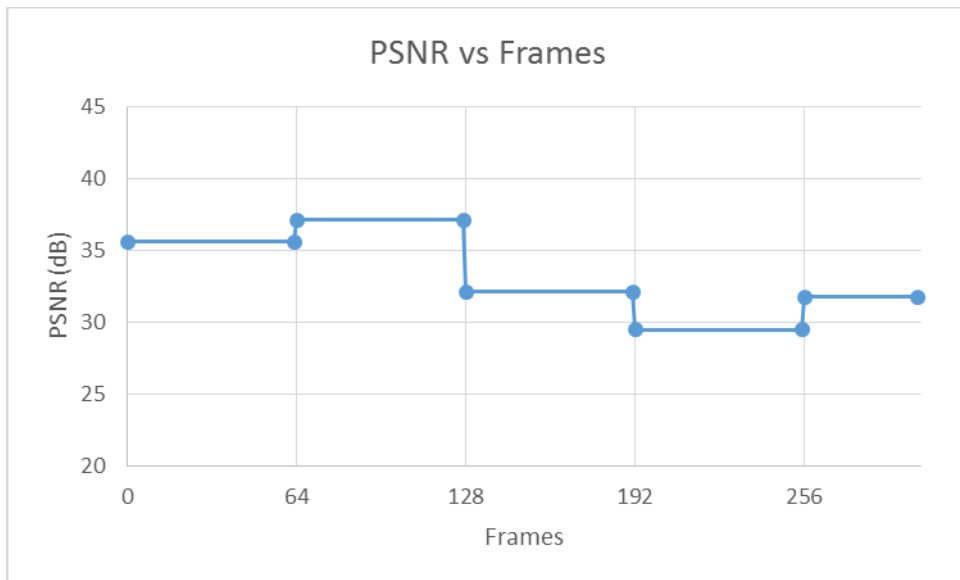


Διάγραμμα 23. Μεταβολή ποσοστού συμπίεσης κατά την κωδικοποίηση βίντεο των 30 fps με δίκτυο κινητής τηλεφωνίας σε πραγματικό χρόνο

Για το βίντεο με resolution 416x240 και 30 fps διαπιστώνουμε ότι τη μέγιστη ποιότητα εικόνας με PSNR 37.1 dB την επιτυγχάνουμε σε δίκτυο 3.5G, έχοντας bit rate περίπου 1.9 Mbps, ενώ όταν ο χρήστης βρίσκεται σε τρίτης δεύτερης γενιάς η ποιότητα της εικόνας έχει τιμή PSNR 29.49 dB με ένα bit rate της τάξεως των 280 Kbps, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 24 και 25.

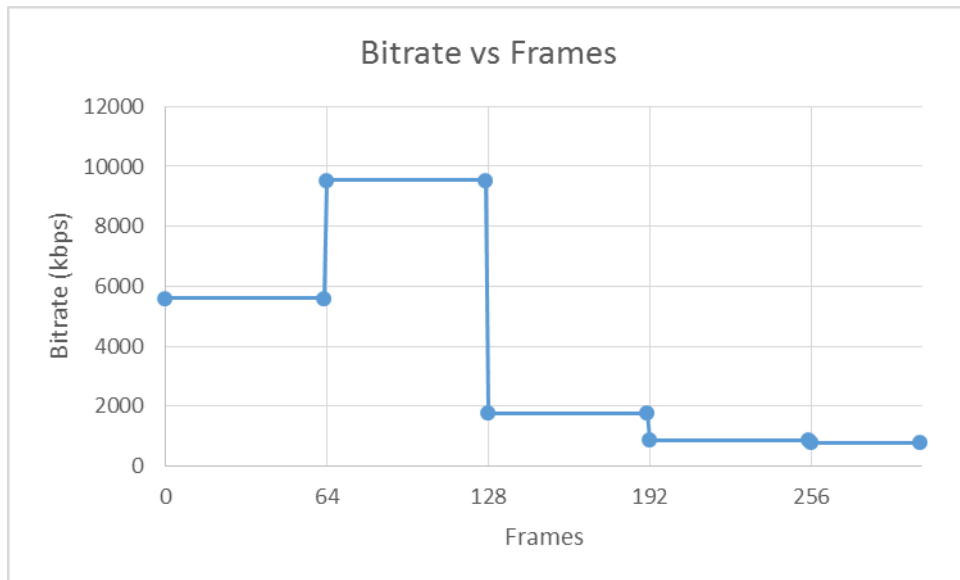


Διάγραμμα 24. Μεταβολή του bitrate για βίντεο 416x240 @30 fps

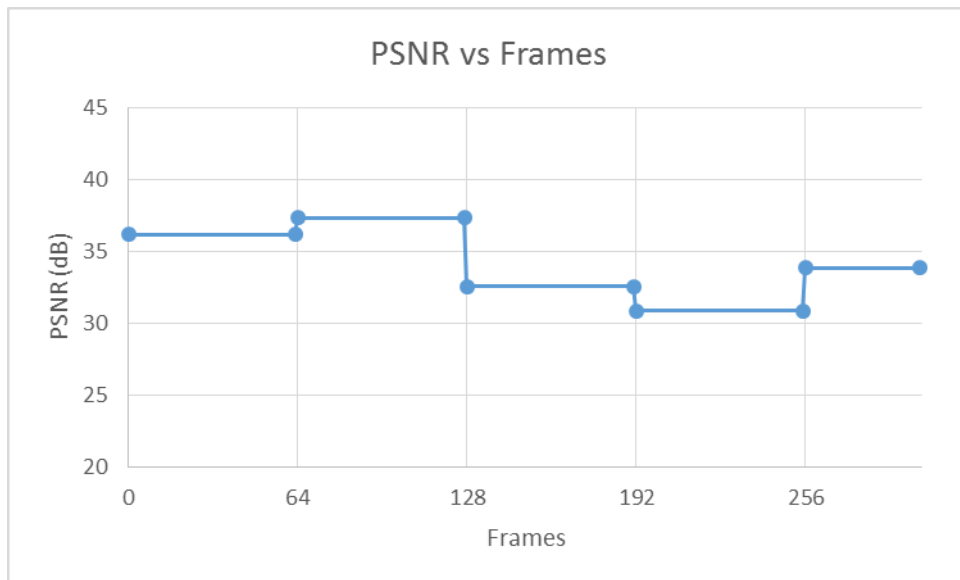


Διάγραμμα 25. Μεταβολή του PSNR για βίντεο 416x240 @30 fps

Στο standard definition βίντεο με resolution 832x480 και 30 fps η μέγιστη ποιότητα εικόνας επιτυγχάνει PSNR 37.34 dB και το bit rate φτάνει περίπου τα 9.5 Mbps, κάτι που σημαίνει ότι ο απαιτείται δίκτυο τέταρτης γενιάς για την εξυπηρέτηση του χρήστη, ενώ όταν το βρισκόμαστε σε δίκτυο 3.5G η ποιότητα της εικόνας που μπορούμε να έχουμε έχει τιμή PSNR 30.85 dB με bit rate που αγγίζει τα 860 Kbps, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 26 και 27.

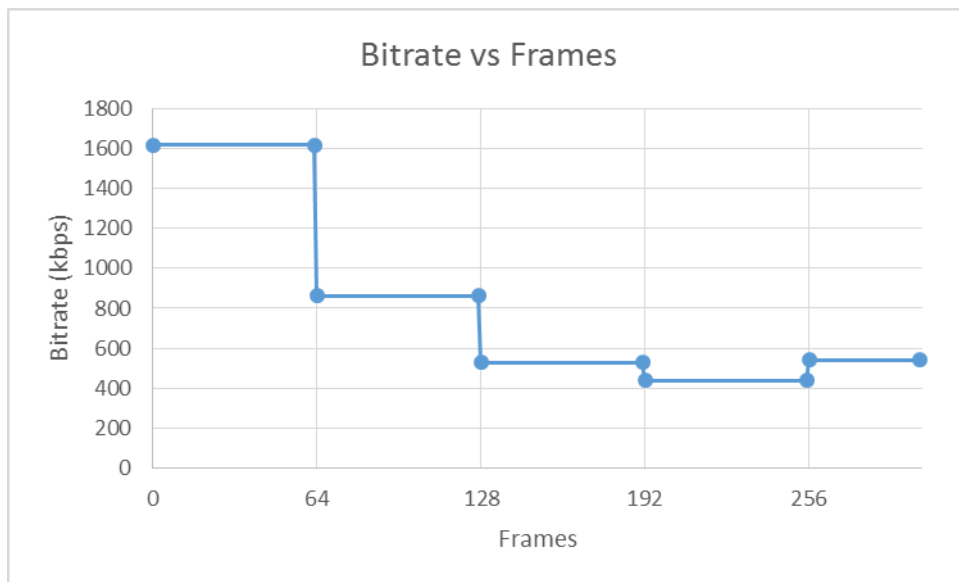


Διάγραμμα 26. Μεταβολή του bitrate για βίντεο 832x480 @30 fps

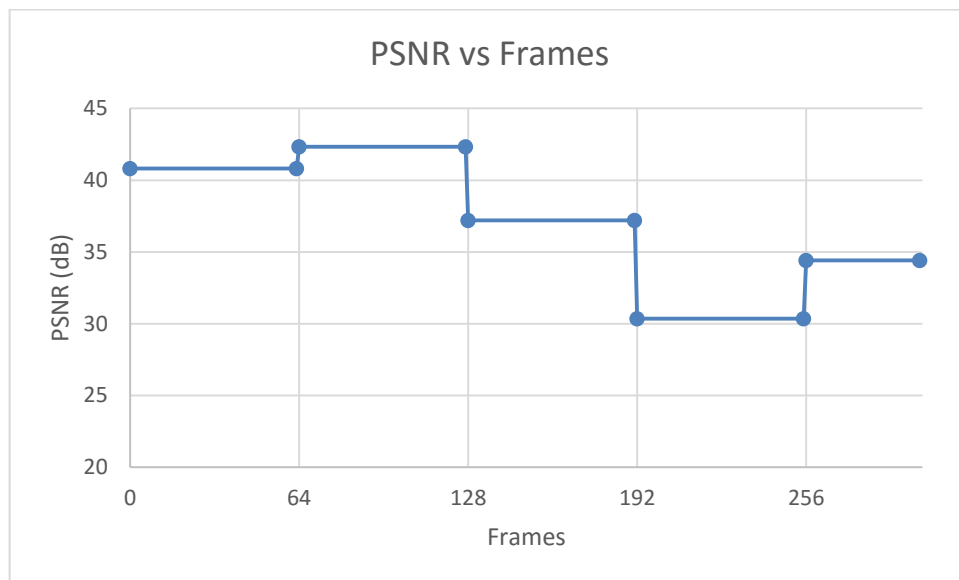


Διάγραμμα 27. Μεταβολή του PSNR για βίντεο 832x480 @30 fps

Για το high definition βίντεο με resolution 1280x720 και 30 fps παρατηρούμε ότι τη μέγιστη ποιότητα εικόνας με PSNR 42.33 dB την επιτυγχάνουμε σε 3.5G δίκτυο, έχοντας bit rate περίπου 1.6 Mbps, ενώ σε 3G δίκτυο η ποιότητα της εικόνας που μπορούμε να έχουμε έχει τιμή PSNR 30.35 dB με bit rate στα 440 Kbps, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 28 και 29.

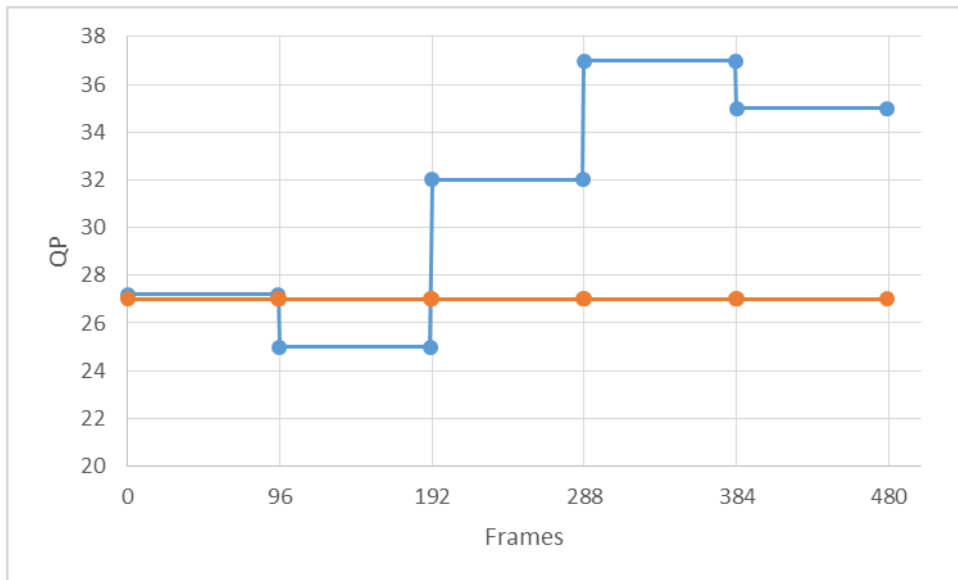


Διάγραμμα 28. Μεταβολή του bitrate για βίντεο 1280x720 @30 fps



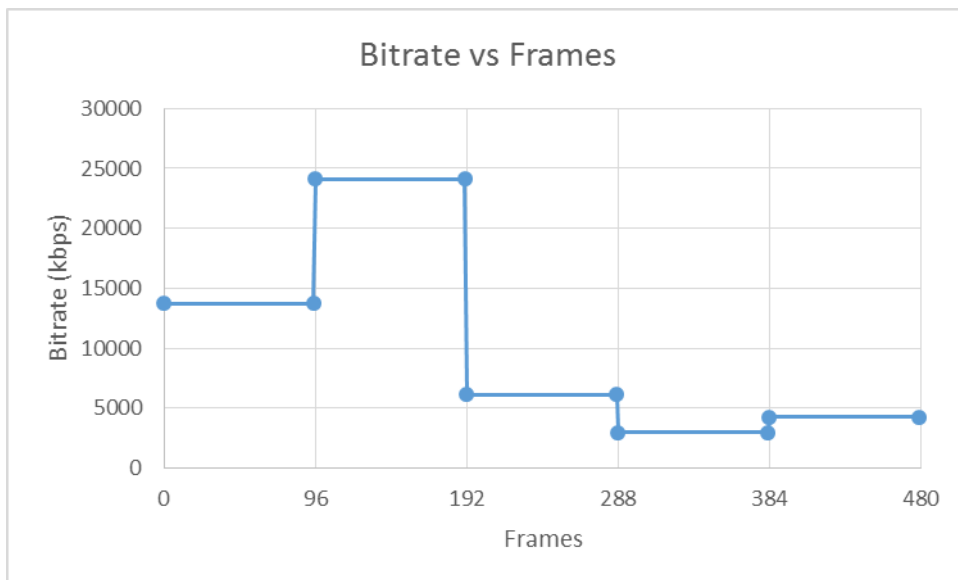
Διάγραμμα 29. Μεταβολή του PSNR για βίντεο 1280x720 @30 fps

Κατά την κωδικοποίηση του βίντεο των 50 fps, κάθε 2 δευτερόλεπτα περίπου το ποσοστό συμπίεσης σε διάφορες τιμές ξεκινώντας από QP=27. Τα επόμενα δευτερόλεπτα παρατηρήθηκε αύξηση του αριθμού των χρηστών στο δίκτυο κι έτσι το ποσοστό συμπίεσης μεταβλήθηκε σε QP=25, ενώ στα αμέσως επόμενα 2 δευτερόλεπτα το δίκτυο είχε τον μικρότερο αριθμό χρηστών με QP=32, έπειτα έχουμε μια μικρή αύξηση στο traffic με QP=37 καταλήγοντας σε ένα ποσοστό συμπίεσης κοντά στο αρχικό QP=35, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 30.

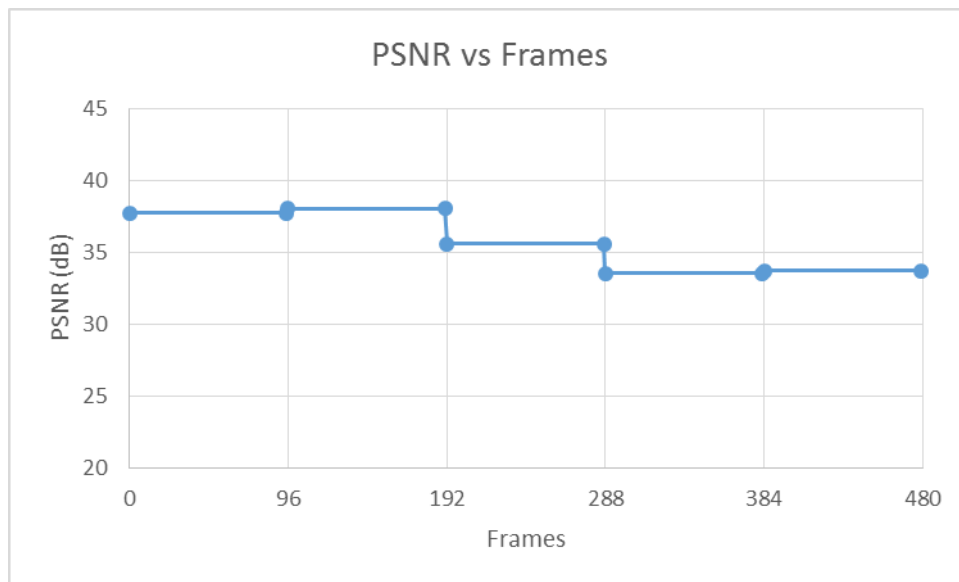


Διάγραμμα 30. Μεταβολή ποσοστού συμπίεσης κατά την κωδικοποίηση βίντεο των 50 fps με δίκτυο κινητής τηλεφωνίας σε πραγματικό χρόνο

Στο βίντεο full high definition με resolution 1920x1080 και 50 fps βλέπουμε ότι για την επίτευξη της μέγιστη ποιότητα εικόνας με PSNR 38.06 dB απαιτείται bit rate περίπου 24.1 Mbps κάτι που σημαίνει ότι η επιτυχής αποστολή των δεδομένων μπορεί να γίνει από ένα δίκτυο LTE-A, ενώ η ποιότητα της εικόνας έχει τιμή PSNR 33.55 dB σε δίκτυο 3.5G και bit rate στα 3 Mbps, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 31 και 32.



Διάγραμμα 31. Μεταβολή του bitrate για βίντεο 1920x1080 @50 fps



Διάγραμμα 32. Μεταβολή του PSNR για βίντεο 1920x1080 @50 fps

Τα συμπεράσματα που βγάζουμε από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ότι οι υπάρχουσες τεχνολογίες 3.5G και 4G μπορούν να υποστηρίξουν την απρόσκοπτη αποστολή όλων των standard και high definition βίντεο, προσφέροντας ταυτόχρονα εξαιρετική ποιότητα εικόνας στον τελικό χρήστη, έχοντας κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα τιμές άνω του κατωφλίου των 35dB [5]. Όμως, η τάση για ακόμα μεγαλύτερες διαστάσεις εικόνας και full high definition βίντεο οδηγεί και στην αύξηση του ρυθμού δεδομένων κάτι που οι σημερινές τεχνολογίες δεν είναι σε θέση να καλύψουν πλήρως. Έτσι, καθίσταται απαραίτητη η μετάβαση σε δίκτυα LTE-Advanced ή και 5G για την επιτυχή και απροβλημάτιστη αποστολή βίντεο σε πραγματικό χρόνο.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Η χρήση τεχνολογιών ανοικτού κώδικα για σκοπούς κωδικοποίησης, συμπίεσης, αποστολής και αναπαραγωγής βίντεο έχει το πλεονέκτημα ότι το λογισμικό ανοικτού κώδικα είναι δωρεάν και δεν θα αποτελέσει οικονομική επιβάρυνση για τον χρήστη. Επίσης μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες οποιασδήποτε εφαρμογής αφού ο πηγαίος κώδικας είναι ελεύθερα διαθέσιμος και τροποποιήσιμος.

Οι διαδεδομένες εφαρμογές κωδικοποίησης ψηφιακού βίντεο JM Software και HM Software προσφέρουν πολλές δυνατότητες στον χρήστη, μιας και επιτρέπουν την παραμετροποίηση πολλών παραγόντων που σχετίζονται με τη συμπίεση των βίντεο, γι' αυτό άλλωστε θεωρούνται ως οι κορυφαίες εφαρμογές ανοικτού κώδικα αυτού του είδους. Αποδεικνύεται όμως, ότι χρειάζονται μεγάλη χρονική διάρκεια για την ολοκλήρωση της συμπίεσης κάτι που τα καθιστά μη λειτουργικά σε περιπτώσεις αποστολής βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη μεριά τα x264 και x265, παρ' όλο που δεν δίνουν τη δυνατότητα για πολλές παραμετροποιήσεις στη κωδικοποίηση, παρέχουν ικανοποιητική συμπίεση στα βίντεο μέσα σε χρόνο ελάχιστων δευτερολέπτων ή και ακόμα λιγότερο και έτσι είναι ιδανικά για εφαρμογές live streaming.

Επιπλέον, η σύγκριση μεταξύ του υπάρχοντος προτύπου κωδικοποίησης AVC σε σχέση με το αναδυόμενο HEVC, έδειξε σε κάθε περίπτωση ότι το δεύτερο επιτυγχάνει την ίδια ποιότητα εικόνας χρησιμοποιώντας πολύ λιγότερο bit rate από το AVC. Μέσα από μία σειρά κωδικοποιήσεων προέκυψε σαν μέσος όρος ότι κατάφερε να έχει μειωμένο bit rate κατά περίπου 56%, κάτι που σημαίνει ότι είτε μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε για την ελάττωση του traffic ενός ασύρματου καναλιού, είτε να επιτύχουμε καλύτερη ποιότητα χρησιμοποιώντας όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης για την κωδικοποίηση του βίντεο. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι όσο πιο έντονη κίνηση περιλαμβάνει ένα βίντεο, τότε απαιτείται και μεγαλύτερο bit rate για την κωδικοποίηση του.

Η ραγδαία εξέλιξη των τεχνολογιών 802.11x έχουν φτάσει σε σημείο να προσφέρουν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, κάτι που τις καθιστά ως τις ιδανικές για την απρόσκοπτη αποστολή βίντεο σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας εξαιρετική ποιότητα εικόνας στον τελικό χρήστη. Επίσης, οι τελευταίες γενιές των δικτύων κινητής τηλεφωνίας μπορούν να αποδώσουν αποτελεσματικά κατά την αποστολή βίντεο σε πραγματικό χρόνο, πετυχαίνοντας ποιοτική εικόνα ακόμα και σε βίντεο high definition, όπου απαιτείται υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.

Ως μελλοντική εργασία προτείνεται η χρήση του προσομοιωτή TruNet για την μελέτη και συμπεριφορά του προτύπου HEVC κατά την αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε συγκεκριμένο περιβάλλον, είτε σε εσωτερικό χώρο μέσω της Wi-Fi τεχνολογίας, είτε σε εξωτερικό περιβάλλον μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Μια τέτοιου είδους προσομοίωση δίνει τη δυνατότητα για εξέταση του adaptive encoding σε ένα κινούμενο χρήστη, έχοντας διαφορετικό bandwidth, channel modulation και coding scheme. Επίσης, ο έλεγχος της απόδοσης του προτύπου HEVC σε τρισδιάστατα βίντεο, τα οποία με το υπάρχον πρότυπο απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης, ώστε να καταφέρουν αποδώσουν πραγματικά την τρισδιάστατη μορφή της εικόνας και η σύγκριση του με το πρότυπο AVC. Επιπλέον, το επόμενο βήμα της εξέλιξης αφορά την αποστολή Απτικών Δεδομένων (Haptic Data), που είναι ένας κλάδος της τεχνολογίας όπου ήδη γίνεται έρευνα γύρω από αυτόν και που αναμένεται να υλοποιηθεί μέσα στα επόμενα χρόνια.

Βιβλιογραφία

- [1] 3GPP (2014). Overview of 3GPP Release 8 V0.3.3
- [2] 3GPP (2014). Overview of 3GPP Release 9 V0.3.4
- [3] 3GPP (2014). Overview of 3GPP Release 10 V0.2.1
- [4] 4G Americas (2013). *Supporting Wireless Video Growth and Trends*.
- [5] Antoniou, Z., Panayides, A. S., Pattichis, M. S., Stavrou, S., Kyriacou, E., Spanias, A., Constantinides, A. G., & Pattichis, C. S. (2015). Adaptive emergency scenery video communications using HEVC for responsive decision support in disaster incidents. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE* (pp. 173-176). IEEE.
- [6] Bjøntegaard, G. (2008). Improvements of the BD-PSNR model, document VCEG-AI11. *ITU-T SG16*.
- [7] Bossen, F., Flynn, D., & Sühning, K. (2013). *HM 12.1 Software Manual, Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC) of ITU-T SG16 WP3 and ISO*. IEC JTC1/SC29/WG11, JCTVC-Software Manual.
- [8] Bouras, C., Gkamas, A., Primpas, D., & Stamos, K. (2008). Real-Time Protocols (RTP/RTCP). *Encyclopedia of Internet technologies and applications*, 463.
- [9] Bovik, A. C. (2009). *The essential guide to video processing*. Academic Press.
- [10] Cisco. (2012). 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi. *White Paper*.
- [11] Dekleva, S., Shim, J. P., Varshney, U., & Knoerzer, G. (2007). Evolution and emerging issues in mobile wireless networks. *Communications of the ACM*, 50(6), 38-43.
- [12] ETSI, T. (2005). 100 910 V8.20.0 (2005-11). *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+)—Radio Transmission and Reception—3GPP TS 05.05 version 8.20. 0 Release 1999*.
- [13] ETSI, T. (2013). 25 104 V5.13.0 (2013-04). *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (3GPP TS 25.104 version 11.5.0 Release 11)*.
- [14] ETSI, T. (2013). 136 104 V11.4.0 (2013-04). *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 11.4.0 Release 11)*.
- [15] FFmpeg. <http://ffmpeg.org/>

- [16] Forouzan, B. A. (2002). *TCP/IP protocol suite*. McGraw-Hill, Inc.
- [17] Gibson, J. D. (1998). *Digital compression for multimedia: principles and standards*. Morgan Kaufmann.
- [18] GSM handover or handoff.
http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/gsm_technical/handover-handoff.php
- [19] Hanzo, L., Cherriman, P. J., & Streit, J. (2009). Comparative Study of the H. 261 and H. 263 Codecs. *Video Compression and Communications: From Basics to H. 261, H. 263, H. 264, MPEG4 for DVB and HSDPA-Style Adaptive Turbo-Transceivers, Second Edition*, 295-337.
- [20] Horizon 2020 (2015). <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>
- [21] IEEE 802.11a Working Group. (1999). Wireless LAN MAC and PHY Specifications–Amendment 1: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band. *IEEE Standard*.
- [22] IEEE 802.11ac Working Group. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz.
- [23] IEEE 802.11n Working Group. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications-Draft 5.0: Enhancements for Higher Throughput.
- [24] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. Supplement to IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. *IEEE Std, 802*.
- [25] ITU, I. (2008). 2134, Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s). *International Telecommunications Union*.
- [26] Jaloun, M., & Guennoun, Z. (2010). Wireless Mobile Evolution to 4G Network. *Wireless sensor network*, 2(04), 309.
- [27] Jun, J., Peddabachagari, P., & Sichitiu, M. (2003). Theoretical maximum throughput of IEEE 802.11 and its applications. In *Network Computing and Applications, 2003. NCA 2003. Second IEEE International Symposium on* (pp. 249-256). IEEE.

- [28] Karjaluoto, H. (2007). An investigation of third generation (3G) mobile technologies and services. *Contemporary Management Research*, 2(2), 91.
- [29] Le Gall, D. (1991). MPEG: A video compression standard for multimedia applications. *Communications of the ACM*, 34(4), 46-58.
- [30] LTE Handover Overview (2012).
<http://www.3gpteinfo.com/lte-handover-overview/>
- [31] MAGNET, A. (2008). 802.11 n Primer. *White Paper*.
- [32] MPEG, S. (1999). Information technology-coding of audio-visual objects, ver. 1. *ISO/IEC*, 14, 496.
- [33] National Instruments (2015). WLAN - 802.11 a, b, g and n. *White paper*.
- [34] Netgear Support (2004).
[http://kb.netgear.com/app/answers/detail/a_id/1006/~/_rf-transmit-power-and-receive-sensitivity-data-for-the-fwg114pv2-\(eol\)](http://kb.netgear.com/app/answers/detail/a_id/1006/~/_rf-transmit-power-and-receive-sensitivity-data-for-the-fwg114pv2-(eol))
- [35] Network Architecture (2009).
<http://users.sch.gr/pepoudi/site/pages/page34.html>
- [36] Pennebaker, W. B., & Mitchell, J. L. (1992). *JPEG: Still image data compression standard*. Springer Science & Business Media.
- [37] Richardson, I. (2007). An Overview of H. 264 Advanced video coding. *Vcodex white paper*.
- [38] Saunders, S., & Aragón-Zavala, A. (2007). *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. John Wiley & Sons.
- [39] Schelstraete, S. (2011). An Introduction to 802.11 ac. *Quantenna Communications*.
- [40] Stallings, W. (2007). *Data and computer communications*. Pearson/Prentice Hall.
- [41] Stallings, W. (2009). *Wireless communications & networks*. Pearson Education India.
- [42] Stanford, M. (2007). How does 802.11 n get to 600Mbps?
- [43] Suhring, K. (2009). H. 264/14496-10 AVC reference software manual. In *Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG & ITU-T VCEG (ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 and ITU-T SG16 Q. 6) 31st Meeting: London, UK, Jun* (p. 90).
- [44] Sullivan, G. J., Ohm, J. R., Han, W. J., & Wiegand, T. (2012). Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 22(12), 1649-1668.

- [45] Tang, A., Andrew, L. L., Chiang, M., & Low, S. H. (2008). Transport layer. *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*.
- [46] Thang, T. C., Ho, Q. D., Kang, J. W., & Pham, A. T. (2012). Adaptive streaming of audiovisual content using MPEG DASH. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 58(1), 78-85.
- [47] Thang, T. C., Le, H. T., Pham, A. T., & Ro, Y. M. (2014). An evaluation of bitrate adaptation methods for HTTP live streaming. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 32(4), 693-705.
- [48] TruNet.
<http://www.sigintsolutions.com/research-development/platforms/channel-modelling/truem>
- [49] UMTS WCDMA Handover: hard soft, softer, inter-RAT.
<http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/umts/umts-wcdma-handover-handoff.php>
- [50] UMTS World. <http://www.umtsworld.com/technology/wcdma.htm>
- [51] VLC media player. <http://www.videolan.org/vlc/>
- [52] What is 1G or First generation of wireless telecommunication technology? (2011).
<http://www.clear doubts.com/technology/what-is-1g-or-first-generation-of-wireless-telecommunication-technology/>
- [53] What is 2.5G Technology (2008)
<http://www.learn.geekinterview.com/it/wireless/what-is-2-5g-technology.html>
- [54] Wiegand, T., Sullivan, G. J., Bjøntegaard, G., & Luthra, A. (2003). Overview of the H. 264/AVC video coding standard. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 13(7), 560-576.
- [55] x264. <https://www.videolan.org/developers/x264.html>
- [56] x265. <https://www.videolan.org/developers/x265.html>
- [57] YUV viewer (2004). <http://www.yuvplayer.com/>
- [58] Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ) (2006). Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία και Κινητή Τηλεφωνία Τα Επιστημονικά Δεδομένα.