



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θέμα:

<<Μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων
με την τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου >>

Πλαστράς Απόστολος

Επιβλέποντες

Κουτσόπουλος Ιορδάνης
Τασιούλας Λεάνδρος
Αργυρίου Αντώνιος

Φεβρουάριος 2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κουτσόπουλο Ιορδάνη καθώς και τον κ. Τασιούλα Λέανδρο για την συμβολή τους στην εργασία αυτή. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αργυρίου Αντώνη, του οποίου οι συμβολές και η καθοδήγηση ήταν σημαντικές παράμετροι για την επιτυχή έκβαση και διεκπεραίωση της εργασίας αυτής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Mark Aoun του οποίου η βοήθεια και οι συμβουλές σε αρκετά σημεία της εργασίας ήταν καταλυτικής σημασίας.

Σύνοψη

Στην λειτουργία των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, σημαντικό ρόλο παίζει το περιβάλλον που λειτούργουν, ο τρόπος και η συχνότητα μεταβολής του, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να κάνουμε λόγο για διάφορες μετρικές οι οποίες σχετίζονται με το χρόνο, όπως η δημιουργία δεδομένων, η επεξεργασία αυτών και η επικοινωνία μεταξύ των ασύρματα συνδεδεμένων κόμβων. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζουμε τεχνικές, όπως η κωδικοποίηση δικτύου (network coding) και η υπαναχώρηση επεξεργασίας (service reneging), σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4. Ειδικότερα μελετούμε την απόδοση πραγματικού χρόνου με αυτές της τεχνικές κάτω από διάφορες συνθήκες φόρτωσης του δικτύου και διάφορες απαιτήσεις όσον αφορά τον χρόνο παράδοσης των δεδομένων. Το δίκτυο μας είναι τέτοιο που πρέπει να είναι απαραίτητες δύο ενδιάμεσες μεταδόσεις ώστε το μήνυμα να φτάσει στον τελικό προορισμό του. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι και οι δύο τεχνικές μειώνουν τον αριθμό των μεταδόσεων που είναι απαραίτητες για την ολοκλήρωση της αποστολής των δεδομένων που έχουμε ορίσει καθώς επίσης βελτιώνουν τον αριθμό των δεδομένων που φτάνουν στην ώρα τους στον προορισμό τους σε συνθήκες υπερφόρτωσης δικτύου. Τέλος ο συνδυασμός των δύο αυτών τεχνικών έχει ως αποτέλεσμα μια επιπλέον βελτίωση της απόδοσης.

Πίνακας περιεχομένων

Σύνοψη	3
Εισαγωγή	5
Βιβλιογραφική έρευνα	9
Ορολογία	10
Μοντέλο συστήματος.....	11
Το δίκτυό μας	11
Το πρωτόκολλο 802.15.4.....	12
Κωδικοποίηση ,χρονοδρομολόγηση και μηχανισμοί προσπέλασης.....	13
Κωδικοποίηση πακέτων	14
Χρονοπρογραμματισμός και διαχείριση ουράς.....	15
Παράκαμψη πακέτων.....	17
Πειραματικά Αποτελέσματα	18
Παράμετροι προσομοίωσης.....	18
Περίπτωση πρώτη : Σταθερός μέσος χρόνος διορίας (deadline)	20
Περίπτωση δεύτερη: Ποικίλες χρονικές διορίες και ρυθμοί άφιξης πακέτων.....	24
Χρήση του μηχανισμού EDF.....	26
Συμπεράσματα	28
Βιβλιογραφία	29

Εισαγωγή

Το κύριο χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με τα άλλα δίκτυα, είναι η εγγύτητα και η αμεσότητα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν. Η κύρια συνάρτηση η οποία εκτελείται στα δίκτυα αισθητήρων είναι η αυτή της αναφοράς της κατάστασης του περιβάλλοντος λειτουργίας τους. Όπως είναι λογικό λοιπόν το περιβάλλον δράσης τους είναι δυναμικό και μεταβλητό. Αυτό σημαίνει ότι το στιγμιότυπο το οποίο έχει καταγραφεί παραμένει αξιόπιστο και ανανεωμένο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπου από εκεί και μετά τα δεδομένα αυτά γίνονται παλιά και δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τέτοιου στιγμιότυπου, αποτελούν οι διάφοροι δείκτες που σχετίζονται με τον ανθρώπινο οργανισμό. Οι δείκτες αυτοί από τη φύση τους είναι δυναμικοί και χαρακτηρίζουν την κατάσταση του ασθενούς για μια δεδομένη στιγμή όπου καταγράφουμε αυτές τις μετρικές από το 'ανθρώπινο σύστημα αισθητήρων'. Όσο οι μετρικές αυτές παραμένουν σταθερές και δεν αλλάζουν, το συμπέρασμα που έχουμε βγάλει για την κατάσταση του ασθενούς θα παραμένει το ίδιο ενώ οποιαδήποτε μεταβολή σε αυτές σημαίνει και αλλαγή στην κατάσταση του ασθενούς, γεγονός που μας οδηγεί στα αντίστοιχα συμπεράσματα για το αν η προτεινόμενη αγωγή είναι σωστή ή όχι.

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των δικτύων που θα μελετήσουμε είναι ότι αναμένεται να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα από διάφορες και περισσότερες από μία εφαρμογές, οι οποίες θα έχουν τόσο διαφορετικό ρυθμό παραγωγής δεδομένων όσο και διαφορετικές απαιτήσεις ως προς το χρόνο παράδοσης των δεδομένων που παράγουν στους τελικούς αποδέκτες. Συμπεραίνουμε έτσι το πόσο σημαντική και απαραίτητη γίνεται η μελέτη για την απόδοση και τη λειτουργία των δικτύων αισθητήρων κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτου.

Με βάση τα παραπάνω λοιπόν γίνεται αντιληπτό ότι η ορθότητα της λειτουργίας του δικτύου μας, για τις πραγματικού χρόνου εφαρμογές, έχει να κάνει με δύο διαστάσεις. Πρώτον, ορθότητα ως προς τον υπολογισμό, την ανάλυση και την παραγωγή των δεδομένων και δεύτερον ορθότητα ως προς την τήρηση του χρόνου παράδοσης των μηνυμάτων στον τελικό προορισμό και γενικότερα σωστή διαχείριση όλων εκείνων των ενεργειών που πρέπει να γίνουν

,για την καλύτερη απόδοση του συστήματος.

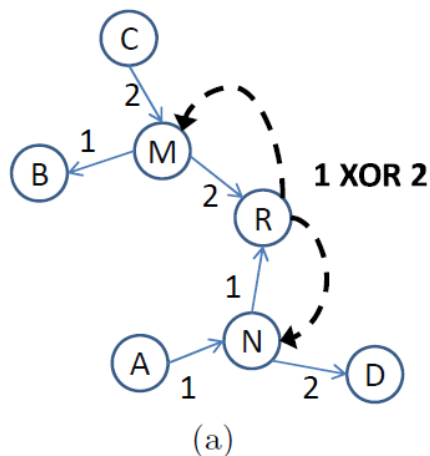
Σχετικά με το επίπεδο επικοινωνίας τώρα δύο πτυχές αξίζει να μελετηθούν. Η μία σχετίζεται με την σωστή χρονική παράδοση των πληροφοριών ώστε να πετύχουμε σωστή συμπεριφορά για την εφαρμογή μας, ενώ η δεύτερη σχετίζεται με την οριοθέτηση και τον καθορισμό των πληροφοριών εκείνων οι οποίες είναι παλιές, ώστε να αποφεύγουμε τα λάθος συμπεράσματα καθώς και την επιπλέον επιβάρυνση του δικτύου μας με πληροφορίες οι οποίες πλέον δεν έχουν καμία χρησιμότητα.

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιούμε μια τεχνική η οποία βελτιώνει την απόδοση σε δίκτυα αισθητήρων με βάση κάποιες θεωρητικές μελέτες. Ποιο συγκεκριμένα μελετούμε την ιδέα της κωδικοποίησης δικτύου (network coding) [3], όπου οι κόμβοι του δικτύου μας οι οποίοι εκτελούν χρέη δρομολογητή, αντί να προωθούν απλώς ένα ένα τα πακέτα στον επόμενο προορισμό τους, όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες μέσω κάποιων αλγεβρικών πράξεων αποκτούν την δυνατότητα να συγχωνεύουν δύο απλά πακέτα και να αποστείλουν πλέον τον συνδυασμό τους. Η κωδικοποίηση δικτύου αυξάνει την ωφέλιμη πληροφορία σε ένα πακέτο μεταφοράς χωρίς όμως να επιφέρει σημαντική επιβάρυνση στο ίδιο το πακέτο (overhead).

Στην εργασία αυτή προσπαθούμε να καθορίσουμε την βελτίωση που παρέχει η κωδικοποίηση δικτύου σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real time). Το δίκτυο το οποίο προσομοιώνουμε και τρέχουμε οι εφαρμογές μας είναι τέτοιο ώστε να είναι απαραίτητη η μετάβαση σε τουλάχιστον δύο κόμβους δρομολόγησης (router nodes) μέχρι το πακέτο να φτάσει στον τελικό προορισμό του. Γνωρίζοντας ότι η κωδικοποίηση του δικτύου βελτιώνει την απόδοση του δικτύου μας μπορούμε να πούμε ότι το ίδιο θα συμβαίνει και στα πιο πολύπλοκα δίκτυα σαν το δικό μας.

Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτό είναι γιατί οι κόμβοι δρομολόγησης (route nodes) του δικτύου μας είναι ουσιαστικά σημεία συνάντησης των πακέτων των εφαρμογών μας προκειμένου να φτάσουν στον τελικό προορισμό τους. Οι κόμβοι αυτοί λοιπόν, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι γνωρίζουν ποια είναι η γειτονία τους και με ποιο τρόπο αυτοί συνδέονται μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας την πολλαπλή αποστολή μηνύματος (broadcast) του καναλιού, μπορούν ομορτυνιστικά αντί να αποστείλουν κάθε μήνυμα στον εκάστοτε αποδέκτη, να συνδυάσουν δυο πακέτα μέσω μια XOR πράξης και με την δυνατότητα της πολλαπλής αποστολής να στείλουν το συνδυασμένο αυτό μήνυμα και στους δύο αποδέκτες. Οι δύο κόμβοι τώρα στους οποίους αποστέλλεται το συνδυασμένο μήνυμα, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι κρατούν αντίγραφο σχετικό με τι έχουν στείλει στον γειτονικό τους κόμβο και εκτελώντας μια πράξη XOR μεταξύ του συνδυασμένου πακέτου που έλαβαν και του αντίγραφου αυτού, μπορούν να

αποκτήσουν το μήνυμα που είχε αποδέκτη τους ίδιους. Η "εικόνα 1" μας δείχνει ένα βασικό σενάριο όπου ο κόμβος A θέλει να στείλει το πακέτο 1 στον κόμβο B και ο κόμβος C θέλει να στείλει το πακέτο 2 στον κόμβο D. Η ακολουθία αποστολής των πακέτων μέχρι τον τελικό προορισμό τους είναι A,N,R,M,B για το πακέτο 1 και C,M,R,N,D για το πακέτο 2. Ο κόμβος R μπορούμε να πούμε ότι είναι το κοινό σημείο συνάντησης των δύο ροών. Έτσι ο A θα στείλει το πακέτο 1 στον κόμβο N ο οποίος θα στείλει το πακέτο με τη σειρά του στον κόμβο R, ενώ η αντίστοιχη διαδικασία θα γίνει για το πακέτο 2 με τους κόμβους C,M,R αυτή τη φορά. Έχοντας ο κόμβος R τη στιγμή αυτή και τα δύο πακέτα μπορεί να κάνει XOR τα δύο πακέτα αυτά ($(1 \text{ XOR } 2)$) και μέσω της πολλαπλής αποστολής (broadcast) να αποστείλει το κωδικοποιημένο πακέτο στους M,N οι οποίοι με την σειρά τους θα εκτελέσουν ($[(1 \text{ XOR } 2) \text{ XOR } 2]$) και ($[(1 \text{ XOR } 2) \text{ XOR } 1]$) για να αποκτήσουν τα πακέτα 1,2 αντίστοιχα και να τα αποστείλουν με την σειρά τους στον τελικό τους προορισμό.



Εικόνα 1: Κωδικοποίηση δικτύου δύο ροών σε τυχαίο δίκτυο

Στο δικό μας αντικείμενο μελέτης, όπου οι εφαρμογές οι οποίες θα χρησιμοποιούν το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων θα είναι πραγματικού χρόνου, είναι δεδομένο ότι το κάθε πακέτο θα συνδέεται με κάποιο χρονικό περιθώριο έως ότου φτάσει στον προορισμό του. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην υλοποίησή μας δεν θα είναι δεδομένη η χρησιμοποίηση της κωδικοποίησης δικτύου γιατί έχουμε να λάβουμε και άλλες παραμέτρους υπόψη μας, για να βελτιώσουμε την απόδοση με γνώμονα την σωστή λειτουργία της εφαρμογής μας.

Ακόμη ερευνούμε την επίδραση που έχει η τεχνική υπερπήδησης πακέτου

(packet skipping) στο σύνολο του χρόνου περάτωσης των εφαρμογών μας. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή μπορούμε να αρνηθούμε σε ένα πακέτο την εξυπηρέτηση του όταν, με βάση κάποιες μετρικές, συμπεράνουμε ότι είναι μάλλον απίθανο το πακέτο να φτάσει στον τελικό προορισμό του πριν ξεπεραστεί το χρονικό περιθώριο που του έχει τεθεί από την εφαρμογή. Άξιος μελέτης κρίθηκε επίσης ο συνδυασμός των τεχνικών της κωδικοποίησης δικτύου και της υπερπήδησης πακέτου κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτου του δικτύου μας και διαφορετικών απαιτήσεων ως προς τον χρόνο παράδοσης των μηνυμάτων. Για όλα αυτά τα οποία αναφέραμε παραπάνω στα δίκτυα μας χρησιμοποιήσαμε το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4.

Βιβλιογραφική έρευνα

Ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι της έρευνας έχει εστιαστεί γύρω από τα ζητήματα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις προσπαθούν να καθορίσουν την επικαιρότητα σε συγκεκριμένα επίπεδα ξεχωριστά [8,9,10] ή με εξελεγμένες *cross_layer* τεχνικές [13]. Ο συγγραφέας στο [8] σχεδιάζει και ορίζει ένα πρωτόκολλο προτεραιοτήτων βασισμένο στον αλγόριθμο EDF (Earliest Deadline First) για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πραγματικού χρόνου. Καθορίζεται μια κυτταρική τοπολογία και η ποικιλομορφία του καναλιού χρησιμοποιείται για επικοινωνία ανάμεσα στους γείτονες. Η επικοινωνία εντός του "κυττάρου" επιτυγχάνεται με την αντιγραφή του προγράμματος ολόκληρου του κυττάρου σε κάθε κόμβο και εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο EDF για το πρόγραμμα αυτό. Για την μεταξύ των κυττάρων επικοινωνία χρησιμοποιείται ένας καθολικός μηχανισμός TDMA.

Στο [10] παρουσιάζεται το SPEED ένα πρωτόκολλο που παρέχει πραγματικού χρόνου απλή μετάδοση, πολλαπλή και καθολική μετάδοση σε μια περιοχή. Πετυχαίνει πραγματικού χρόνου επικοινωνία καθορίζοντας μια συγκεκριμένη ταχύτητα για πακέτα που ταξιδεύουν πάνω από το δίκτυο από άκρη σε άκρη. Στο [13] παρουσιάζεται το RAP μια αρχιτεκτονική επικοινωνίας σε σχήμα σταυρού και παρέχει υψηλά επίπεδα εξυπηρέτησης σε διάφορες εφαρμογές ενώ γίνεται και μια εισαγωγή στο VMS (Velocity Monotonic Scheduling) μια πολιτική η οποία λαμβάνει υπόψη της το χρονικό περιθώριο που απομένει στο πακέτο για να φτάσει στον τελικό προορισμό όσο και την απόσταση που πρέπει να διανύσει το πακέτο μέχρι να φτάσει στον τελικό προορισμό. Στο [5] παρέχεται από τους συγγραφείς μία σε βάθος ανάλυση του χρονοπρογραμματισμού των πραγματικού χρόνου περιοδικών μηνυμάτων σε ένα υπερφορτωμένο δίκτυο 802.15.4 και αναλύει την απόδοση των διαφόρων κριτηρίων άρνησης υπηρεσίας καθορίζοντας της βέλτιστες στρατηγικές για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η ιδέα της κωδικοποίησης δικτύου και η βελτίωση της απόδοσης ,σε δίκτυα βασισμένα στο 802.15 πρωτόκολλο ,της τάξεως των 3-4 φορές αποδείχτηκε στα [7,11,12]. Στο [6] μελετάτε η απόδοση του συνολικού συστήματος όταν τα πακέτα συνοδεύονται από συγκεκριμένα χρονικά περιθώρια παράδοσης σε δίκτυα σχήματος σταυρού που είναι

απαραίτητη η παρουσία ενός router για την μετάδοση των μηνυμάτων. Στην εργασία μας πάμε ένα βήμα παραπάνω σε σχέση με το [6] και μελετάμε την απόδοση εφαρμογών πραγματικού χρόνου σε δίκτυα που είναι απαραίτητη η μετάβαση των μηνυμάτων σε δύο router κόμβους.

Ορολογία

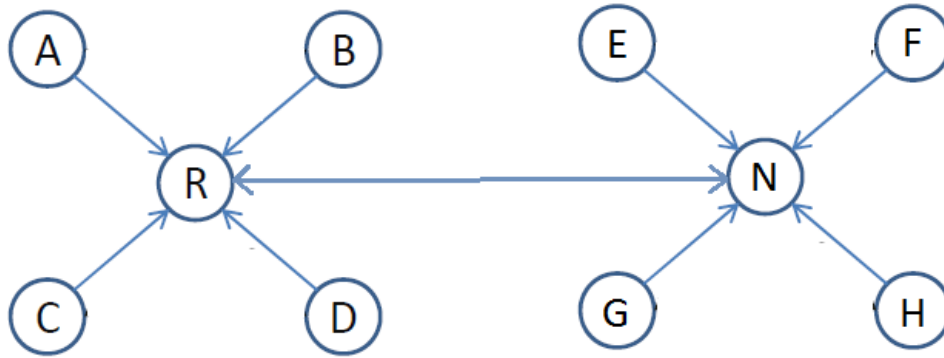
Στην ανάλυση μας από εδώ και κάτω θα κάνουμε αρκετή χρήση κάποιων όρων και εκφράσεων που κρίνεται σκόπιμο να τις ορίσουμε και να τις αναλύσουμε εδώ. Όσον αφορά τα πακέτα δεδομένων έχουμε δύο τύπους : Τα κωδικοποιημένα πακέτα τα οποία είναι τα πακέτα εκείνα που έχουν προκύψει από την XOR διαδικασία ,ανάμεσα σε δύο απλά πακέτα, σε ένα κόμβο δρομολόγησης. Ο άλλος τύπος πακέτου δεδομένων είναι το απλό πακέτο το οποίο παραμένει αναλλοίωτο από την στιγμή της παραγωγής του στο επίπεδο εφαρμογής και δεν έχει υποστεί κάποια XOR διαδικασία.

Από την πλευρά των διαδικασιών ,οι οποίες θα εφαρμόζονται στο δίκτυό μας αρκετά συχνά και θα αναλύσουμε και παρακάτω πιο διεξοδικά, μπορούμε να αναφέρουμε την υπαναχώρηση-άρνηση εξυπηρέτησης (service reneging) κατά την οποία ένα η περισσότερα πακέτα απομακρύνονται από την ουρά μετάδοσης στην οποία είχαν μπει. Μία ακόμη είναι η διαδικασία εξυπηρέτησης του πακέτου (packet servicing) όπου εννοούμε όλη την διαδικασία από την στιγμή που το πακέτο φτάνει στο επίπεδο MAC μέχρι την επιτυχή αποστολή του ή την καθολική αποτυχία αποστολής. Τέλος έχουμε την διαδικασία της ομορτοπιστικής κωδικοποίησης η οποία μας δείχνει αν δύο πακέτα μπορούν να κωδικοποιηθούν η όχι.

Τέλος έχουμε κάποιες εκφράσεις οι οποίες σχετίζονται με τον χρόνο. Έτσι λοιπόν ο χρόνος δημιουργίας (g) είναι η χρονική στιγμή που το πακέτο μας παράχθηκε από το επίπεδο εφαρμογής, η χρονική διάρκεια (D) αποτελεί στην ουσία την ποσότητα του χρόνου που τα δεδομένα του πακέτου μας θα είναι χρήσιμα, η απόλυτη χρονική διάρκεια (d) αναφέρεται στην στιγμή μέχρι την οποία τα δεδομένα μας θα είναι χρήσιμα και ωφέλιμα ($d = g + D$). Ο εναπομείναντας χρόνος έχει να κάνει με την ποσότητα του χρόνου η οποία έχει απομείνει μέχρι ότου φτάσουμε τον απόλυτο χρόνο. Ο χρόνος άφιξης στην ουρά έχει να κάνει με την χρονική στιγμή που το πακέτο μας προστίθεται στην ουρά ενώ τέλος ο χρόνος εξυπηρέτησης έχει να κάνει με την ποσότητα του χρόνου η οποία χρειάζεται το MAC επίπεδο για την εξυπηρέτηση του πακέτου και την ενημέρωση των ανώτερων επιπέδων σχετικά με την αποστολή η όχι του πακέτου.

Μοντέλο συστήματος

Το δίκτυό μας



Εικόνα 2 : Το δίκτυο που δημιουργήσαμε

Το μοντέλο που δημιουργήσαμε για την υλοποίηση των πειραμάτων και εξαγωγή των συμπερασμάτων είναι ένα IEEE 802.15.4 το οποίο φαίνεται στην 'εικόνα 2'. Το δίκτυό μας αποτελείται από δύο μικρότερα δίκτυα πέντε κόμβων το καθένα, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω των δύο κόμβων δρομολόγησης (router). Οι τέσσερις από τους πέντε κόμβους των υποδικτύων που αναφέραμε παραπάνω λειτουργούν ως πηγαίοι κόμβοι, δηλαδή παράγουν πληροφορία, και δεν βρίσκονται σε μία αξιόπιστη απόσταση για απευθείας ανταλλαγή μηνυμάτων και για τον λόγο αυτό για την μεταξύ τους επικοινωνία απαιτείται ένας δρομολογητής (router). Οι δύο δρομολογητές των υποδικτύων επικοινωνούν μεταξύ τους σχηματίζοντας έτσι το δίκτυό μας. Για τις ανάγκες των πειραμάτων οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους σε ζευγάρια, οι οποίοι δεν θα ανήκουν στο ίδιο υποδίκτυο και όπως γίνεται αντιληπτό οι κόμβοι πέραν από πηγές λειτουργούν και ως καταβόθρες. Γίνεται επίσης αντιληπτό ότι, όπως έχουμε καθορίσει τα μονοπάτια της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων, είναι απαραίτητη η μετάβαση των πακέτων και από τους δύο δρομολογητές (multi-hop). Έτσι η πολυπλοκότητα δεν αυξάνει πολύ ενώ μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την επίδραση της κωδικοποίησης των πακέτων στην συνολική απόδοση του δικτύου μας.

Στους πηγαίους κόμβους δημιουργούμε δύο ουρές. Την ουρά μετάδοσης και την ουρά αποκωδικοποίησης. Στην ουρά μετάδοσης μπαίνουν όλα εκείνα τα πακέτα τα οποία παράγονται από τον κόμβο και χρειάζεται να αποσταλούν στον

προορισμό τους. Στην ουρά αποκωδικοποίησης κρατούνται τα αντίγραφα των μηνυμάτων που έχουν ήδη αποσταλεί από τον κόμβο. Τα αντίγραφα αυτά τα κρατούμε προκειμένου να είμαστε σε θέση να αποκωδικοποιήσουμε τα κωδικοποιημένα πακέτα και να λάβουμε το περιεχόμενο που σχετίζεται με τον συγκεκριμένο κόμβο. Οι κόμβοι δρομολόγησης έχουν ουρές υποδοχής. Στην ουσία έχουν τόσες ουρές όσες και οι άμεσοι γείτονες τους. Τα δεδομένα που στέλνονται από κάθε γείτονα αποθηκεύονται στην αντίστοιχη ουρά και ο δρομολογητής αναλαμβάνει να το στείλει στον επόμενο γείτονα έως φτάσει στον τελικό προορισμό. Όλες οι ουρές που αναφέραμε παραπάνω υλοποιήθηκαν στο επίπεδο δικτύου ενώ στο επίπεδο MAC του IEEE 802.15.4 δεν υλοποιήθηκε καμία αλλαγή.

Το πρωτόκολλο 802.15.4

Το 802.15.4 MAC/PHY είναι το πιο δημοφιλές πρωτόκολλο για χαμηλού ρυθμού δεδομένων ασυρμάτων PANs (personal area network). Το πρωτόκολλο καθορίζει τέσσερα φυσικά επίπεδα (PHY) εκ των οποίων τα τρία από αυτά βασίζονται σε τεχνικές DSSS (direct sequence spread spectrum). Εμείς στα παραδείγματά μας θα έχουμε ως δεδομένο ότι το DSSS PHY θα λειτουργεί στο εύρος των 2450 MHz και ο ρυθμός δεδομένων (data rate) στα 250 Kbps.

Όσον αφορά το MAC επίπεδο τώρα το πρωτόκολλο 802.15.4 προσφέρει δύο τεχνικές. Μια τεχνική η οποία χρησιμοποιεί beacon και μία η οποία δεν χρησιμοποιεί. Στην τεχνική η οποία χρησιμοποιεί beacons η πρόσβαση στο κανάλι καθορίζεται από τον slotted CSMA/CA αλγόριθμο ενώ η τεχνική που δεν χρησιμοποιεί beacons η πρόσβαση καθορίζεται από τον non-slotted CSMA/CA αλγόριθμο.

Στην υλοποίησή μας εμείς χρησιμοποιούμε χωρίς beacon τεχνική. Η μεταβλητές οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας την χωρίς beacon τεχνική είναι τρεις. Αυτές είναι η macMinBE, η macMaxBE και η macMaxCSMABackoffs. Η λειτουργία του αλγορίθμου είναι η εξής : Όταν ένας κόμβος έχει να στείλει ένα πακέτο ,επιλέγει τυχαία ένα αριθμό n ο οποίος είναι ομοιόμορφα κατανομημένος ανάμεσα στο 0 και $2^{BE} - 1$. Ο αριθμός αυτός υποδηλώνει τον αριθμό των περιόδων backoff (κάθε περίοδος ισούται με 320μs) που θα πρέπει να περιμένει ο κόμβος για να στείλει το πακέτο του. Η μεταβλητή BE στην αρχή είναι ίση με το macMinBE. Όταν λοιπόν ο χρόνος των n περιόδων περάσει ο κόμβος ελέγχει κατά πόσο το κανάλι είναι ελεύθερο ή χρησιμοποιείται. Εάν το κανάλι είναι ελεύθερο τότε ο κόμβος ξεκινά την διαδικασία αποστολής του

μηνύματος. Στην περίπτωση όμως που το κανάλι είναι δεσμευμένο η μεταβλητή BE θα αυξηθεί κατά ένα εκτός και αν έχει φτάσει την τιμή της μεταβλητής macMaxBE όπου σε αυτή την περίπτωση θα παραμείνει η ίδια. Όλη η διαδικασία επιλογής αριθμού n , προκειμένου όταν περάσουν οι περίοδοι backoff ο κόμβος να κάνει εκ νέου απόπειρα να αποστείλει το πακέτο του, θα επαναληφθεί. Ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων της διαδικασίας καθορίζεται και είναι ίσος με την μεταβλητή macMaxCSMABackoffs. Αν λοιπόν ο κόμβος μας προσπαθήσει να στείλει το πακέτο macMaxCSMABackoffs φορές και δεν τα καταφέρει, γιατί έβρισκε το μέσο πάντοτε καταλυμένο, θα αναφέρει αποτυχία αποστολής στο αμέσως πιο πάνω επίπεδο (network layer). Σε αντίθετη περίπτωση θα αναφέρει επιτυχία αποστολής.

Με βάση τα παραπάνω που περιγράψαμε, σχετικά με τον τρόπο αποστολής των μηνυμάτων, γίνεται κατανοητό ότι ο χρόνος εξυπηρέτησης ενός μηνύματος δεν είναι σταθερός, αλλά ποικίλει. Όσο περισσότερο φορτωμένο είναι το μέσο, η πιθανότητα επιλογής ενός αριθμού backoff όπου μετά από το πέρας τους το μέσο θα είναι ελεύθερο γίνεται όλο και μικρότερη. Έτσι η διαδικασία θα επαναληφθεί, επιδρώντας έτσι στον χρόνο εξυπηρέτησης του πακέτου και συγκεκριμένα αυξάνοντάς τον.

Κωδικοποίηση, χρονοδρομολόγηση και μηχανισμοί προσπέλασης

Χρησιμοποιήθηκαν τρεις μηχανισμοί οι οποίοι δημιουργήθηκαν πάνω από το 802.15.4 MAC επίπεδο και περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι στενά συνδεδεμένοι μεταξύ τους σε σχέση με την λειτουργικότητα και την επιρροή τους στην απόδοση.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω σε αυτή την εργασία θεωρούμε ότι τα νέα πακέτα καθώς και οι χρονικοί περιορισμοί που σχετίζονται με αυτά παράγονται και καθορίζονται από τους πηγαίους κόμβους στο επίπεδο εφαρμογής. Το νέο πακέτο το οποίο δημιουργείται προωθείται στο επίπεδο δικτύου και αμέσως μετά θα πρέπει να προστεθεί στην αντίστοιχη ουρά μεταφοράς. Εάν η ουρά είναι γεμάτη τότε το πακέτο απορρίπτεται αφού για τα νέα πακέτα ακολουθείται η drop-tail πολιτική. Στην αντίθετη περίπτωση η ουρά δεν θα είναι γεμάτη και επομένως το πακέτο προστίθεται κανονικά στην ουρά. Η ίδια πολιτική, σχετικά με το αν θα μπει ή όχι ένα πακέτο στην ουρά προώθησης, ακολουθείται και στους router κόμβους.

Κωδικοποίηση πακέτων

Η τεχνική της κωδικοποίησης, εάν είναι ενεργοποιημένη, θα γίνεται όπως αναφέραμε προηγούμενα σε ένα router κόμβο, όταν και οι δύο ουρές υποδοχής οι οποίες ανήκουν τους κόμβους που έχουμε ορίσει να ανταλλάσσουν μεταξύ τους μηνύματα δεν είναι άδειες και το MAC επίπεδο είναι έτοιμο να στείλει ένα πακέτο. Τα ωφέλιμα φορτία των πακέτων των δύο ουρών εκτελούν την πράξη της αλγεβρικής κωδικοποίησης (XOR) και έτσι έχουμε ένα νέο κωδικοποιημένο πακέτο. Οι αριθμοί ακολουθίας (sequence numbers) καθώς και τα αναγνωριστικά των πηγαίων κόμβων των μηνυμάτων προστίθενται στο κωδικοποιημένο πακέτο γεγονός που αυξάνει το μέγεθος του πακέτου, μια επιβάρυνση της τάξεως των τεσσάρων bytes.

Παρόμοια με το Sliding window protocol και εδώ υποθέτουμε περιοδική επαναχρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους των αριθμών ακολουθίας. Η όλη αυτή διαδικασία που περιγράψαμε θα συμβεί μόνο στην περίπτωση που έχουμε πακέτα στις ουρές υποδοχής για κόμβους οι οποίοι επικοινωνούν και ανταλλάσσουν μηνύματα μεταξύ τους. Από αυτή την οπτική η κωδικοποίηση μηνυμάτων είναι ευκαιριακή καθώς εκμεταλλευόμαστε το γεγονός της τυχαίας παρουσίας δύο μηνυμάτων στον router κόμβο που πληρούν τις προϋποθέσεις τις οποίες αναφέραμε πριν. Στην περίπτωση που δεν μπορούμε να κωδικοποιήσουμε δύο μηνύματα η διαδικασία συνεχίζεται προωθώντας ένα απλό μη κωδικοποιημένο μήνυμα.

Το ποιο μήνυμα θα αποσταλεί το καθορίζουμε παρακάτω. Όταν τώρα ένα κωδικοποιημένο μήνυμα ληφθεί από ένα πηγαίο κόμβο, ο κόμβος θα πρέπει να εξετάσει εάν όντως είναι ο σωστός παραλήπτης για το συγκεκριμένο πακέτο. Επίσης θα πρέπει να ψάξει και να βρει στην ουρά αποκωδικοποίησης τον αριθμό ακολουθίας του πακέτου που αυτός έστειλε στον router κόμβο. Αυτές οι πληροφορίες περιέχονται στα τέσσερα bytes που προσθέσαμε στο κωδικοποιημένο πακέτο. Εάν ο κόμβος βρει στην ουρά αποκωδικοποίησης το συγκεκριμένο πακέτο, θα εκτελέσει και αυτός με την σειρά του μια πράξη XOR μεταξύ των ωφέλιμων φορτίων του κωδικοποιημένου πακέτου και του αντιγράφου του πακέτου που βρήκε στην ουρά αποκωδικοποίησης, ώστε να δει το άλλο μήνυμα που προορίζεται για αυτόν. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιο αντίγραφο στην ουρά αποκωδικοποίησης ή το δεν είναι ένας από τους δύο παραλήπτες του πακέτου η διαδικασία αποτυγχάνει και το πακέτο θεωρείται χαμένο.

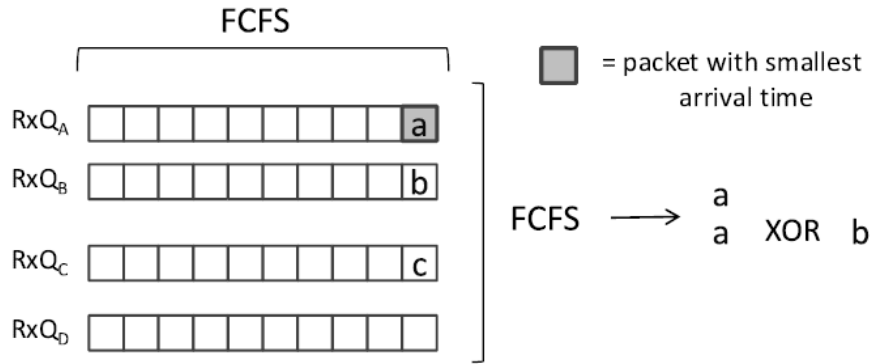
Χρονοπρογραμματισμός και διαχείριση ουράς

Τα πακέτα στις ουρές μεταφοράς στους πηγαίους κόμβους εξυπηρετούνται με την FCFS (First Come First Served) πολιτική χρονοδρομολόγησης. Με βάση αυτή την τεχνική το πακέτο το οποίο θα προωθηθεί στο MAC επίπεδο για εξυπηρέτηση θα είναι εκείνο που σε σχέση με όλα τα άλλα μηνύματα της ουράς έχει το μικρότερο χρόνο εισαγωγής στην ουρά.

Η διαδικασία που ακολουθείται στους router κόμβους είναι πιο πολύπλοκη σε σχέση με αυτή των πηγαίων κόμβων πράγμα λογικό αν αναλογιστούμε ότι στους router κόμβους δεν έχουμε μόνο μία ουρά όπως στους πηγαίους αλλά τόσες όσες και οι άμμεσοι γείτονες του κόμβου. Έτσι λοιπόν έχουμε ένα συνδυασμό πολιτικών οι οποίες εφαρμόζονται. Αρχικά σε κάθε ουρά υποδοχής εφαρμόζεται η πολιτική της οριζόντιας FCFS προκειμένου τα μηνύματα τα οποία υπάρχουν σε κάθε ουρά να είναι διατεταγμένα με βάση τον χρόνο εισαγωγής τους στην ουρά σε αύξουσα διάταξη. Από εκεί και πέρα η πολιτική της κάθετης FCFS καθορίζει ποια από όλες τις ουρές ή στην περίπτωση που η κωδικοποίηση είναι ενεργοποιημένη ποιο ζευγάρι ουρών θα είναι εκείνο που θα εξυπηρετηθεί.

Η επιλογή του ζευγαριού των ουρών δεν γίνεται με βάση των συνδυασμό των χρόνων εισαγωγής και από της δύο ουρές αλλά με βάση τον μικρότερο χρόνο εισαγωγής σε οποιαδήποτε ουρά. Εάν δεν υπάρχει πιθανότητα κωδικοποίησης τότε το μήνυμα της ουράς περνά στο MAC επίπεδο για εξυπηρέτηση μόνο του. Όλα όσα περιγράψαμε παραπάνω φαίνονται στην εικόνα παρακάτω 'εικόνα 3'.

Για να έχουμε και μία εικόνα σχετικά με το ποια είναι η επίδραση στην απόδοση του συστήματος μας, όταν τα πακέτα συνδέονται με κάποιους χρονικούς περιορισμούς οι οποίοι πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου τα δεδομένα που μεταφέρουν να μην είναι παλιά, εισάγουμε στους router κόμβους μια EDF (Earliest Deadline First) πολιτική. Και αυτή η πολιτική όπως και η FCFS θα είναι συνδυασμός οριζόντιας και κάθετης.



Εικόνα 3: Ο δύο διαστάσεων χρονοπρογραμματισμός στους router κόμβους

Όλα όσα αναφέραμε παραπάνω σχετικά με τους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού, κωδικοποίησης αλλά και οι ουρές που θα χρησιμοποιήσουμε υλοποιούνται στο επίπεδο δικτύου και όχι στο MAC. Τα πακέτα περνάνε μία φορά από το MAC επίπεδο σε κάθε κόμβο και από εκεί και πέρα όλες οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν για το πακέτο, σχετικά με το αν θα πρέπει να συνεχίσει να εξυπηρετείται η όχι, καθορίζεται από το επίπεδο δικτύου.

Όπως έχουμε αναφέρει, ο πηγαίος κόμβος κρατά αντίγραφα των πακέτων που στέλνει στην ουρά αποκωδικοποίησης του. Το αντίγραφο αφαιρείται από την ουρά αποκωδικοποίησης όταν ο κόμβος ακούσει ότι ο router κόμβος προώθησε το αντίστοιχο μήνυμα είτε μόνο του είτε κωδικοποιημένο. Το ίδιο συμβαίνει όταν ακούσει ένα μήνυμα με μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας να προωθείται (στην περίπτωση της FCFS πολιτικής του router) και όταν ακούσει να προωθείται μήνυμα με μεγαλύτερο αριθμό ακολουθίας και μεγαλύτερη απόλυτη χρονική διάρκεια (στην περίπτωση της EDF πολιτικής του router). Τέλος στην περίπτωση που η ουρά αποκωδικοποίησης ενός πηγαίου κόμβου είναι γεμάτη ακολουθείται η Drop-Tail πολιτική με αποτέλεσμα να απορρίπτεται ένα αντίγραφο και να μην αποθηκεύεται. Όταν συμβεί κάτι τέτοιο το μήνυμα που προωθείται στον router κόμβο σημαδεύεται (flagged) έτσι ώστε να γνωρίζει ο router κόμβος να μην μπει σε διαδικασία να το κωδικοποιήσει μιας και ο πηγαίος κόμβος δε θα μπορεί μετά να το αποκωδικοποιήσει και θα έχουμε μια σίγουρη αποτυχία.

Παράκαμψη πακέτων

Η παράκαμψη πακέτου είναι μια διαδικασία άρνησης εξυπηρέτησης σε κάποια πακέτα τα οποία είναι ήδη σε μια ουρά μεταφοράς. Η διαδικασία αυτή, όταν είναι ενεργοποιημένη, κατά την άφιξη νέων μηνυμάτων στην ουρά καθαρίζει την ουρά από κάποια πακέτα προκειμένου να υπάρχει δυνητικά χώρος για αποθήκευση πακέτων που έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να φτάσουν στον προορισμό τους πριν εκπνεύσει η διορία τους. Γενικά η διαδικασία αυτή εκτελείται πριν από κάποια κωδικοποίηση η γενικά πριν οποιαδήποτε προώθηση ενός μηνύματος στο MAC επίπεδο με σκοπό την αποφυγή κωδικοποίησης και γενικά εξυπηρέτησης πακέτων των οποίων η διορία για αποστολή στον τελικό προορισμό έχει περάσει ή είναι σχετικά απίθανο να καταφέρει το μήνυμα να είναι σε έγκυρο χρόνο στον προορισμό του.

Για να αποφασίσουμε κατά πόσο θα προβούμε σε παράκαμψη πακέτου ή όχι, χρησιμοποιούμε μία εκτίμηση για τον χρόνο εξυπηρέτησης στο MAC επίπεδο. Την εκτίμηση την χρησιμοποιούμε γιατί όπως εξηγήσαμε παραπάνω ο χρόνος εξυπηρέτησης δεν είναι ποτέ ίδιος αλλά ποικίλει. Για να βγάλουμε την εκτίμησή μας χρησιμοποιούμε το μέσο όρο των χρόνων εξυπηρέτησης των τελευταίων δέκα πακέτων. Επειδή όμως έτσι όπως έχουμε ορίσει το δίκτυό μας απαιτούνται τουλάχιστον τρεις μεταβάσεις πολλαπλασιάζουμε αυτόν το χρόνο επί τρία. Έτσι λοιπόν βασιζόμαστε σε μία μάλλον αισιόδοξη εκτίμηση σχετικά με τον χρόνο αναμονής στην ουρά του router κόμβου συν τον χρόνο εξυπηρέτησης στο MAC επίπεδο.

Για να βρούμε τα πακέτα που πρέπει να αποχώρισουν από τις ουρές μας ουσιαστικά αυτό που κάνουμε είναι να συγκρίνουμε την εκτίμηση που έχουμε υπολογίσει με τον εναπομείναντα χρόνο κάθε πακέτου μέχρι την διορία που του έχει δοθεί από το επίπεδο εφαρμογής στον πηγαίο κόμβο. Αν η εκτίμηση μας είναι μεγαλύτερη από τον χρόνο αυτό τότε το πακέτο αποβάλεται από την ουρά αφού κατά πάσα πιθανότητα δεν θα καταφέρει να φτάσει στον προορισμό του εγκαίρως. Αν είναι μικρότερη τότε το μήνυμα παραμένει κανονικά στην ουρά. Κατανοούμε λοιπόν ότι αποφεύγοντας να εξυπηρετήσουμε πακέτα τα οποία σχεδόν σίγουρα δεν θα καταφέρουν να φτάσουν εγκαίρως, αυξάνουμε την πιθανότητα έγκυρης άφιξης στα υπόλοιπα μηνύματα γεγονός που βελτιώνει την απόδοση του συστήματός μας.

Πειραματικά Αποτελέσματα

Παράμετροι προσομοίωσης

Για να λάβουμε τα διάφορα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση του δικτύου μας, προσομοιώσαμε το δίκτυό μας γύρω από το OMNet++ [], έναν από τους κορυφαίους προσομοιωτές για μοντέλα ασύρματης διάδοσης, ενώ το MAC πρωτόκολλο που χρησιμοποιούμε είναι, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, το 802.15.4 και συγκεκριμένα η χωρίς beacon τεχνική. Το MAC επίπεδο χαρακτηρίζεται από τους εξής αριθμούς: $macMinBE = 3$, $macMaxBE = 5$, $macMaxCSMABackoffs = 4$ οι οποίοι είναι οι ήδη προεπιλεγμένοι αριθμοί από το πρωτόκολλο.

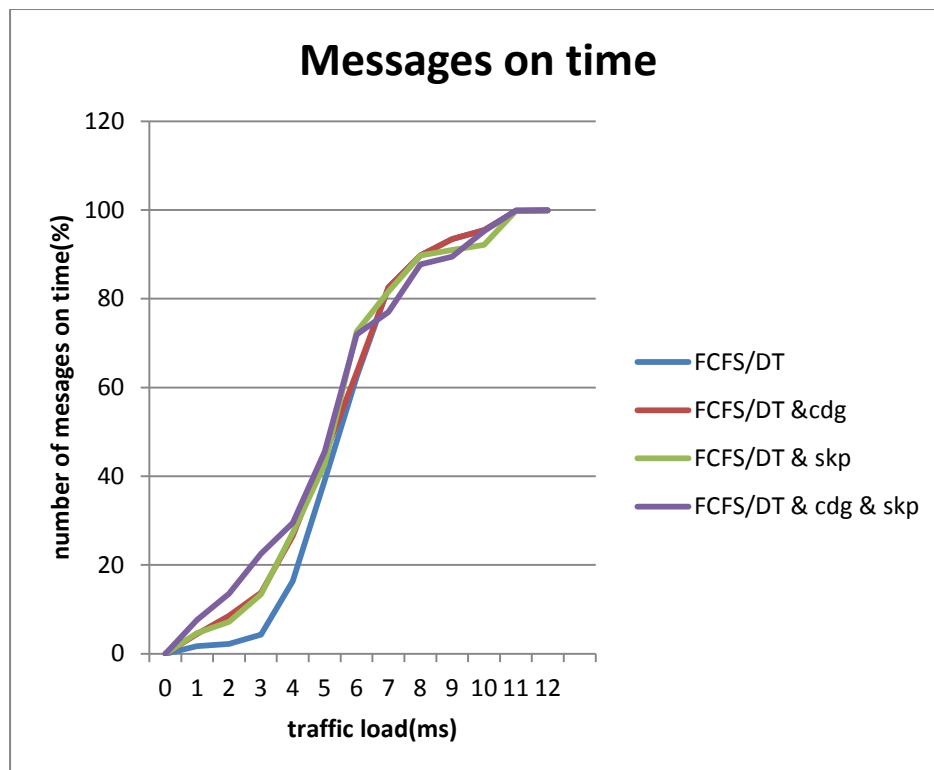
Το δίκτυό μας αποτελείται από δέκα κόμβους εκ των οποίων οι οχτώ είναι πηγαίοι, καθώς από αυτούς παράγονται τα μηνύματα, και οι άλλοι δύο αποτελούν κόμβους δρομολόγησης για το δίκτυό μας και δεν παράγουν μηνύματα παρά μόνο προωθούν αυτά των πηγαίων προκειμένου να φτάσουν στον τελικό τους προορισμό. Η επικοινωνία καθορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να απαιτούνται τρεις μεταδόσεις, για να φτάσει ένα μήνυμα στον τελικό προορισμό.

Εμείς για τα πειράματά μας καθορίσαμε δύο τέτοιες ροές, μία μεταξύ του A και του F (πρώτη ροή) και μία μεταξύ του B και του G (δεύτερη ροή). Το μέγεθος των ουρών μεταφοράς των πηγαίων κόμβων είναι ίσο με δέκα πακέτα όπως και το μέγεθος των ουρών αναμετάδοσης στους κόμβους δρομολόγησης. Τέλος το μέγεθος των ουρών αποκωδικοποίησης ισούται με είκοσι πακέτα.

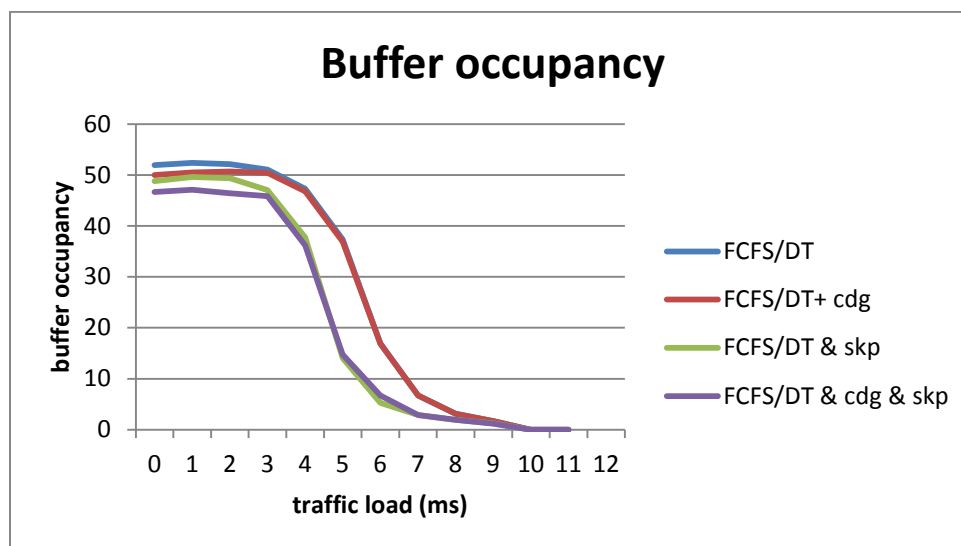
Οι πηγαίοι κόμβοι παράγουν πακέτα ακολουθώντας ένα εκθετικά κατανομημένο τρόπο παραγωγής με μέση τιμή τ . Όπως είναι λογικό όσο πιο μικρό το τ τόσο πιο γρήγορος θα είναι ο ρυθμός παραγωγής των μηνυμάτων άρα το δίκτυο μας θα είναι περισσότερο φορτωμένο. Κάθε κόμβος παράγει 2000 μηνύματα συνολικά. Επίσης όσον αφορά την τιμή του τ αυτή στις διάφορες προσομοιώσεις που κάνουμε ποικίλει έτσι ώστε να έχουμε μια πλήρη γνώση της συμπεριφοράς και της απόδοσης του συστήματός μας κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτου. Όπως αναφέραμε πριν τα μηνύματα πρέπει να μεταδοθούν τρεις φορές μέχρι να φτάσουν στον τελικό προορισμό (για παράδειγμα A-R-N-F).

Τα απλά πακέτα έχουν μέγεθος πλαισίου 60 bytes ενώ τα κωδικοποιημένα έχουν μέγεθος 64 bytes. Κάθε πακέτο το οποίο παράγεται είναι συνδεδεμένο και με μία χρονική διάρκεια (deadline) όπου τα δεδομένα μας είναι χρήσιμα ενώ μετά το πέρας του χρόνου αυτού δεν έχουν καμία χρησιμότητα. Όπως γίνεται κατανοητό εάν στον χρόνο παραγωγής του μηνυματός μας

προσθέσουμε τον χρονική διάρκεια την οποία έχει το κάθε πακέτο τότε θα γνωρίζουμε την χρονική στιγμή μέχρι την οποία υπάρχει περιθώριο να σταλεί το μήνυμά μας και να είναι και χρήσιμο. Στην προσομοίωσή μας τα deadlines των πακέτων ακολουθούν μια ομοιόμορφη κατανομή με μέσο όρο τα 55ms και εύρος τα 90ms, λαμβάνουν τιμές δηλαδή από 10 έως 100 ms. Στην δεύτερη φάση των πειραμάτων μας η χρονική διάρκεια των πακέτων μας ποικίλει για να δούμε την επίδραση την οποία αυτές οι αλλαγές έχουμε στην απόδοση του συστήματός μας όταν οι τεχνικές της κωδικοποίησης και της παράκαμψης πακέτου είναι ενεργοποιημένες. Σε όλες τις εικόνες που υπάρχουν από εδώ και κάτω το FCFS/DT αναφέρεται στον απλό μηχανισμό (First Come First Served με πολιτική Drop Tail). Το ακρωνύμιο Cdg αναφέρεται στην κωδικοποίηση του δικτύου ενώ το Skp αναφέρεται στην παράκαμψη του πακέτου . Έτσι έχουμε τέσσερις μηχανισμούς τους οποίους μπορούμε να συγκρίνουμε. Τον βασικό μηχανισμό (FCFS/DT), τον βασικό μηχανισμό σε συνδυασμό με την κωδικοποίηση δικτύου (FCFS/DT + Cdg), τον βασικό μηχανισμό σε συνδυασμό με την παράκαμψη πακέτου (FCFS/DT + Skp) και τέλος τον συνδυασμό των δύο τεχνικών (FCFS/DT + Cdg + Skp).



Εικόνα 4 : Απόδοση των τεσσάρων τεχνικών με βάση τον αριθμό των μηνυμάτων που φτάνουν έγκαιρα στον προορισμό τους



Εικόνα 5 : Μέσος όρος μεγέθους του συνόλου των ουρών των δύο core κόμβων μας συναρτήσει του φόρτου του δικτύου μας για τις τέσσερις διαφορετικές τεχνικές που εφαρμόζουμε

Περίπτωση πρώτη : Σταθερός μέσος χρόνος διορίας (deadline)

Στο κομμάτι αυτό η διορία ,που όπως αναφέραμε πιο πάνω συνοδεύει το κάθε πακέτο το οποίο παράγεται από τους edge κόμβους, κατανέμεται ομοιόμορφα από 10 έως 100ms. Η 'εικόνα 4' παρουσιάζει για όλους τους μηχανισμούς , ως συνάρτηση του τ , το ποσοστό των πακέτων που καταφέρνουν να φτάσουν εγκαίρως στον τελικό τους προορισμό σε σχέση με το σύνολο των πακέτων που παράγονται στο δίκτυό μας. Η 'εικόνα 5' παρουσιάζει το επίπεδο χρησιμότητας των ουρών στους core κόμβους σε συνάρτηση πάλι με το τ . Στο διάγραμμα φαίνεται η συνολική χρησιμότητα των ουρών μεταφοράς και από τις δύο τις ροές και από τους δύο core κόμβους. Όπως αναφέραμε και παραπάνω όσο μικρότερο το τ τόσο μεγαλύτερος ο φόρτος του δικτύου μας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η απόδοση ,όσον αφορά την επικαιρότητα των μηνυμάτων, στον απλό μηχανισμό FCFS/DT είναι η χειρότερη από τους τέσσερις μηχανισμούς που συγκρίνουμε κυρίως σε συνθήκες υψηλού φόρτου. Όσο το r μεγαλώνει όπως είναι λογικό ο αριθμός των μηνυμάτων που φτάνουν εγκαίρως στον προορισμό τους μεγαλώνει και όταν πλέον μεγαλώνει αρκετά και οι τέσσερις μηχανισμοί έχουν παρόμοια απόδοση πράγμα αναμενόμενο καθώς ο

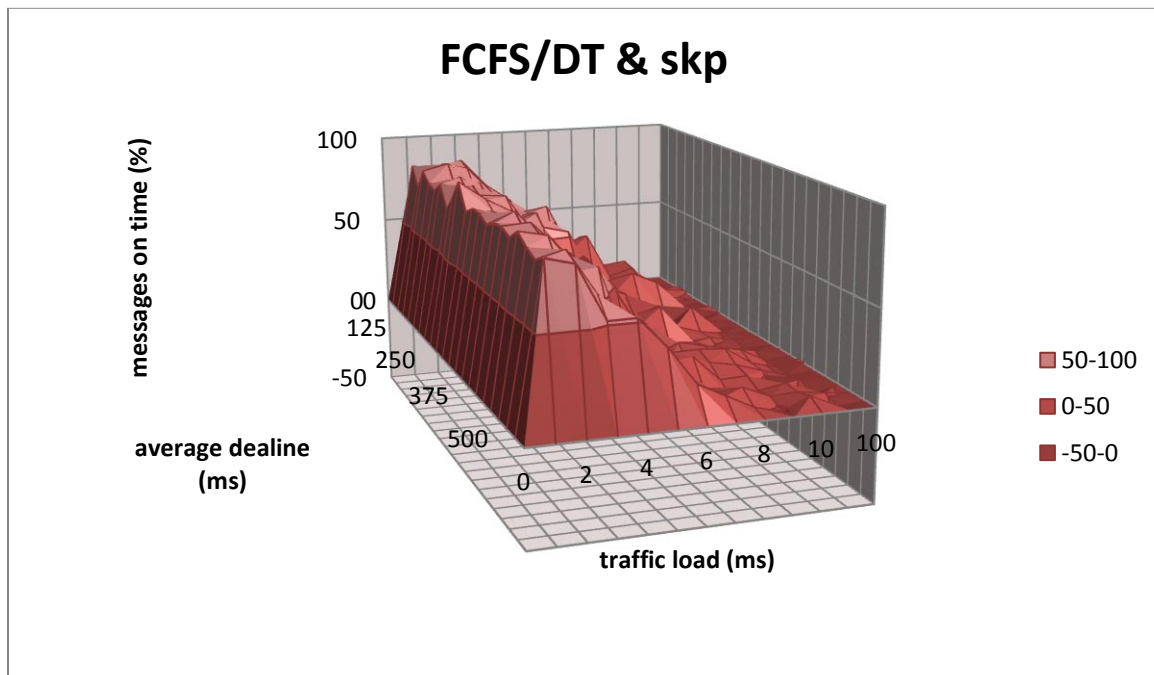
φόρτος δικτύου είναι μικρός και οι αναμονές στις ουρές σχεδόν μηδαμινές.

Εφαρμόζοντας την τεχνική της κωδικοποίησης παρατηρείται κάποιο κέρδος σε σχέση με τον απλό μηχανισμό του FCFS/DT. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί καθώς όταν εκτελούμε την πράξη XOR στα πακέτα και εξυπηρετούμε ταυτόχρονα δύο, η κωδικοποίηση δικτύου μειώνει θεωρητικά το ποσό και το ποσοστό χρησιμοποίησης των ουρών μας. Αυτό το θεωρητικό φαίνεται και στην 'εικόνα 5'. Η μείωση αυτή στη χρησιμότητα των ουρών έχει ως αποτέλεσμα να μειώνει τον αριθμό των πακέτων τα οποία δεν θα έμπαιναν καν στις ουρές των core κόμβων γιατί θα τις έβρισκαν γεμάτες και η droptail πολιτική θα αρνούνταν την εξυπηρέτησή τους. Επιπλέον η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση δύο πακέτων έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται και ο χρόνος αναμονής των πακέτων στις ουρές πριν αυτά κατεβούν στο MAC επίπεδο για να εξυπηρετηθούν.

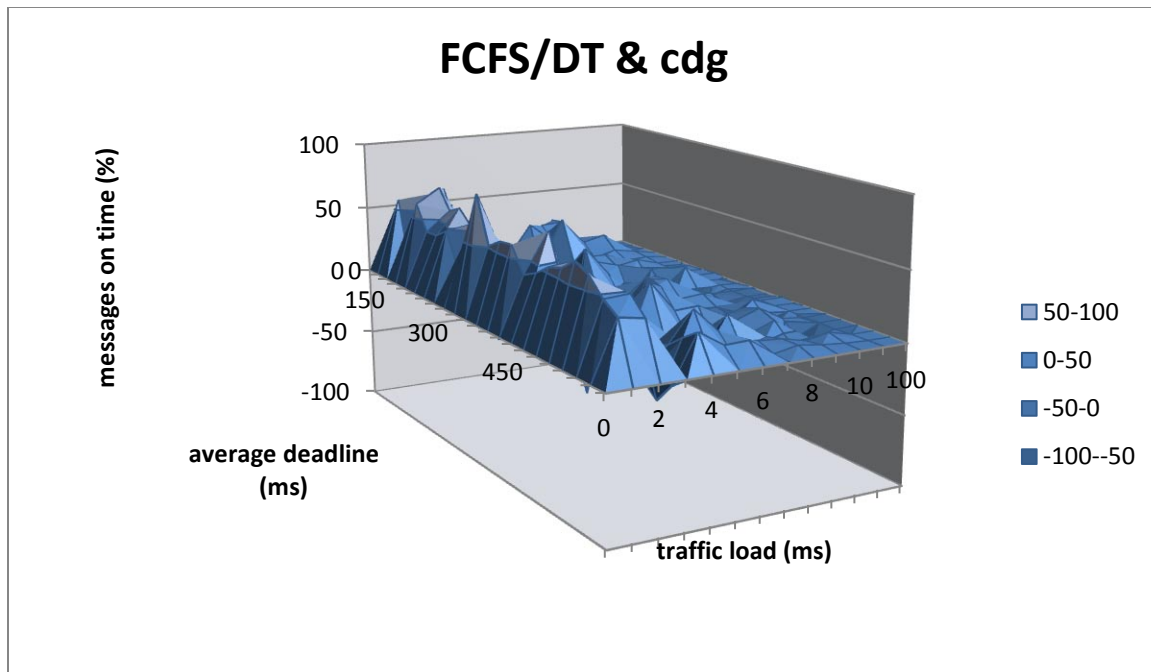
Το κέρδος το οποίο αναφέραμε παραπάνω για μικρές τιμές του τ είναι μηδαμινό. Οι λόγοι για τον οποίο αυτό συμβαίνει είναι δύο : Πρώτον, όταν τα πακέτα παράγονται με γρήγορο ρυθμό οι edge κόμβοι δεν προλαβαίνουν να τα εξυπηρετήσουν όλα και μέσω της droptail πολιτικής πολλά από αυτά απορρίπτονται (οι ουρές είναι σχεδόν γεμάτες) και ακόμα και μην απορριφθούν θα πρέπει να περιμένουν πολύ χρόνο μέχρι να εξυπηρετηθούν. Δεύτερον λόγω του υψηλού ρυθμού παραγωγής μηνυμάτων, οι ουρές αποκωδικοποίησης γεμίζουν και αυτές γεγονός που σημαίνει ότι πολλά μηνύματα θα σημαδεύονται ως μη κατάλληλα για κωδικοποίηση μειώνοντας έτσι την ικανότητα των core κόμβων να κωδικοποιούν μηνύματα ,γεγονός που επιδρά και στη χρησιμότητα των ουρών

Η παράκαμψη πακέτου παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από τις προαναφερθείσες τεχνικές. Η τεχνική αυτή εκ των προτέρων αρνείται την εξυπηρέτηση πακέτων τα οποία κατά πάσα πιθανότητα δεν θα καταφέρουν να φτάσουν στο προορισμό τους , ανοίγοντας έτσι το δρόμο για εξυπηρέτηση πακέτων με πιο χαλαρές απαιτήσεις και επομένως μεγαλύτερη πιθανότητα να φτάσουν εγκαίρως στον προορισμό τους. Αντίθετα τόσο ο μηχανισμός του FCFS/DT όσο και ο FCFS/DT +cdg προσπαθούν να εξυπηρετήσουν όλα τα πακέτα που φτάνουν στην ουρά τους ακόμα και αν έχει περάσει ο χρόνος της έγκαιρης παράδοσης τους. Πέραν αυτού όταν καταναλώνονται πόροι του συστήματος για εξυπηρέτηση πακέτων που πιθανότατα δεν θα φτάσουν στον προορισμό τους εντός χρόνου, αυξάνεται η πιθανότητα κάποια άλλα πακέτα να απορριφθούν γιατί βρίσκουν τις ουρές γεμάτες ενώ ακόμα και αν δεν απορριφθούν ο χρόνος εξυπηρέτησης τους θα αυξηθεί με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η πιθανότητα μη έγκαιρης παράδοσης στον προορισμό τους. Αυτό που αναφέραμε παραπάνω φαίνεται και στην 'εικόνα 5' καθώς βλέπουμε ότι μειώνεται και το ποσοστό χρησιμότητας των ουρών τόσο στους core όσο και στους edge κόμβους.

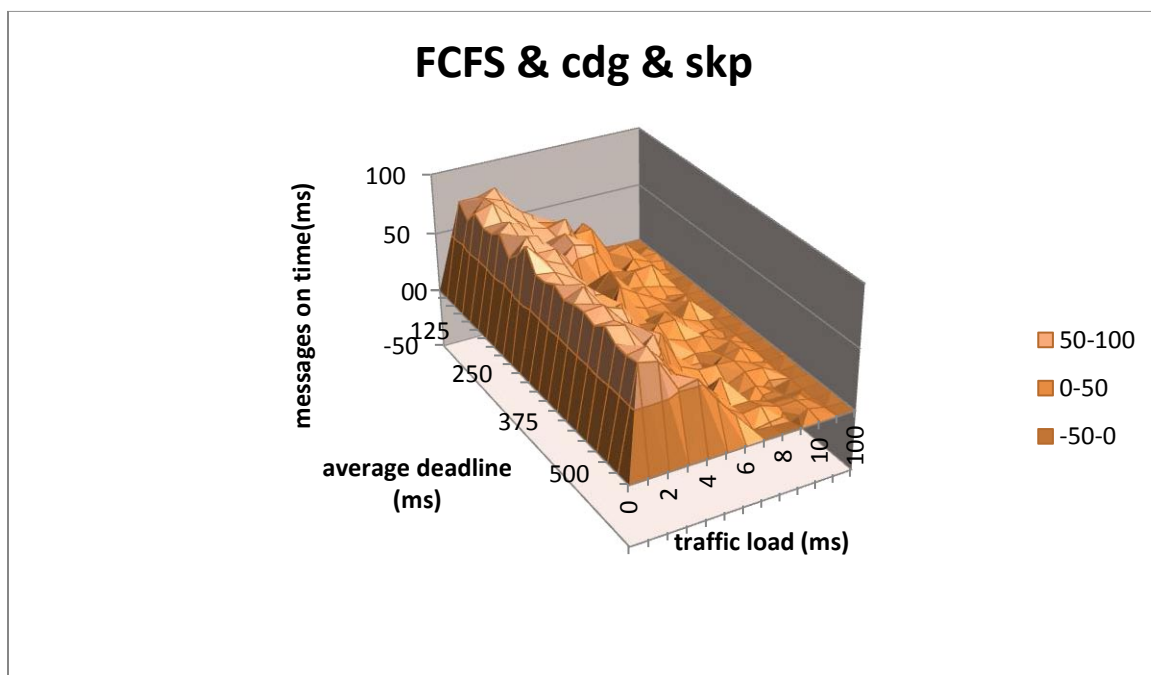
Η τελευταία τεχνική συνδυάζει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση δύο πακέτων καθώς και την ικανότητα άρνησης εξυπηρέτησης πακέτων που πιθανότατα οι χρονικοί τους περιορισμοί όσον αφορά την άφιξη στον τελικό τους προορισμό δεν θα ικανοποιηθούν. Ο συνδυασμός αυτός έχει τα καλύτερα αποτελέσματα από όλες τις τεχνικές, καθώς οι δύο τεχνικές αυτές έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνεται το μέγεθος των ουρών εξυπηρέτησης καθώς και να μειώνεται ο χρόνος εξυπηρέτησης. Αυτό φαίνεται και από τις εικόνες. Αξίζει να αναφερθεί επιπλέον ότι η τεχνική αυτή ενώ καταφέρνει το μεγαλύτερο ποσοστό σε αριθμό μηνυμάτων πετυχαίνει επίσης το μικρότερο μεταφερόμενων μηνυμάτων, γεγονός που υποδηλώνει και μικρότερο φορτίο μεταφοράς.



Εικόνα 6 : Σύγκριση της τεχνικής FCFS/DT & skp με την απλή τεχνική FCFS/DT



Εικόνα 7: Σύγκριση της τεχνικής FCFS/DT & cdg με την απλή τεχνική FCFS/DT



Εικόνα 8: Σύγκριση της τεχνικής FCFS/DT & cdg & skp με την απλή τεχνική FCFS/DT

Περίπτωση δεύτερη: Ποικίλες χρονικές διορίες και ρυθμοί άφιξης πακέτων

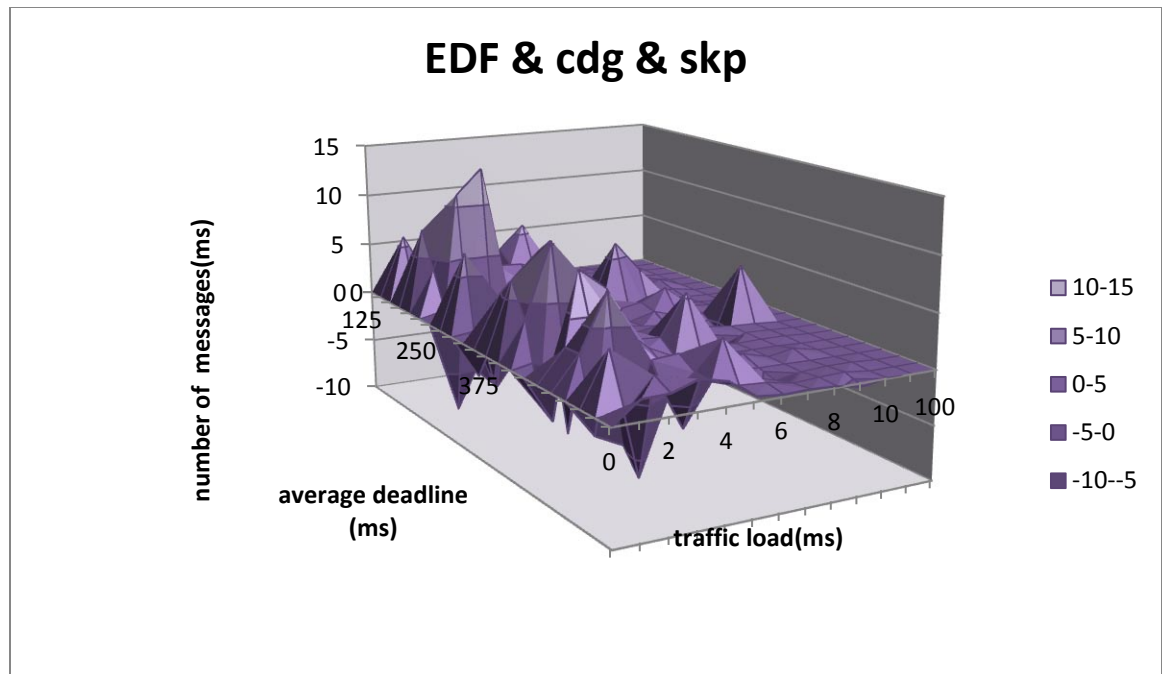
Σε αυτό το σημείο ερευνούμε και συγκρίνουμε την απόδοση πραγματικού χρόνου που έχουν οι μηχανισμοί της κωδικοποίησης, της παράκαμψης πακέτου και ο συνδυασμός αυτών σε σχέση με την απλή FCFS/DT πολιτική, με τα χρονικά περιθώρια για την άφιξη των πακέτων πλέον να ποικίλουν από τα 55ms έως τα 605ms με κάθε βήμα να διαφέρει από το προηγούμενο κατά 25ms, αντί να κατανέμονται ομοιόμορφα όπως πριν. Όπως και πριν στα πειραματικά μας αποτελέσματα ο ρυθμός παραγωγής μηνυμάτων στους edge κόμβους ποικίλει έτσι ώστε να προσομοιώνουμε διάφορες συνθήκες φόρτου για το δίκτυό μας. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης του κάθε μηχανισμού με τον απλό παρουσιάζονται στις εικόνες 6-8. Στα διαγράμματα παρουσιάζεται η επί τις εκατό αύξηση ή μείωση στον αριθμό των πακέτων που φτάνουν έγκαιρα στον προορισμό τους για τους διάφορους συνδυασμούς ρυθμούς παραγωγής μηνυμάτων και διορίας άφιξης των πακέτων στον τελικό προορισμό τους.

Στην 'εικόνα 7' φαίνεται η επίδραση της τεχνικής παράκαμψης πακέτου στα διάφορα σενάρια εκτέλεσης που αναφέραμε παραπάνω. Αρχικά παρατηρείται ένα ξεκάθαρο κέρδος της τεχνικής αυτής για συνθήκες μεγάλου φόρτου στο δίκτυό μας το οποίο αγγίζει το 80% όταν η διορία άφιξης στον τελικό προορισμό είναι μικρή και μειώνεται όσο μεγαλώνει η διορία αυτή. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν αναλογιστούμε ότι απλός μηχανισμός προσπαθεί να αποστείλει όλα τα πακέτα τα οποία φτάνουν και καταφέρνουν να μπουν στην ουρά των router κόμβων ενώ η τεχνική της παράκαμψης αρνείται την εξυπηρέτηση πακέτων με μικρές πιθανότητες έγκαιρης άφιξης και δίνοντας έμφαση στην εξυπηρέτηση πακέτων με μεγαλύτερες πιθανότητες. Από εκεί και πέρα όσο μεγαλώνει η διορία άφιξης των πακέτων ο απλός μηχανισμός καταφέρει να στείλει εγκαίρως περισσότερα πακέτα και για αυτό παρατηρούμε την μείωση αυτή στο κέρδος. Όσο ο ρυθμός παραγωγής πακέτων μειώνεται παρατηρούμε ότι το κέρδος του μηχανισμού παράκαμψης πακέτων μειώνεται και η μείωση αυτή μεγαλώνει ακόμα περισσότερο όταν οι διορίες άφιξης για τα πακέτα μας είναι πιο χαλαρές. Όπως είναι λογικό το κέρδος της τεχνικής μας εξανεμίζεται όταν το r γίνεται μεγάλο καθώς πλέον και ο απλός μηχανισμός έχει την ικανότητα έγκαιρης παράδοσης των παραγόμενων μηνυμάτων στον τελικό τους προορισμό.

Η τεχνική της κωδικοποίησης και η σύγκριση της με τον απλό μηχανισμό φαίνεται στην 'εικόνα 6'. Σε σύγκριση με την απόδοση της παράκαμψης πακέτου μπορούμε να πούμε ότι το κέρδος της κωδικοποίησης δεν φτάνει την τάξη μεγέθους της παράκαμψης αυτό όμως που παρατηρούμε είναι ότι το όποιο

κέρδος δεν επηρεάζεται τόσο πολύ από την διορία που έχουν τα πακέτα προκειμένου να φτάσουν στον τελικό τους προορισμό. Αυτό γίνεται γιατί η τεχνική της κωδικοποίησης προσφέρει το πλεονέκτημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης δύο πακέτων στον router κόμβο γεγονός που μειώνει τον αριθμό των πακέτων που βρίσκονται στις ουρές του ανεξαρτήτως τις διορίας με την οποία σχετίζονται τα πακέτα. Επίσης το μέγεθος του κέρδους της κωδικοποίησης παραμένει μικρό όταν ο ρυθμός παραγωγής μηνυμάτων από τους πηγαίους κόμβους είναι μεγάλος και αυτό γιατί η τεχνική αυτή αναλώνεται στην εξυπηρέτηση όλων των μηνυμάτων που υπάρχουν στις ουρές γεγονός που ενδέχεται να είναι μάταιο καθώς θα έχουν περάσει οι διορίες έγκαιρης παράδοσης, και επιπλέον μειώνονται και οι πιθανότητες έγκαιρης παράδοσης άλλων μηνυμάτων με μεγαλύτερα χρονικά περιθώρια εντός χρόνου αφίξεως. Τέλος και στην τεχνική αυτή το κέρδος μειώνεται όταν το r μεγαλώνει πλέον αρκετά και ο αριθμός των εντός χρόνου παραδοτέων μηνυμάτων της απλής τεχνικής αυξάνεται και αυτός.

Στην 'εικόνα 8' παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα του μηχανισμού του συνδυασμού των τεχνικών της κωδικοποίησης και της άρνησης εξυπηρέτησης σε σύγκριση με τον απλό μηχανισμό FCFS/DT. Τα γενικά σχόλια που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού της κωδικοποίησης παραμένουν και εδώ ενώ παράλληλα το υψηλό κέρδος που παρουσιάζει η τεχνική της άρνησης εξυπηρέτησης όταν ο φόρτος του δικτύου είναι μεγάλος παρουσιάζεται και εδώ καθώς η κωδικοποίηση μπορεί να μην έχει θετική επίδραση εκεί, έχει όμως η τεχνική της άρνησης εξυπηρέτησης. Έτσι λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνικών έχει ως αποτέλεσμα στην θετική επίδραση στα σημεία που οι άλλοι χωλαίνουν.



Εικόνα 9 : Σύγκριση της τεχνικής FCFS/DT & cdg & skp με την τεχνική EDF/DT & cdg & skp

Χρήση του μηχανισμού EDF

Μέχρι τώρα όλα τα σενάρια τα οποία αναλύσαμε και κάναμε είχαν την ίδια πολιτική χρονοπρογραμματισμού των πακέτων και αυτή ήταν η πολιτική FCFS. Σε αυτή την πολιτική, η σειρά με την οποία οι router κόμβοι εξυπηρετούν τα πακέτα που φτάνουν σε αυτούς, καθορίζεται από την σειρά με την οποία αυτά φτάνουν στον router κόμβο. Όποιο φτάσει πρώτο θα εξυπηρετηθεί και πρώτο.

Προκειμένου να αλλάξουμε τον τρόπο και την σειρά εξυπηρέτησης των μηνυμάτων στους router κόμβους αντικαταστήσαμε τον τρόπο χρονοπρογραμματισμού των μηνυμάτων και αντί του FCFS χρησιμοποιούμε τον μηχανισμό EDF. Τα μηνύματα που φτάνουν στους κόμβους δρομολόγησης πλέον δεν θα εξυπηρετούνται ανάλογα με την σειρά την οποία μπαίνουν αλλά ανάλογα με το χρονικό περιθώριο που έχουν μέχρι να περάσει το όριο τους για να φτάσουν στον τελικό τους προορισμό. Έτσι λοιπόν όποιο μήνυμα από τις ουρές μας έχει το μικρότερο περιθώριο χρόνου αυτό θα επιλέγεται να εξυπηρετηθεί και μιας και η κωδικοποίηση δικτύου θα είναι ενεργοποιημένη εάν στην άλλη ουρά που ανήκει στην ίδια ροή υπάρχει πακέτο το οποίο μπορεί να κωδικοποιηθεί τότε θα εξυπηρετούνται και τα δύο μαζί.

Τα σενάρια που τρέξαμε είναι τα ίδια με αυτά της προηγούμενης ενότητας και τα αποτελέσματα τα οποία είχαμε τα συγκρίναμε με αυτά του μηχανισμού

FCFS/DT & cdg & skp καθώς και η κωδικοποίηση δικτύου αλλά και η άρνηση εξυπηρέτησης πακέτου θα είναι ενεργοποιημένοι στην πολιτική του EDF. Τα αποτελέσματα που φαίνονται στην 'εικόνα 9' δείχνουν ότι με την πολιτική του EDF υπάρχει μια μικρή βελτίωση της τάξης του 10% όταν ο φόρτος του δικτύου είναι μεγάλος και αυτό γιατί τα πακέτα τα οποία έχουν μικρό χρονικό περιθώριο για την έγκαιρη παράδοσή στον τελικό προορισμό τους θα εξυπηρετηθούν πρώτα και δεν θα περιμένουν στην ουρά μέχρι να εξυπηρετηθούν τα πακέτα που έχουν μπει στις ουρές νωρίτερα από αυτά. Όσο ο φόρτος του δικτύου μας μειώνεται, το κέρδος της τεχνικής EDF μειώνεται καθώς το μέγεθος των ουρών στους router κόμβους και έτσι μειώνεται και ο χρόνος εξυπηρέτησης των πακέτων μας.

Συμπεράσματα

Στην εργασία μελετήσαμε την επίδραση στην απόδοση που έχουν οι τεχνικές της κωδικοποίησης δικτύου, της άρνησης εξυπηρέτησης πακέτου καθώς και τον συνδυασμό των τεχνικών αυτών, σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πραγματικού χρόνου. Καθορίσαμε δύο ροές δεδομένων στις οποίες οι δύο τελικοί κόμβοι παράγουν μηνύματα τα οποία πρέπει να μεταφερθούν, μέσω του δικτύου μας, στον άλλο τελικό κόμβο. Το δίκτυο είναι τέτοιο ώστε να είναι απαραίτητα τρία βήματα προκειμένου τα μηνύματα τα οποία παράγονται από τους πηγαίους κόμβους μας να φτάσουν στον τελικό προορισμό τους. Για τον λόγο αυτό προσθέσαμε δύο κόμβους δρομολόγησης στο δίκτυό μας οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους και με κάποιους πηγαίους κόμβους 'εικόνα 2'.

Τα αποτελέσματα τα οποία πήραμε δείχνουν ότι οι τεχνικές που χρησιμοποιήσαμε δίνουν μια βελτίωση στην απόδοση του συστήματός μας. Η βελτίωση αυτή και το ποσοστό της δεν παραμένει σταθερό και αμετάβλητο, αλλά εξαρτάται από τον φόρτο του δικτύου μας καθώς και από τα χρονικά περιθώρια αποστολής στον τελικό προορισμό με τον οποίο συνδέονται τα πακέτα τα οποία παράγονται. Ακόμη ο συνδυασμός των δύο τεχνικών που εφαρμόσαμε δείχνει να κράτα τα θετικά στοιχεία που είχαν οι τεχνικές αυτές όταν τις εφαρμόζαμε ατομικά.

Τέλος αλλάξαμε την πολιτική χρονοδρομολόγησης των πακέτων στους δρομολογητές του δικτύου μας χρησιμοποιώντας την EDF για να δούμε την επίδραση στον αριθμό των πακέτων που φτάνουν εντός χρόνου στον προορισμό τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει μια μικρή βελτίωση ιδιαίτερα όταν ο φόρτος του δικτύου μας είναι μεγάλος.

Βιβλιογραφία

1. http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_network_coding
3. Ahlswede, R. C. (2000). R.W.: Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*. pp. 1204-1216.
4. Aoun, M. B. (2010). An analytical study of network coding in the presence of real-time messages. *IEEE International Symposium on Network Coding*. Toronto, Canada.
5. Aoun, M. v. (2010). Overloading an IEEE 802.15.4 point-to-point connection with real-time messages. *31st IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS)*, (pp. 225–235). San Diego, CA, USA.
6. Aoun, M. v. Performance Evaluation of Network Coding and Packet Skipping in IEEE 802.15.4-Based Real-Time Wireless Sensor Networks.
7. Argyriou, A. (2009). Wireless network coding with improved opportunistic listening. *IEEE Transactions on Wireless Communications*.
8. Caccamo, M. Z. (2002). An implicit prioritized access protocol for wireless sensor networks. *23rd IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS)*, (pp. pp. 39–48). Austin, TX, USA.
9. Francomme, J. M. (2006). A simple method for guaranteed deadline of periodic messages in 802.15.4 cluster cells for control automation applications. *11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, (pp. 270–277). Prague, Czech Republic.
10. He, T. S. (2003). SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks. *23rd International Conference on Distributed Computing Systems*, (pp. 46-55). Providence, RI, USA.
11. Katti, S. K. (2005). The importance of being opportunistic: Practical network coding for wireless environments. *Allerton conference*. Monticello, IL, USA.
12. Katti, S. R. (2006). XORs in the air: Practical wireless network coding. *SIGCOMM*,. Pisa, Italy.
13. Lu, C. B. (2002). RAP: A real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks. *8th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, (pp. 55–66). San Jose, CA, USA.

