



Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Σχολή Τεχνολογιών Πληροφορικής και  
Επικοινωνιών

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών  
«Ψηφιακές Επικοινωνίες και Δίκτυα»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

“Energy efficiency Mac πρωτοκόλλων στα  
ασύρματα δίκτυα αισθητήρων”

Νόνης Παναγιώτης

ΑΜ. ΜΕ/09093

Επιβλέπουσα: Αλεξίου Αγγελική

Ιανουάριος 2014

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους καθηγητές του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, της Κατεύθυνσης 'Ψηφιακές Επικοινωνίες και Δίκτυα' του τμήματος Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς για τις πολύτιμες γνώσεις που μου πρόσφεραν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην επιβλέπουσα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κα. Αλεξίου Αγγελική για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου πρόσφερε και προπάντων για την υπομονή της.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συνεχή στήριξη τους στις σπουδές μου, την κατανόησή τους και την αγάπη τους.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

στην Άννα,

## Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| Περιεχόμενα.....  | 3  |
| Εισαγωγή.....   | 5  |
| Κεφάλαιο 1: Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Α.Δ.Α) .....                    | 7  |
| 1.1 Βασικά Δομικά Στοιχεία του Κόμβου.....                              | 9  |
| 1.1.1 Υποσύστημα Αίσθησης (Sensing unit).....                           | 10 |
| 1.1.2 Υποσύστημα Επεξεργασίας (Processing unit) .....                   | 10 |
| 1.1.3 Υποσύστημα Επικοινωνίας – Μετάδοσης Δεδομένων (Transceiver) ..... | 11 |
| 1.1.4 Υποσύστημα Παροχής Ενέργειας (Power unit) .....                   | 13 |
| 1.2 Παράγοντες σχεδιασμού των δικτύων αισθητήρων .....                  | 13 |
| 1.2.1 Ανοχή σε αποτυχίες κόμβων .....                                   | 14 |
| 1.2.2 Επεκτασιμότητα.....   | 14 |
| 1.2.3 Κόστος παραγωγής .....  | 15 |
| 1.2.4 Περιορισμοί Υλικού.....   | 15 |
| 1.2.5 Τοπολογία Δικτύου αισθητήρων .....                                | 15 |
| 1.2.6 Περιβάλλον.....   | 16 |
| 1.2.7 Μέσα Μετάδοσης.....   | 16 |
| 1.2.8 Κατανάλωση Ισχύος.....  | 16 |
| 1.3 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....                     | 17 |
| 1.3.1 Εφαρμογές Πρόνοιας Καταστροφών και Διαχείριση Εγκαταστάσεων.....  | 17 |
| 1.3.2 Περιβαλλοντικός Έλεγχος και Βιοποικιλότητα .....                  | 18 |
| 1.3.3 Έξυπνα Κτίρια .....   | 18 |
| 1.3.4 Ιατρική και Υγιεινή .....   | 18 |
| 1.3.5 Logistics και Telematics.....                                     | 19 |
| 1.3.6 Στρατιωτικές Εφαρμογές.....                                       | 19 |
| 1.4 Πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου .....                                    | 20 |
| 1.4.1 Πρωτόκολλα χωρίς συγκρούσεις.....                                 | 20 |
| 1.4.2 Πρωτόκολλα συναγωνισμού για πρόσβαση στο μέσο .....               | 22 |
| 1.5 Πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων .....     | 23 |
| 1.6 Παράγοντες Σύγκρισης Πρωτοκόλλων .....                              | 26 |
| 1.6.1 Κατανάλωση ενέργειας ( Energy Consumption ).....                  | 26 |
| 1.6.2 Καθυστέρηση ( Latency ) .....                                     | 26 |
| 1.6.3 Ρυθμαπόδοση ( Throughput) .....                                   | 27 |
| 1.6.4 Δικαιοσύνη (Fairness) .....                                       | 27 |

|                                       |   |    |
|---------------------------------------|---|----|
| Κεφάλαιο 2:                           | S-MAC .....   | 28 |
| 2.1                                   | Βασική λειτουργία .....   | 29 |
| 2.2                                   | Διαλέγοντας και διατηρώντας χρονοδιαγράμματα .....                      | 31 |
| 2.3                                   | Διατηρώντας τον συγχρονισμό .....                                       | 32 |
| 2.4                                   | Σύγκρουση και άσκοπη λήψη πακέτων λόγω κρυφακούσματος (overhead).....   | 34 |
| 2.4.1                                 | Αποφυγή συγκρούσεων .....   | 34 |
| 2.4.2                                 | Άσκοπη λήψη πακέτων λόγω overhead.....                                  | 35 |
| 2.5                                   | Ανταλλαγή μηνυμάτων .....   | 36 |
| Κεφάλαιο 3:                           | B-MAC.....  | 39 |
| 3.1                                   | Clear Channel Assessment - CCA .....                                    | 39 |
| 3.2                                   | Low Power Listening-LPL.....  | 40 |
| Κεφάλαιο 4:                           | Z-MAC.....  | 43 |
| 4.1                                   | Παραμετροποίηση του Z-MAC.....  | 47 |
| 4.1.1                                 | Ανακάλυψη γειτονικών κόμβων και απόδοση χρονοσχισμών .....              | 47 |
| 4.1.2                                 | Ορισμός χρονικού πλαισίου .....   | 48 |
| 4.2                                   | Έλεγχος μετάδοσης του Z-MAC.....  | 51 |
| 4.3                                   | Ρητή Ειδοποίηση Συμφόρησης (Explicit Contention Notification-ECN) ..... | 52 |
| 4.4                                   | Παραλαβή του χρονοδιαγράμματος του Z-MAC.....                           | 55 |
| 4.5                                   | Τοπικός Συγχρονισμός .....  | 56 |
| Κεφάλαιο 5:                           | NS-2 .....  | 58 |
| 5.1                                   | Σχεδιασμός NS2.....   | 59 |
| 5.2                                   | Σχέση C++ και OTcl.....   | 61 |
| 5.3                                   | Χαρακτηριστικά NS-2.....  | 62 |
| 5.4                                   | Nam.....  | 62 |
| 5.5                                   | Αναλυτές δεδομένων (Trace Data Analyzers) .....                         | 63 |
| 5.5.1                                 | XGraph.....   | 63 |
| 5.5.2                                 | TraceGraph .....  | 64 |
| Κεφάλαιο 6:                           | Περιβάλλον προσομοίωσης.....  | 65 |
| 6.1                                   | Σενάριο 1: Χαμηλού φορτίου (Low Load) .....                             | 66 |
| 6.2                                   | Σενάριο 2: Υψηλού φορτίου (High Load) .....                             | 72 |
| Συμπεράσματα - Μελλοντική Έρευνα..... |   | 79 |
| Βιβλιογραφία.....                     |   | 80 |
| Παράρτημα.....                        |   | 82 |

## Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων (ΑΔΑ). Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από ευέλικτες συσκευές δικτύωσης δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες για «κίνηση» μέσα σε τεράστια, ετερογενή δίκτυα και για πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και υπηρεσιών, ανεξάρτητα από τη θέση, την ώρα, τη γλώσσα, και την ικανότητα τους να «βλέπουν» ή να «ακούνε». Ο αντίκτυπος στην κοινωνία είναι αισθητός μιας και προσφέρουν άμεση επαφή με το περιβάλλον εφαρμογής, μικρή διαταραχή στο περιβάλλον, δυνατότητα επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στο πεδίο χωρίς ανθρώπινη παρουσία ενώ αποτελούν οικονομική μέθοδο για μακροχρόνια συλλογή στοιχείων (μια φορά τοποθέτηση, πολλαπλές χρήσεις). Χρησιμοποιούνται σήμερα σε ευρεία κλίμακα για την παρακολούθηση χώρων, τον έλεγχο της κυκλοφοριακής κίνησης, τη συλλογή δεδομένων και την αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών. Πολλές από τις εφαρμογές που εξυπηρετούν επιβάλλουν την ανάπτυξη ενός μεγάλου αριθμού αισθητήρων στην περιοχή λειτουργίας του δικτύου, που θα έχουν τη δυνατότητα να αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον και να συνεργάζονται μεταξύ τους για την αποτελεσματική διεξαγωγή της επικοινωνίας τους. Η ταυτόχρονη παρουσία ενός τέτοιου αριθμού ασύρματων κόμβων σε μια περιορισμένη γεωγραφική περιοχή, δημιουργεί σημεία υψηλής συμφόρησης σε διάφορα τμήματα του δικτύου. Ταυτόχρονα, κατά την επίλυση του προβλήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απαιτήσεις των ΑΔΑ για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας – που οδηγεί σε παράταση της ζωής του δικτύου- και οι περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες που έχουν τα δίκτυα αισθητήρων.

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση, σύγκριση και αξιολόγηση της επίδοσης τριών πρωτοκόλλων ασύρματων δικτύων αισθητήρων στο επίπεδο πρόσβασης μέσου (MAC Layer) με βάση την κατανάλωση ενέργειας και την ρυθμαπόδοση (throughput). Τα πρωτόκολλα που επιλέχθηκαν είναι: SMAC - Sensor Medium Access Control, BMAC – Berkeley Medium Access Control και ZMAC – Zebra Medium Access Control και το πρόγραμμα δικτυακής προσομοίωσης είναι το NS-2 (Network Simulator). Αρχικά έγινε μια σύγκριση των τριών αυτών πρωτοκόλλων σε

συνθήκες χαμηλού bandwidth και μετά σε συνθήκες υψηλού. Από τις συγκρίσεις αυτές προέκυψαν διαγράμματα κατανάλωσης ενέργειας και ρυθμαπόδοσης τα οποία και παρουσιάζονται στο τέλος της εργασίας.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

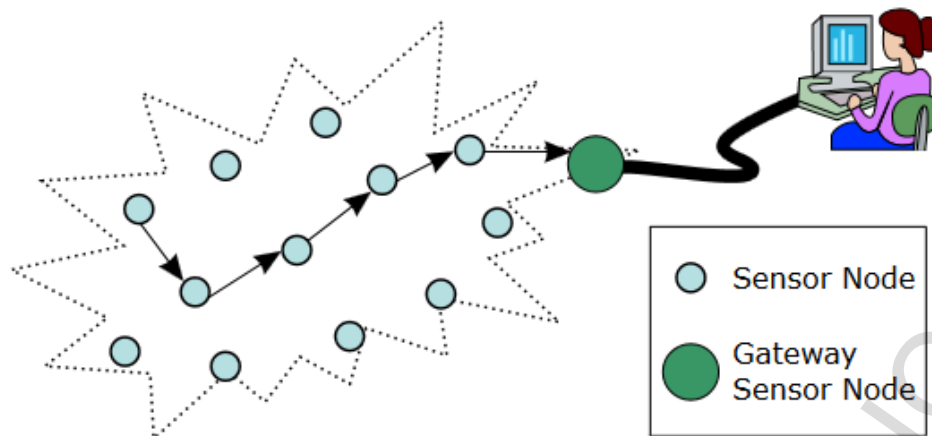
## Κεφάλαιο 1: Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Α.Δ.Α)

Ένα ΑΔΑ αποτελείται τυπικά από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων οι οποίοι συνεργάζονται μεταξύ τους και είναι διασκορπισμένοι σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον, αποσκοπώντας στη συλλογή εξειδικευμένων δεδομένων που απαιτούνται για την παρακολούθηση/έλεγχο μιας προκαθορισμένης περιοχής. Η παράδοση των αισθητήριων δεδομένων για επεξεργασία και ανάλυση στον κεντρικό σταθμό ελέγχου, γνωστός και ως κόμβος-συλλέκτης, βασίζεται στη συνεργασία των κόμβων του ΑΔΑ και πραγματοποιείται με πολλαπλά άλματα (Multi-hop), όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 1.

Άρα ένας κόμβος ενός Α.Δ.Α λειτουργεί ως:

- 1) Πηγή δεδομένων (anchor nodes), με κάποιες βασικές ικανότητες, όπως η αντίληψη, η επεξεργασία και η ασύρματη επικοινωνία, ικανή να παράγει αισθητήρια δεδομένα μέσω της αλληλεπίδρασης του με το φυσικό περιβάλλον και να συλλέγει σχετικές παραμέτρους (όπως π.χ. μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, κίνησης κ.ο.κ.).
- 2) Συλλέκτης δεδομένων (sink nodes), ένας ιδιαίτερος κόμβος με πολύ μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα και επεξεργαστική ισχύ από τους ίδιους τους αισθητήρες, ο οποίος είναι επιφορτισμένος με τη συλλογή, επεξεργασία και περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων που ανακτήθηκαν από τους διάφορους κόμβους αισθητήρων του δικτύου, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις πραγματοποιεί και οργανωτικές λειτουργίες του δικτύου.





Εικόνα 1: Κόμβοι και κεντρικός κόμβος (sink)

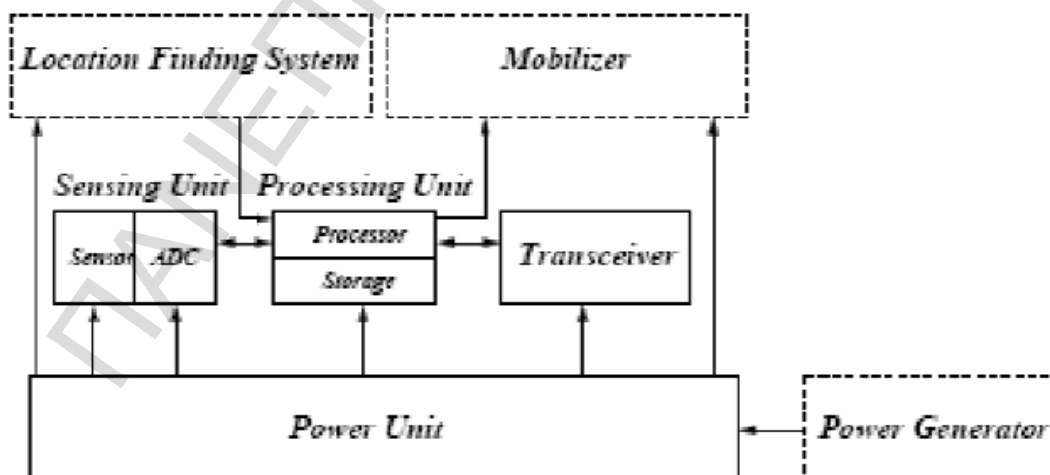
Από άποψη αρχιτεκτονικής δικτύου, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να θεωρηθούν ως αυτόνομα, μη δομημένα (Ad Hoc) ασύρματα δίκτυα τα οποία έχουν για τερματικούς κόμβους ένα μεγάλο αριθμό αισθητήρων. Τα Ad Hoc δίκτυα χαρακτηρίζονται από την έλλειψη οργανωμένης δικτυακής υποδομής και τη συνεχή και τυχαία μεταβολή της τοπολογίας τους, λόγω της κίνησης των τερματικών κόμβων. Οι τερματικοί κόμβοι στα δίκτυα αυτά είναι συνήθως φορητοί υπολογιστές, υπολογιστές παλάμης (Personal Digital Assistant - PDAs), ή νέας τεχνολογίας κινητά τηλέφωνα που με τυχαίο τρόπο κινούνται και συνδέονται/αποσυνδέονται από το δίκτυο. Οι τερματικοί αυτοί κόμβοι διαθέτουν εν γένει μεγάλη υπολογιστική ισχύ, μεγάλες και εύκολα ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (επαναφορτιζόμενες μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας), ο συνολικός χρόνος σύνδεσής τους στο δίκτυο όμως είναι μικρός, ενώ γενικά είναι λίγοι σε αριθμό.

Παρόλες τις ομοιότητες που παρουσιάζουν με τα κλασικά ασύρματα μη δομημένα δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν κάποια πολύ ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που πηγάζουν τόσο από το είδος των κόμβων που αποτελούν το δίκτυο, όσο και από τις εφαρμογές για τις οποίες αναπτύσσονται. Έτσι στα ΑΔΑ, ο αριθμός των τερματικών κόμβων είναι

μεγάλος, συνήθως οι κόμβοι αυτοί βρίσκονται τοποθετημένοι σε σταθερά σημεία, όπου και συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον τους, έχουν πολύ μικρότερη υπολογιστική και επεξεργαστική ισχύ λόγω των λιγοστών αποθεμάτων ενέργειας, όσο και λόγω του περιορισμένου μεγέθους και κόστους των αισθητήρων. Το πρώτο ωστόσο και κύριο χαρακτηριστικό τους, είναι οι αυστηρά περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι, δοθέντος ότι οι ασύρματοι αισθητήρες τροφοδοτούνται από μπαταρίες οι οποίες μάλιστα στις περισσότερες εφαρμογές είναι δύσκολο ή αδύνατο να ανανεωθούν. Τέλος, ο μεγάλος αριθμός κόμβων-αισθητήρων, οι συχνές αποτυχίες στις ασύρματες συνδέσεις που προκαλούνται είτε λόγω αστοχίας υλικών ή της μικρής υπολογιστικής ισχύος ή της οικονομίας στην ενέργεια, μαζί με την αφαίρεση ή προσθήκη νέων κόμβων, οδηγούν σε πολύ συχνή και τυχαία μεταβολή της τοπολογίας τους, συγκρίσιμης ή και μεγαλύτερης από ένα κλασικό Ad Hoc δίκτυο.

## 1.1 Βασικά Δομικά Στοιχεία του Κόμβου

Όλα τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά ενός κόμβου- αισθητήρα, βασική μονάδα σε ένα ΑΔΑ (υλικό των ΑΔΑ- hardware) συνοψίζονται στην παρακάτω Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική κόμβου-αισθητήρα

Αποτελείται λοιπόν από τα κύρια υποσυστήματα αίσθησης, επεξεργασίας, επικοινωνίας και παροχής ενέργειας.

### **1.1.1 Υποσύστημα Αίσθησης (Sensing unit)**

Αποτελείται από δύο υποενότητες τους αισθητήρες και τους μετατροπείς αναλογικό σε ψηφιακό (analog-to-digital converter -ADCs). Η κύρια λειτουργικότητα του sensing unit είναι να αισθάνεται ή να μετρά τα φυσικά δεδομένα που προκύπτουν από την περιοχή που βρίσκεται. Παρέχει τη διεπαφή όπου μετατρέπονται οι υπό μέτρηση ποσότητες (μη ηλεκτρικές ή χημικές ποσότητες) σε ηλεκτρικά σήματα, άμεσα επεξεργάσιμα πλέον από τις ηλεκτρονικές συσκευές. Η αναλογική τάση που δημιουργείται στον αισθητήρα και ανταποκρίνεται σε κάποιο «γεγονός» ψηφιοποιείται από τον ADC και μεταφέρεται στο υποσύστημα επεξεργασίας για περισσότερη ανάλυση. Κατά την επιλογή ενός αισθητήρα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις της εφαρμογής για την οποία θα αναπτυχθεί το δίκτυο, ο ρυθμός δειγματοληψίας του αισθητήρα, οι απαιτήσεις σε τάση και σε ενέργεια.

### **1.1.2 Υποσύστημα Επεξεργασίας (Processing unit)**

Το υποσύστημα αυτό συσχετίζεται με ένα τμήμα μνήμης-αποθήκευσης προγραμμάτων ή και ενδιάμεσων δεδομένων. Παίζει κύριο ρόλο στη διαχείριση της συνεργασίας με τους υπόλοιπους αισθητήρες, με την εκτέλεση καθορισμένων απλών υπολογισμών, για να πετύχει τις προκαθορισμένες εργασίες. Υπάρχουν αρκετές οικογένειες αυτού του κομματιού που συμπεριλαμβάνουν μικροελεγκτές (microcontrollers), μικροεπεξεργαστές (microprocessors) και field-programmable gate arrays (FPGAs). Η μη ευμετάβλητη μνήμη και οι διασυνδέσεις με τα ADCs μπορούν να ενοποιηθούν σε ένα ενοποιημένο κύκλωμα. Το processing unit χρειάζεται τακτική αποθήκευση για να μειώνει το μέγεθος των μηνυμάτων που θα μεταδοθούν με τοπική επεξεργασία και συνάθροιση δεδομένων. Η καθοριζόμενη μνήμη (flash memory) χρησιμοποιείται ευρέως λόγω του κόστους της και της χωρητικότητας της αποθήκευσης της. Η επιλογή του μικροελεγκτή στηρίζεται

επιπλέον σε παράγοντες όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι απαιτήσεις σε τάση λειτουργίας, το κόστος, η υποστήριξη περιφερειακών, ο χρόνος αφύπνιση και η ταχύτητα του.

### 1.1.3 Υποσύστημα Επικοινωνίας - Μετάδοσης Δεδομένων (Transceiver)

Είναι το πιο σημαντικό τμήμα μιας και ενώνει τον κόμβο με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω της αποστολής και λήψης πληροφοριών. Αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή ενέργειας, επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του κόμβου αλλά και τη συνολική απόδοση του δικτύου. Υπάρχουν τρία αναπτυγμένα σχέδια επικοινωνίας στους αισθητήρες που περιλαμβάνουν οπτική παρακολούθηση (optical communication, laser), υπέρυθρη (infrared) και ραδιοσυχνότητα (radiofrequency, RF). Ένα σημαντικό και ενδιαφέρον σύστημα που χρησιμοποιεί το οπτικό μέσο για εκπομπή είναι το Smart Dust mote, αυτόνομη μονάδα αίσθησης, υπολογισμού-επεξεργασίας και επικοινωνίας. Τα δύο πρώτα σχέδια απαιτούν οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (a line of sight - LOS). Η ραδιοσυχνότητα είναι η πιο εύκολη στη χρήση αλλά χρειάζεται κεραία.

Για επικοινωνία σε πραγματικές συνθήκες ένας κόμβος θα πρέπει να διαθέτει ένα πομπό και ένα δέκτη. Στην ουσία, ο στόχος είναι να μετατραπεί μία αλληλουχία από bit (ή bytes ή frames), η οποία προέρχεται από ένα μικροελεγκτή, σε και από ραδιοκύματα. Για πρακτικούς λόγους είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται μια συσκευή που να συνδυάζει του δύο αυτούς στόχους σε μία οντότητα. Οι σύνθετες αυτές συσκευές ονομάζονται πομποδέκτες. Συνήθως πραγματοποιείται ημι-αμφίδρομη λειτουργία, καθώς η ταυτόχρονη λήψη και εκπομπή δεν είναι πρακτική στα ασύρματα μέσα.

Οι περισσότεροι πομποδέκτες μπορούν να διακρίνουν τις εξής τέσσερις λειτουργικές καταστάσεις:

- **Κατάσταση εκπομπής (Transmit Mode):** το τμήμα μετάδοσης του πομποδέκτη είναι ενεργό και η κεραία ακτινοβολεί ενέργεια.

- **Κατάσταση λήψης (Receive Mode):** το τμήμα λήψης του πομποδέκτη είναι ενεργό.
- **Άεργη κατάσταση (Idle Mode):** ο πομποδέκτης είναι έτοιμος να λάβει δεδομένα, αλλά στην πραγματικότητα δε λαμβάνει τίποτα. Σε αυτήν την κατάσταση, πολλά μέρη του τμήματος λήψης του κυκλώματος, όπως το κύκλωμα συγχρονισμού, παραμένουν ενεργά, ενώ άλλα μπορεί να είναι ανενεργά.
- **Κατάσταση ύπνου ή απενεργοποίησης (Sleep or Shutdown Mode):** τα πιο σημαντικά μέρη του πομποδέκτη είναι απενεργοποιημένα. Υπάρχουν πομποδέκτες που διαθέτουν πολλαπλές καταστάσεις ύπνου. Αυτές οι καταστάσεις διαφέρουν ως προς το ποσοστό του κυκλώματος που μένει ανενεργό, τους σχετικούς χρόνους αποκατάστασης, καθώς και την ενέργεια έναρξης (Start-up energy), κατά τη διάρκεια της οποίας δεν είναι δυνατή καμία λήψη ή εκπομπή δεδομένων.

Η στοίβα των πρωτοκόλλων του κόμβου αισθητήρα και το λειτουργικό λογισμικό πρέπει να αποφασίζουν σε ποια κατάσταση ο πομποδέκτης είναι κλειστός-ανενεργός σύμφωνα με τις εκάστοτε, προβλεπόμενες ανάγκες επικοινωνίας. Ένα πρόβλημα που περιπλέκει αυτήν την απόφαση είναι ότι η εναλλαγή μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας καταναλώνει επίσης ενέργεια. Για παράδειγμα, ένας πομποδέκτης που μεταβαίνει από την κατάσταση ύπνου στην κατάσταση εκπομπής απαιτεί κάποιο χρόνο έναρξης και φυσικά και ενέργεια έναρξης, για την ενεργοποίηση ταλαντωτών ελεγχόμενων από τάση και άλλες διαδικασίες. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου έναρξης, καμία εκπομπή ή λήψη δεδομένων δεν είναι δυνατή. Επομένως, το πρόβλημα του προγραμματισμού των καταστάσεων των κόμβων (ισοδύναμα δηλαδή η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των διαφόρων στοιχείων του συστήματος επικοινωνίας), με στόχο την ελαχιστοποίηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας, είναι ιδιαίτερα σύνθετο. Θέματα που απασχολούν την έρευνα στον τομέα του υποσυστήματος μετάδοσης αφορούν την ακτίνα εκπομπής,

τον τύπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται καθώς και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

#### **1.1.4 Υποσύστημα Παροχής Ενέργειας (Power unit)**

Η κατανάλωση ενέργειας είναι η κύρια αδυναμία (πρόβλημα) των ΑΔΑ. Δεδομένου ότι συνήθως δεν είναι διαθέσιμη κάποια μόνιμη πηγή παροχής ενέργειας, είναι απαραίτητη η χρήση κάποιας μορφής μπαταρίας για την παροχή της απαιτούμενης ενέργειας. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες: στις επαναφορτιζόμενες και στις μη-επαναφορτιζόμενες. Συχνά, στα δύσκολα περιβάλλοντα είναι αδύνατο να επαναφορτιστεί ή να αλλάξει μια μπαταρία. Τέλος, στην Εικόνα 2 με διακεκομμένη γραμμή αναγράφονται επιπλέον εξαρτήματα ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται, όπως σύστημα εντοπισμού (Location Finding System, GPS), γεννήτρια (Power Generator, π.χ. ηλιακές κυψέλες), μετακίνησης (Mobilizer). Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η γνώση της τοποθεσίας με υψηλή ακρίβεια. Επιπλέον, εκτός από τις παραδοσιακές μπαταρίες μερικές φορές είναι δυνατόν ο κόμβος να διαθέτει κατάλληλες συσκευές που έχουν τη δυνατότητα να 'συλλαμβάνουν' και να εκμεταλλεύονται την ενέργεια που βρίσκεται διάχυτη στον περιβάλλοντα χώρο του κόμβου (π.χ. μέσω ηλιακών κυττάρων, φωτοβολταϊκών, αλλαγών της πίεσης και ροής του αέρα/υγρών). Τα παραπάνω αποτελούν τις μη συμβατικές ενεργειακές αποθήκες.

## **1.2 Παράγοντες σχεδιασμού των δικτύων αισθητήρων**

Κατά την σχεδίαση ενός ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν μια πληθώρα παραγόντων έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της εφαρμογής με τον καλύτερο δυνατό τρόπο και με το μικρότερο δυνατό κόστος. Τέτοιοι παράγοντες είναι η αντοχή σε αποτυχίες (fault tolerance), η επεκτασιμότητα (scalability) , το κόστος παραγωγής των αισθητήρων (production costs), οι

περιορισμοί υλικού (hardware constraints), η τοπολογία του δικτύου (topology), το περιβάλλον (environment), τα μέσα μετάδοσης (transmission media) και η κατανάλωση ισχύος (power consumption). Οι παραπάνω παράγοντες είναι και αυτοί που οδηγούν στον σχεδιασμό και στην ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων ειδικά για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που προσπαθούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα του δικτύου και να περιορίσουν την άσκοπη κατανάλωση ενέργειας.

### **1.2.1 Ανοχή σε αποτυχίες κόμβων**

Οι αισθητήρες τροφοδοτούνται από την μπαταρία τους και τοποθετούνται συνήθως σε περιβάλλοντα με αντίξοες συνθήκες (π.χ. πεδίο μάχης, σελήνη). Είναι λοιπόν φυσικό εξαιτίας της περιορισμένης ενέργειάς τους και των παρεμβολών από το περιβάλλον να υποστούν βλάβη ή να διακόψουν την λειτουργία τους λόγω έλλειψης ενέργειας. Ένα τέτοιο γεγονός όμως δεν πρέπει να θέτει σε κίνδυνο την ακεραιότητα ολόκληρου του δικτύου. Πρέπει δηλαδή το δίκτυο να είναι αξιόπιστο και ανθεκτικό στις αποτυχίες των κόμβων. Η αξιοπιστία του αυτή προέρχεται από την ικανότητα επαναπροσδιορισμού των μονοπατιών πολλαπλών βημάτων από τον κόμβο αισθητήρα στο κέντρο συλλογής.

### **1.2.2 Επεκτασιμότητα**

Ένα δίκτυο αισθητήρων πρέπει να είναι άμεσα επεκτάσιμο. Πολλές φορές οι αισθητήρες κόμβοι χαλάνε ή σταματούν την λειτουργία τους λόγω χαμηλής μπαταρίας και πρέπει να αντικατασταθούν. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να κριθεί αναγκαία η αύξηση της πυκνότητας των κόμβων ως προς την παρατήρηση εφαρμογή ή ακόμα και η επέκταση του δικτύου για την κάλυψη μεγαλύτερου πεδίου παρατήρησης. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων λοιπόν θα πρέπει να είναι ικανά να λειτουργούν με μεγάλο πλήθος ή/και με μεγάλη πυκνότητα κόμβων. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να αναπτυχθούν πρωτόκολλα τα οποία θα επιτρέπουν την άμεση και με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος προσαρμογή του δικτύου στις νέες συνθήκες.

### **1.2.3 Κόστος παραγωγής**

Στις περιπτώσεις όπου το πλήθος των κόμβων που χρειάζεται για την προς παρατήρηση εφαρμογή είναι μεγάλο, το κόστος παραγωγής ενός κόμβου αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους του δικτύου. Στην περίπτωση που το κόστος του δικτύου είναι μεγαλύτερο από αυτό που απαιτείται για την τοποθέτηση συμβατικών αισθητήρων, τότε η χρήση δικτύου δεν είναι δικαιολογημένη από άποψη κόστους. Συνεπώς το κόστος του κάθε αισθητήρα κόμβου πρέπει να διατηρηθεί χαμηλό. Η σημερινή τεχνολογία επιτρέπει ένα σύστημα επικοινωνίας Bluetooth να έχει κόστος μικρότερο από \$10. Το κόστος ενός κόμβου θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από \$1 ώστε να είναι εφικτή η χρήση δικτύου αισθητήρων. Κάτι τέτοιο δείχνει πως συμφέρει περισσότερο η χρήση ενός καινούριου κόμβου στη θέση ενός του οποίου έχει τελειώσει η μπαταρία, παρά η αντικατάσταση της μπαταρίας του δεύτερου. Το κόστος ενός Bluetooth συστήματος επικοινωνίας, το οποίο θεωρείται συσκευή χαμηλού κόστους, είναι δέκα φορές πιο υψηλό σε σχέση με την επιδιωκόμενη τιμή για έναν κόμβο-αισθητήρα.

### **1.2.4 Περιορισμοί Υλικού**

Όπως έχει αναφερθεί, το μέγεθος ενός αισθητήρα αποτελεί σημαντικό σχεδιαστικό παράγοντα. Επιπλέον, οι κόμβοι θα πρέπει να καταναλώνουν πολύ χαμηλή ισχύ, να λειτουργούν σε υψηλές χωρικές πυκνότητες, να έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής, να είναι αυτόνομοι ώστε να λειτουργούν χωρίς επίβλεψη, και να προσαρμόζονται στο περιβάλλον.

### **1.2.5 Τοπολογία Δικτύου αισθητήρων**

Η μεγάλη πυκνότητα κόμβων σε ένα πεδίο παρατήρησης και οι επιρρέπειά τους σε συχνές αποτυχίες καθιστούν επιτακτική την ανάγκη διατήρησης σωστής και λειτουργικής τοπολογίας στο δίκτυο. Επιπλέον, η τοπολογία κάθε αυτή του δικτύου, επηρεάζει τις αποφάσεις που λαμβάνονται όσο αφορά στον αλγόριθμο δρομολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί, στην εφαρμογή την οποία επιθυμούμε να μελετήσουμε κ.α.



### 1.2.6 Περιβάλλον

Οι κόμβοι-αισθητήρες τοποθετούνται με υψηλή πυκνότητα είτε πολύ κοντά είτε ακριβώς μέσα στο προς παρατήρηση φαινόμενο. Έτσι, συνήθως λειτουργούν χωρίς επίβλεψη σε απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές. Μπορούν να λειτουργούν στο εσωτερικό ενός μεγάλου μηχανήματος, στο πυθμένα ενός ωκεανού, σε ένα βιολογικά ή χημικά μολυσμένο πεδίο, σε ένα πεδίο μάχης πέρα από τις εχθρικές γραμμές, μέσα σε ένα μεγάλο σπίτι ή κτίριο.

### 1.2.7 Μέσα Μετάδοσης

Οι ζεύξεις μεταξύ των κόμβων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιούν ραδιοκύματα, υπέρυθη ακτινοβολία ή οπτικά μέσα. Σε κάθε περίπτωση, το μέσο μετάδοσης που θα επιλεγεί θα πρέπει να είναι διαθέσιμο παγκοσμίως για να επιτρέπεται η λειτουργία τους από οποιοδήποτε μέρος. Σε ότι αφορά την χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας ως μέσο μετάδοσης, αξίζει να σημειωθεί πως παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Δεν απαιτείται η παραχώρηση άδειας και η επικοινωνία είναι ανθεκτική σε παρεμβολές προερχόμενες από ηλεκτρικές συσκευές. Επίσης οι συσκευές εκπομπής και λήψης υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι φθηνές και εύκολες στην κατασκευή τους. Από την άλλη μεριά, υπάρχει απαίτηση οπτικής επαφής μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη.

### 1.2.8 Κατανάλωση Ισχύος

Ο ασύρματος κόμβος, καθώς είναι μία μικροηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να εφοδιαστεί μόνο με περιορισμένη ισχύ (< 0.5 Ah, 1.2 V). Σε μερικά σενάρια εφαρμογών, η ανανέωση των αποθεμάτων ισχύος μπορεί να είναι αδύνατη. Συνεπώς, η διάρκεια ζωής ενός κόμβου παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Σε ένα ad-hoc δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων, κάθε κόμβος έχει διττό ρόλο: να παράγει ο ίδιος δεδομένα καθώς και να δρομολογεί τα δεδομένα που λαμβάνει από τους γείτονες του. Η δυσλειτουργία μερικών κόμβων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές τοπολογικές αλλαγές και ίσως απαιτεί νέα δρομολόγηση των πακέτων και αναδιοργάνωση του δικτύου. Έτσι, η διαφύλαξη ισχύος και η διαχείριση αυτής έχουν πρόσθετη σημασία. Για τους

παραπάνω λόγους, η σχεδίαση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων για τα δίκτυα αισθητήρων που λαμβάνουν υπ' όψιν τα θέματα ισχύος έχει λάβει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την πανεπιστημιακή κοινότητα.

Το κύριο έργο ενός κόμβου-αισθητήρα σε ένα πεδίο παρατήρησης, είναι να ανιχνεύει γεγονότα, να πραγματοποιεί γρήγορη επεξεργασία δεδομένων σε τοπικό επίπεδο, και στη συνέχεια να μεταδίδει τα δεδομένα. Έτσι, η κατανάλωση ισχύος μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες: για το έργο της αίσθησης, την επικοινωνία και την επεξεργασία των δεδομένων.

### 1.3 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Σήμερα, οι υπέρμαχοι των ΑΔΑ, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν, εξερευνούν ενεργά και πειραματίζονται με καινοτόμες εφαρμογές σε διάφορες περιοχές, προάγοντας ταυτόχρονα τις ήδη υπάρχουσες. Παραδείγματα εφαρμογών αναφέρονται παρακάτω:

#### 1.3.1 Εφαρμογές Πρόνοιας Καταστροφών και Διαχείριση Εγκαταστάσεων

Περιλαμβάνουν έλεγχο του περιβάλλοντος όπως η παρακολούθηση της εξέλιξης μιας φωτιάς ή εξέταση πιθανών διαρροών σε χημικά εργοστάσια. Πραγματοποιείται ρίψη αισθητήρων από αεροσκάφη σε δασική έκταση οι οποίοι διαθέτοντας θερμομετρητές, παράγουν ένα χάρτη θερμοκρασίας (temperature map) ενώ ταυτόχρονα υποδεικνύουν την ακριβή θέση έναρξης της πυρκαγιάς πριν αυτή προλάβει να εξαπλωθεί. Επίσης πραγματοποιείται εγκατάσταση αισθητήρων σε γέφυρες ή κτίρια για να ελέγχονται σε περιπτώσεις σεισμού, παρακολουθήσεις για τυχόν ανεπιθύμητες παρουσίες σε κάποιο χώρο-εντοπισμό δηλαδή εισβολέων σε μη επιτρεπόμενους χώρους- αλλά ακόμα, και ενσωμάτωση αισθητήρων βαθιά μέσα σε μηχανήματα όπου οι ενσύρματοι αισθητήρες δεν θα ήταν δυνατόν να τοποθετηθούν. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται εύκολη επιτήρηση μηχανών και προληπτική συντήρηση ακόμα και σε πρώην – δυσπρόσιτες περιοχές.

### **1.3.2 Περιβαλλοντικός Έλεγχος και Βιοποικιλότητα**

Χρησιμοποιούνται αισθητήρες βροχόπτωσης, στάθμης νερού κι αισθητήρες καιρού για μετεωρολογική γεωφυσική έρευνα και μελέτη της ρύπανσης. Ακόμη υπάρχουν άλλοι τύποι αισθητήρων για την παρατήρηση και καταγραφή του ζωικού βασιλείου, την παρακολούθηση της κίνησης πουλιών, μικρών ζώων και εντόμων, η καταγραφή κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων και συνθηκών επηρεάζουν το κλίμα της γης, η καταγραφή μετρήσεων από θάλασσα, ξηρά και αέρα. Επιπλέον, βρίσκει εφαρμογή στη γεωργία ακριβείας όσον αφορά τις φυτείες λιπασμάτων-εντομοκτόνων-ποτισμάτων μόνο όποτε, όσο κι όπου απαιτείται.

### **1.3.3 Έξυπνα Κτίρια**

Στόχος είναι η μείωση της σπατάλης σε ενέργεια με τον έλεγχο των συνθηκών στο εσωτερικό των κτιρίων όσον αφορά την υγρασία, τον εξαερισμό και τον κλιματισμό (humidity, ventilation, air-conditioning - HVAC). Πραγματοποιούνται σχετικές μετρήσεις με την κάλυψη δωματίων, ελέγχοντας τη ροή του αέρα, τη θερμοκρασία κι άλλες φυσικές παραμέτρους. Έτσι όχι μόνο επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση ενέργειας αλλά βελτιώνεται και το βιοτικό επίπεδο των κατοίκων. Επίσης, γίνεται έλεγχος των μηχανικών επιπέδων πίεσης στις σεισμικά ενεργές ζώνες εξακριβώνοντας έτσι εάν το κτίριο είναι ασφαλές ή βρίσκεται στα όρια της κατάρρευσης.

### **1.3.4 Ιατρική και Υγιεινή**

Χρήση αισθητήρων έχουμε στην εντατική ή μετά-εγχειρητική περίοδο ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν την απομακρυσμένη- κατ' οίκο παρακολούθηση σε περιπτώσεις χρόνιων παθήσεων ή ηλικιωμένων. Επίσης επιτυγχάνεται η διάγνωση παθήσεων, η τηλε-παρακολούθηση ανθρώπινων φυσιολογικών δεδομένων και η καταγραφή θέσης και κατάστασης ασθενών σε νοσοκομεία. Έτσι με τα ανιχνευτικά συστήματα (κεντρικές μονάδες συλλογής πληροφοριών τα νοσοκομεία) σε ασθενείς και γιατρούς μπορεί να 'σωθούν' ζωές. Ακόμη, σε συνδυασμό με περιβαλλοντικούς αισθητήρες συμβάλουν σε επιδημιολογικές μελέτες.

### **1.3.5 Logistics και Telematics**

Ιδιαίτερη διευκόλυνση φαίνεται να παρέχουν και σε θέματα συνεχούς καταγραφής της θέσης ή της κατάστασης των αντικειμένων που τίθενται υπό παρακολούθηση (total asset management). Έχουμε δηλαδή τον εξοπλισμό κιβωτίων – δεμάτων με κόμβους αισθητήρων ώστε να επιτυγχάνεται συνεχής έλεγχος κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ή της αποθήκευσης τους. Επιπλέον με τις ‘έξυπνες λεωφόρους’ (Intelligent roadside) ανά πάσα στιγμή συγκεντρώνονται πληροφορίες-προειδοποιήσεις, ανταλλάσσονται με τα οχήματα και αφορούν είτε την κατάσταση κυκλοφορίας είτε οδικές συνθήκες. Επίσης έχουμε χρήση τους για καταγραφή της φυσικής καταπόνησης υλικών, τη διαχείριση αποθεμάτων και την παρακολούθηση της ποιότητας προϊόντων παραγωγής, την κατασκευή έξυπνων χώρων γραφείου και τον έλεγχο περιβάλλοντος σε κτίρια γραφείων, τον αυτοματισμό και τον έλεγχο της επεξεργασίας σε εργοστασιακές μονάδες, τη χρήση τους για εντοπισμό και παρακολούθηση κλοπών αυτοκινήτων, για εντοπισμό και καταγραφή της πορείας οχημάτων καθώς και σε πολλές διαδραστικές εφαρμογές μουσείων και χώρων ψυχαγωγίας.

### **1.3.6 Στρατιωτικές Εφαρμογές**

Μπορούν να αποτελέσουν ενιαίο και αναπόσπαστο τμήμα σε συστήματα διοίκησης, ελέγχου, επικοινωνίας, στενής παρακολούθησης, αναγνώρισης εδάφους και συστήματα στόχευσης. Αξιοποιούνται για την διαφύλαξη της ασφάλειας μιας περιοχής και τον έλεγχο αποθεμάτων, πολεμοφοδίων κι εξοπλισμού, καθώς και για την αναγνώριση εχθρικών δυνάμεων ή πυρηνικών επιθέσεων.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΔΑ στις παραπάνω εφαρμογές είναι η μακροπρόθεσμη, ακίνδυνη, ασύρματη λειτουργία των αισθητήρων κοντά σε αντικείμενα προς παρατήρηση, υπερνικώντας πιθανά εμπόδια όπως δέντρα, βράχια κτλ. Η ανάπτυξη των δικτύων αυτών γίνεται ακόμα και σε σημεία που η ενσύρματη επικοινωνία δε θα ήταν δυνατή. Χάρη στο μικρό τους μέγεθος, είναι ιδιαίτερα διακριτικοί και ενοχλούν σε μικρό βαθμό τους παρατηρούμενους ανθρώπους, ζώα

και φυτά. Ταυτόχρονα, μέσω συνεργασίας κόμβων επιτυγχάνεται και η χαρτογράφηση φυσικών παραμέτρων, γνώση της οποίας οδηγεί βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα και αύξηση του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων στην περίπτωση ενός έξυπνου κτιρίου.

## 1.4 Πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου

Τα πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου MAC (Media Access Control data communication protocol) αποτελούν το δεύτερο από τα επτά στρώματα του μοντέλου OSI. Παρέχουν μηχανισμούς διευθυνσιοδότησης και ελέγχου πρόσβασης στο κανάλι οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα σε πολλαπλούς δικτυακούς κόμβους και τερματικά να επικοινωνούν μεταξύ τους. Η συσκευές οι οποίες συνιστούν το πρωτόκολλο MAC αναφέρονται ως Ελεγκτές Πρόσβασης Μέσου.

Το στρώμα MAC παίζει το ρόλο της διεπαφής μεταξύ τους στρώματος λογικής ζεύξης δεδομένων και του φυσικού στρώματος του δικτύου. Επίσης προσομοιώνει full-duplex λογικά κανάλια επικοινωνίας μέσα σε ένα δίκτυο πολλαπλών σημείων (multipoint network). Το κανάλι αυτό μπορεί να παρέχει υπηρεσία unicast, multicast και broadcast επικοινωνίας.

Οι μηχανισμοί ελέγχου πρόσβασης μέσου διακρίνουν τα πρωτόκολλα σε δύο μεγάλες κατηγορίες: σε αυτά τα οποία δεν προκαλούνται συγκρούσεις πακέτων (conflict free) και σε αυτά τα οποία οι κόμβοι συναγωνίζονται για την πρόσβαση στο μέσο (contention based).

### 1.4.1 Πρωτόκολλα χωρίς συγκρούσεις

Τα πρωτόκολλα αυτά εξασφαλίζουν επιτυχή μετάδοση δεδομένων, με το να κατανέμουν στατικά ή δυναμικά πόρους του δικτύου, για να εδραιώσουν ένα λογικό κανάλι επικοινωνίας μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη. Βρίσκουν κύρια εφαρμογή στις κυψελωτές κινητές επικοινωνίες και ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας των καναλιών αυτών χωρίζονται στα FDMA, TDMA, CDMA.

#### *1.4.1.1 Frequency Division Multiple Access*

Η μέθοδος διαίρεσης συχνότητας για πολλαπλή πρόσβαση αποδίδει στον κάθε χρήστη μια ή περισσότερες προσωπικές μπάντες συχνοτήτων από το συνολικό φάσμα που χρησιμοποιείται. Το FDMA έχει το πλεονέκτημα πως δεν είναι ευάλωτο σε προβλήματα χρονισμού και καθώς μια προκαθορισμένη συχνότητα είναι διαθέσιμη καθ' όλη η διάρκεια της επικοινωνίας, δεν υπάρχει η ανάγκη για κβάντιση των δεδομένων σε πακέτα (συνεχόμενη ροή δεδομένων είναι εφικτή). Η αποστολή και η λήψη δεδομένων γίνονται σε διαφορετικές συχνότητες και για τον λόγο αυτό συστήματα που λειτουργούν με FDMA απαιτούν στον πομποδέκτη τους φίλτρα υψηλών προδιαγραφών σε αντίθεση με συστήματα TDMA και CDMA.

#### *1.4.1.2 Time Division Multiple Access*

Στη μέθοδο διαίρεσης χρόνου για πολλαπλή πρόσβαση, πολλοί χρήστες μπορούν να μοιράζονται το ίδιο κανάλι συχνότητας με το να διαιρείται το σήμα σε διαφορετικές χρονοσχισμές. Οι χρήστες μεταδίδουν το δεδομένα ο ένας μετά τον άλλο με συνεχή και ταχεία διαδοχή χρησιμοποιώντας τις προσωπικές τους χρονοσχισμές. Αυτό επιτρέπει σε πολλαπλούς σταθμούς να μοιράζονται το ίδιο μέσο ενώ παράλληλα να χρησιμοποιούν μονάχα ένα τμήμα του παρεχόμενου φάσματος. Το TDMA χρησιμοποιείται σε κυψελωτά συστήματα δεύτερης γενιάς (GSM, PDC, iDEN), στα σύγχρονα φορητά τηλέφωνα τεχνολογίας DECT καθώς και στα δορυφορικά συστήματα.

Το TDMA προσφέρει ακόμα το πλεονέκτημα των εύκολων μεταγωγών και εξοικονομεί ενέργεια στον πομποδέκτη, αφού αυτός ξέρει ότι χρειάζεται να ακούει για μετάδοση μονάχα τις χρονικές στιγμές που συμπίπτουν με τις χρονοσχισμές του. Ένα μειονέκτημα των TDMA συστημάτων είναι η δημιουργία παρεμβολών σε μια συχνότητα άμεσα συνδεδεμένη με τη χρονοσχισμή. Η παρεμβολή αυτή είναι και ο θόρυβος που ακούγεται όταν μια TDMA συσκευή (π.χ. κινητό τηλέφωνο) τοποθετηθεί κοντά σε ένα ραδιόφωνο ή σε ηχεία. Τέλος ένα ακόμα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο νεκρός χρόνος μεταξύ των χρονοσχισμών που παραμένει ανεκμετάλλευτος.

### 1.4.1.3 Code Division Multiple Access

Η τεχνική CDMA επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μεταδίδουν ταυτόχρονα το σήμα πληροφορίας τους στο ίδιο εύρος ζώνης εκμεταλλευόμενη την τεχνολογία απλωμένου φάσματος. Το βασικό χαρακτηριστικό της είναι ότι το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος (εύρος ζώνης ραδιοσυχνοτήτων –RF-) είναι πολλαπλάσιο από αυτό που απαιτείται για την μετάδοση του σήματος πληροφορίας συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχήματα μετάδοσης που δεν υιοθετούν την τεχνική αυτή. Για την εξάπλωση του φάσματος χρησιμοποιούνται ομάδες ή σύνολα ακολουθιών κώδικα (code sequences) που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες στατιστικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με την τεχνική CDMA, σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία συγκεκριμένη ακολουθία από ένα σύνολο ακολουθιών. Απώτερος σκοπός της χρήσης ακολουθιών κώδικα είναι η ελαχιστοποίηση της παρεμβολής που εμφανίζεται από τους υπόλοιπους χρήστες του συστήματος (Multiple Access Interference, MAI). Η ακολουθία αυτή κωδικοποιεί το σήμα της πληροφορίας κάθε χρήστη και ακριβώς επειδή το εύρος ζώνης της είναι πολλαπλάσιο του εύρους ζώνης του σήματος πληροφορίας, το τελικό σήμα διαθέτει απλωμένο φάσμα.

Μέσω της διαδικασίας αυτής, ο δέκτης αποκωδικοποιεί μόνο το επιθυμητό από το συνολικό λαμβανόμενο σήμα, έχοντας στη διάθεσή του ένα αντίγραφο της ακολουθίας χρήστη προκειμένου να εξάγει το επιθυμητό σήμα με αντίτιμο την εμφάνιση παρεμβολής από τους υπόλοιπους χρήστες (inter-user interference). Για τους υπόλοιπους χρήστες του συστήματος το σήμα αυτό εμφανίζεται ως θόρυβος

### 1.4.2 Πρωτόκολλα συναγωνισμού για πρόσβαση στο μέσο

Στα πρωτόκολλα αυτού του τύπου είναι απαραίτητη η προδιαγραφή ορισμένων κανόνων αποφυγής και επίλυσης συγκρούσεων στο δίκτυο καθώς όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι για να μεταδώσουν τα δεδομένα τους. Η τεχνική που εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο ονομάζεται *Παρατήρηση του μέσου (Carrier Sensing)* ενώ τα πρωτόκολλα που την ενσωματώνουν ονομάζονται CSMA πρωτόκολλα (Carrier Sense Multiple Access Protocols).

Η παρατήρηση του μέσου περιγράφει το γεγονός στο οποίο ένας αποστολέας προτού ξεκινήσει την αποστολή των δεδομένων του, ακούει για τυχόν άλλα κύματα εκπομπής στο μέσο. Δηλαδή, προσπαθεί πρώτα να εντοπίσει την παρουσία κωδικοποιημένου σήματος από άλλον κόμβο. Εάν κάποιο σήμα ανιχνευθεί, ο κόμβος περιμένει να τελειώσει η τρέχουσα αυτή μετάδοση και έπειτα ξεκινάει την δική του. Τα πιο διαδεδομένα CSMA πρωτόκολλα στα ασύρματα δίκτυα είναι τα IEEE 802.11a/b/g/n

## 1.5 Πρωτόκολλα πρόσβασης μέσου για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Γενικά σε ένα αυτο-οργανούμενο ασύρματο δίκτυο, το πρωτόκολλο πρόσβασης μέσου πρέπει να επιτυγχάνει τους παρακάτω δύο κύριους στόχους. Θα πρέπει, αρχικά, να είναι ικανό να δημιουργήσει την δικτυακή υποδομή για την επικοινωνία όλων των κατανεμημένων ασύρματων συσκευών και κατά δεύτερο να μπορεί να διανέμει τους πόρους με δίκαιο κι αποδοτικό τρόπο.

Όπως έχει όμως αναφερθεί, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν κάποια μοναδικά χαρακτηριστικά, τα οποία καθιστούν την χρήση υπαρχόντων πρωτοκόλλων μη αποδοτική. Τα δίκτυα αισθητήρων είναι συνήθως δίκτυα πολλαπλών βημάτων ενώ στα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα οι ασύρματοι κόμβοι επικοινωνούν, συνήθως, απευθείας με τον σταθμό βάσης. Επιπλέον, στα δίκτυα αυτά η παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας, αποτελεί πρωταρχικό στοιχείο κατά τον σχεδιασμό τους, ενώ στα δίκτυα αισθητήρων, η μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας κατέχει αυτόν τον ρόλο, και μετρικές όπως ρυθμαπόδοση και καθυστέρηση στη μετάδοση έχουν δευτερεύοντα ρόλο. Τέλος, οι εφαρμογές για τις οποίες χρησιμοποιούνται τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αποτελούνται από αισθητήρες οι οποίοι λειτουργούν από κοινού για να επιτύχουν ένα κοινό σκοπό, οπότε η κατά κόμβο δικαιοσύνη δεν αποτελεί σχεδιαστικό στόχο όπως στα συμβατικά κυψελωτά δίκτυα.



Για όλους τους παραπάνω λόγους, η έρευνα έχει προσανατολιστεί σε σχεδιασμό πρωτοκόλλων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Για τον σχεδιασμό ενός αποδοτικού πρωτοκόλλου πρόσβασης μέσου για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, πρέπει κανείς να λάβει υπ' όψιν του τις παρακάτω παραμέτρους. Η πρώτη αφορά στην ενεργειακή απόδοση. Η πηγή ενέργειας των αισθητήρων είναι η μπαταρία, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολο έως αδύνατο να αλλαχθεί ή να επαναφορτιστεί. Μάλιστα, στο άμεσο μέλλον προβλέπεται πως το κόστος μερικών αισθητήρων κόμβων θα είναι τέτοιο που θα προτιμάται η αντικατάστασή τους σε σχέση με την επαναφόρτιση της μπαταρίας τους. Έτσι λοιπόν η παράταση της ζωής του δικτύου είναι ένα κρίσιμο ζήτημα για κόμβους τέτοιας φύσεως. Μια δεύτερη σημαντική παράμετρος είναι η δυνατότητα προσαρμογής στις αλλαγές του μεγέθους του δικτύου, της πυκνότητας των κόμβων και της τοπολογίας. Κάποιοι κόμβοι μπορεί να σταματήσουν να λειτουργούν, καινούριοι μπορεί να προστεθούν αργότερα και κάποιοι άλλοι μπορεί να μετακινηθούν σε διαφορετική θέση. Η τοπολογία του δικτύου μεταβάλλεται και αυτή συναρτῆσει του χρόνου για αρκετούς λόγους. Άλλες παράμετροι είναι οι δικαιοσύνη, η ρυθμαπόδοση, η χρησιμοποίηση του καναλιού και η καθυστέρηση, οι οποίες σε αντίθεση με τα ασύρματα δίκτυα μετάδοσης φωνής και δεδομένων παίζουν δευτερεύοντα ρόλο στα δίκτυα αισθητήρων.

Μια δημοφιλής τεχνική για την εξοικονόμηση της ενέργειας αποτελεί η τεχνική του περιοδικού «ύπνου» στους κόμβους. Ως ύπνος κόμβου ορίζεται η παύση λειτουργίας του πομποδέκτη του αισθητήρα ο οποίος αποτελεί συνήθως και τον κύριο παράγοντα κατανάλωσης ενέργειας στη συσκευή. Σε ορισμένες εφαρμογές ύπνος μπορεί να θεωρηθεί η παύση λειτουργίας ολόκληρου του αισθητήρα κόμβου.

Οι τεχνικές αυτές έχουν το πλεονέκτημα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας αλλά αυξάνουν την μέση καθυστέρηση κατά την συλλογή των πακέτων στο κέντρο συλλογής, λόγω της καθυστέρησης που υπεισέρχεται από την κατάσταση ύπνου. Πιο αναλυτικά έχουμε ότι σε ένα δίκτυο πολλαπλών βημάτων, για κάθε πακέτο το οποίο κινείται μέσα σε αυτό υπεισέρχονται σε κάθε βήμα οι εξής καθυστερήσεις:

- Η *καθυστέρηση λόγω παρατήρησης καναλιού* συμβαίνει καθώς ο αποστολέας παρατηρεί το κανάλι για να μεταδώσει τα πακέτα του. Η τιμή της υπολογίζεται από το μέγεθος του παραθύρου συναγωνισμού (contention window).
- Η *back-off καθυστέρηση* συμβαίνει όταν αποτύχει η παρατήρηση του μέσου, δηλαδή στην περίπτωση που ο κόμβος καταλάβει ότι υπάρχει ήδη μια ενεργή μετάδοση στον γειτονικό του χώρο ή υπάρξει σύγκρουση (collision).
- Η *καθυστέρηση μετάδοσης* καθορίζεται από το εύρος ζώνης του καναλιού, το μήκος πακέτου και την κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται.
- Η *καθυστέρηση διάδοσης* καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη. Στα δίκτυα αισθητήρων, η απόσταση μεταξύ των κόμβων είναι αρκετά μικρή και επομένως μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.
- *Καθυστέρηση επεξεργασίας*. Ο παραλήπτης χρειάζεται να επεξεργαστεί το πακέτο προτού το προωθήσει στο επόμενο βήμα. Η καθυστέρηση αυτή εξαρτάται κυρίως από την υπολογιστική ισχύ του κόμβου και την απόδοση των αλγορίθμων επεξεργασίας δεδομένων που χρησιμοποιεί το δίκτυο.
- *Καθυστέρηση λόγω αναμονής*. Εξαρτάται από το φορτίο κίνησης και σε μεγάλα φορτία η καθυστέρηση αυτή είναι και η επικρατούσα.
- *Καθυστέρηση λόγω κατάστασης ύπνου*. Όλες οι παραπάνω καθυστερήσεις είναι έμφυτες σε ένα δίκτυο πολλαπλών βημάτων το οποίο χρησιμοποιεί MAC πρωτόκολλα συναγωνισμού του μέσου. Στα πρωτόκολλα όμως τα οποία επιλέγουν την χρήση της τεχνικής περιοδικού ύπνου συναντάμε επιπλέον καθυστέρηση εξαιτίας του περιοδικού ύπνου των κόμβων. Όταν ο αποστολέας έχει ένα πακέτο να στείλει, θα πρέπει να περιμένει μέχρις ότου ο παραλήπτης ξυπνήσει. Η καθυστέρηση αυτή λοιπόν ονομάζεται καθυστέρηση ύπνου καθώς προκαλείται από τον ύπνο του παραλήπτη.

Μια εξίσου δημοφιλής τεχνική για πρωτόκολλα προσανατολισμένα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι αυτή κατά την οποία τα πρωτόκολλα ενσωματώνουν TDMA τεχνικές. Τα πρωτόκολλα αυτά χωρίζουν το χρόνο σε πλαίσια (frames) και κάθε πλαίσιο σε χρονοσχισμές. Κάθε κόμβος έχει ένα σύνολο χρονοσχισμών για να μεταδώσει στους γείτονες του ακολουθώντας το χρονοδιάγραμμά του. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ πακέτων γειτονικών κόμβων. Το κύριο μειονέκτημα όμως αυτών των μεθόδων είναι η απαίτηση για αυστηρό συγχρονισμό καθώς επίσης ότι δεν είναι άμεσα επεκτάσιμα. Με την εισαγωγή νέων κόμβων στο δίκτυο καθώς και με την αφαίρεση αυτών, νέα χρονοδιαγράμματα πρέπει να υπολογιστούν.

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων πρωτοκόλλων, τόσο αυτών που χρησιμοποιούν μεθόδους ακρόασης/ύπνου όσο κι αυτών που βασίζονται στην λογική των χρονοσχισμών.

## 1.6 Παράγοντες Σύγκρισης Πρωτοκόλλων

Οι κυριότεροι παράγοντες που είναι σε θέση να κρίνουν ένα πρωτόκολλο ως αποδοτικό ή μη είναι οι εξής :

### 1.6.1 Κατανάλωση ενέργειας ( Energy Consumption )

Το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται στο δίκτυο ή κατά μέσο όρο σε ένα κόμβο κατά τη διάρκεια των βασικών διαδικασιών επικοινωνίας, δηλαδή κατά τη μετάδοση και τη λήψη πακέτων (ελέγχου ή δεδομένων).

### 1.6.2 Καθυστέρηση ( Latency )

Ο χρόνος εξυπηρέτησης ενός πακέτου δεδομένων, ο οποίος ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ένα πακέτου 'εισέρχεται' στο σύστημα και μένει στην αναμονή για μετάδοση μέχρι και την ορθή λήψη αυτού από το προοριζόμενο παραλήπτη.

### **1.6.3 Ρυθμαπόδοση ( Throughput)**

Η εκμετάλλευση των καναλιών, το μέρος δηλαδή της συνολικής χωρητικότητας του καναλιού (του εύρους ζώνης) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση δεδομένων. Εναλλακτικά υπολογίζεται το ποσοστό επιτυχών αποστολών (Packet Delivery) που αποτελεί ένδειξη της απόδοσης του πρωτοκόλλου στο εφαρμοζόμενο δίκτυο.

### **1.6.4 Δικαιοσύνη (Fairness)**

Η δυνατότητα του πρωτοκόλλου να δίνει σε κάθε κόμβο με δίκαιο τρόπο ένα μέρος της χωρητικότητας του καναλιού. [1, 13, 22, 29]

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

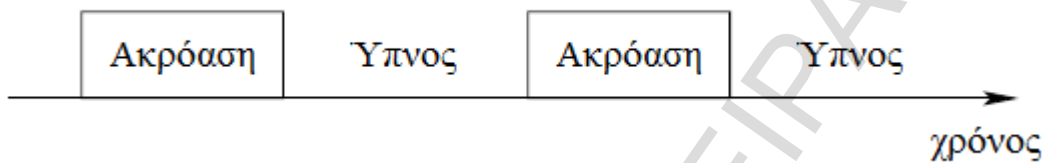
## Κεφάλαιο 2: S-MAC

Το πρωτόκολλο SMAC προσπαθεί να περιορίσει την σπατάλη ενέργειας στο δίκτυο, θυσιάζοντας την δικαιοσύνη σε κάθε βήμα (per hop fairness) και προσθέτοντας ορισμένη καθυστέρηση στο δίκτυο. Στα κλασσικά ασύρματα δίκτυα μετάδοσης φωνής και δεδομένων το per-hop MAC level fairness είναι σημαντικό ζήτημα διότι ο κάθε χρήστης διεκδικεί το μέσο με ίση πιθανότητα και για ίσο χρόνο. Παρόλα αυτά στα δίκτυα αισθητήρων όλοι οι κόμβοι συνεργάζονται για την εκπλήρωση μιας κοινής εργασίας. Μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ένας κόμβος μπορεί να έχει πολλά περισσότερα δεδομένα προς αποστολή σε σχέση με τους υπόλοιπους. Σε μια τέτοια περίπτωση - εφόσον η απόδοση στο στρώμα εφαρμογής διατηρείται - η δικαιοσύνη δεν είναι τόσο σημαντική. Στο SMAC τα μεγάλα μηνύματα κατακερματίζονται σε μικρά κομμάτια και αποστέλλονται σε μια ριπή (burst). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την χρήση του μέσου για περισσότερη ώρα από κόμβους που έχουν περισσότερα δεδομένα να στείλουν. Κάτι τέτοιο είναι άδικο από την πλευρά του per-hop MAC για τους κόμβους που έχουν μικρότερα πακέτα προς αποστολή, καθώς θα περιμένουν αρκετή ώρα για την αποστολή των μεγαλύτερων. Η τεχνική αυτή όμως εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια διότι ελαττώνει την καθυστέρηση που υπεισέρχεται από την ανταλλαγή πακέτων ελέγχου (control overhead).

Ο παράγοντας του latency μπορεί να θεωρηθεί σημαντικός ή μη, διότι εξαρτάται άμεσα από την εφαρμογή που τρέχει και τους σκοπούς που αυτή εξυπηρετεί. Κατά τη διάρκεια που οι αισθητήρες των κόμβων παραμένουν αδρανείς, παρατηρείται ελάχιστη ροή δεδομένων στο δίκτυο. Το latency που δεν ξεπερνά το ένα δευτερόλεπτο θεωρείται ασήμαντο και γι' αυτό μπορεί να θυσιάσει προς χάρην εξοικονόμησης ενέργειας. Το SMAC λοιπόν ενσωματώνει περιοδικές καταστάσεις ύπνου των κόμβων ανάμεσα στα διαστήματα αδρανούς ακρόασης (idle listening). Σε κατάσταση ύπνου, ο κόμβος θα σβήσει τον πομποδέκτη του εξοικονομώντας την ενέργεια που θα σπαταλούσε για idle listening. Είναι προφανές λοιπόν πως το latency μεγαλώνει καθώς ο αποστολέας πρέπει να περιμένει τον παραλήπτη να ξυπνήσει πριν του αποστείλει τα δεδομένα.

## 2.1 Βασική λειτουργία

Το βασικό μοντέλο λειτουργίας φαίνεται στην Εικόνα 3. Ο κάθε κόμβος κοιμάται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, έπειτα ξυπνάει και ακούει να δει εάν υπάρχει κάποιος γειτονικός κόμβος που θέλει να του μιλήσει. Όπως προαναφέρθηκε κατά τον ύπνο, ο κόμβος σβήνει τον πομποδέκτη του και ενεργοποιεί έναν μετρητή για να ξυπνήσει ξανά αργότερα.



*Εικόνα 3: Μοντέλο Λειτουργίας Ακρόασης/Ύπνου*

Το ποσοστό και η διάρκεια της ώρας ύπνου ή ακρόασης (listening), μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με το σενάριο της εφαρμογής. Χάριν απλότητας οι τιμές αυτές είναι ίδιες για όλους τους κόμβους.

Το μοντέλο του SMAC, εκτός των άλλων, απαιτεί και περιοδικό συγχρονισμό μεταξύ των γειτονικών κόμβων ώστε να διορθώνονται οι ατέλειες που προκύπτουν από τους διαφορετικούς ωρολογιακούς μηχανισμούς. Χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την απαλοιφή σφαλμάτων συγχρονισμού. Κατ' αρχάς, όλες οι ανταλλαγές μηνυμάτων ώρας, περιέχουν τιμές σχετικές και όχι απόλυτες. Δεύτερον, η περίοδος της ακρόασης (listening) είναι σημαντικά μεγαλύτερη των σφαλμάτων ρολογιού και του clock drift. Για παράδειγμα μια διάρκεια ακρόασης των 0.5s είναι πάνω από  $10^5$  φορές μεγαλύτερη ενός τυπικού clock drift. Συγκριτικά με TDMA σχήματα με πολύ στενές χρονοσχισμές (timeslots) το SMAC έχει πολύ πιο χαλαρές απαιτήσεις συγχρονισμού μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Όλοι οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να διαλέξουν το δικό τους χρονοδιάγραμμα ακρόασης/ύπνου. Για την μείωση όμως του control overhead, προτιμάται οι γειτονικοί κόμβοι να συγχρονίζονται μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να ακούν και να

κοιμούνται την ίδια ώρα. Θα πρέπει να σημειωθεί πως σε ένα multi-hop δίκτυο δεν είναι δυνατός ο συγχρονισμός όλων των γειτονικών κόμβων μεταξύ τους. Δύο γειτονικοί κόμβοι A και B θα πρέπει να έχουν διαφορετικά χρονοδιαγράμματα, εάν με την σειρά τους πρέπει να συγχρονιστούν με τους κόμβους C και D αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



*Εικόνα 4: Κόμβοι A, B, C, D Συγχρονισμένοι ανά δύο*

Οι κόμβοι ανταλλάζουν τα χρονοδιαγράμματά τους με το να τα διαφημίζουν σε όλους τους άμεσους γείτονές τους. Αυτό εξασφαλίζει πως όλοι οι γείτονες κόμβοι μπορούν να μιλήσουν μεταξύ τους ακόμα και αν ακολουθούν διαφορετικό χρονοδιάγραμμα. Για παράδειγμα στην Εικόνα 4, εάν ο κόμβος A θέλει να μιλήσει στον B, θα περιμένει μέχρις ότου ο B αρχίσει να ακούει. Εάν περισσότεροι του ενός γείτονες θέλουν να μιλήσουν σε έναν συγκεκριμένο κόμβο, θα πρέπει να διαγωνιστούν για το μέσο τη στιγμή που ο κόμβος θα ακούει. Ο μηχανισμός διεκδίκησης του μέσου είναι ίδιος με αυτόν στο IEEE 802.11, δηλ. χρησιμοποιώντας RTS (Request To Send) και CTS (Clear To Send) πακέτα. Ο κόμβος ο οποίος θα στείλει πρώτος το RTS πακέτο, είναι και αυτός που θα κερδίσει το μέσο και θα λάβει από τον παραλήπτη του ένα CTS πακέτο. Αμέσως μετά θα αρχίζει η μετάδοση των δεδομένων η οποία στο τέλος της συνοδεύεται από ένα πακέτο ACK σταλμένο από τον παραλήπτη των δεδομένων, στον αποστολέα προς επιβεβαίωση της επιτυχούς μετάδοσης.

Το μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι αυξάνεται η καθυστέρηση λόγω του περιοδικού ύπνου κάθε κόμβου. Επιπρόσθετα, η καθυστέρηση αθροίζεται σε κάθε βήμα. Έτσι λοιπόν ο περιορισμός της καθυστέρησης που επιβάλλει η εφαρμογή

που τρέχουν οι αισθητήρες κόμβοι, παίζει θεμελιώδη ρόλο στην επιλογή του ποσοστού του ύπνου σε σχέση με την κανονική λειτουργία.

## 2.2 Διαλέγοντας και διατηρώντας χρονοδιαγράμματα

Αρχικά κάθε κόμβος χρειάζεται να επιλέξει ένα χρονοδιάγραμμα και να το ανταλλάξει με τους γείτονες του. Ο κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα χρονοδιαγραμμάτων στον οποίο καταχωρεί τα χρονοδιαγράμματα όλων των γνωστών του γειτόνων. Ακολουθεί τα παρακάτω βήματα για να επιλέξει το χρονοδιάγραμμά του και να διαμορφώσει τον πίνακα του:

1. Ο κόμβος αρχικά ακούει για ένα συγκεκριμένο διάστημα. Εάν δεν ακούσει την ανακοίνωση χρονοδιαγράμματος από έναν άλλο κόμβο, διαλέγει τυχαία μια χρονική στιγμή για να κοιμηθεί και αμέσως διαφημίζει το χρονοδιάγραμμά του μέσα σε ένα μήνυμα SYNC, υποδεικνύοντας πως θα κοιμηθεί μετά από  $t$  δευτερόλεπτα. Ένας τέτοιος κόμβος ονομάζεται “συγχρονιστής”, διότι διαλέγει το χρονοδιάγραμμά του ανεξάρτητα και αναγκάζει άλλους κόμβους να συγχρονιστούν μαζί του.

2. Εάν ο κόμβος δεχτεί ένα χρονοδιάγραμμα από έναν γείτονα πριν προλάβει να επιλέξει το δικό του, το ακολουθεί ορίζοντάς το σαν το δικό του. Ένας τέτοιος κόμβος ονομάζεται “ακόλουθος”. Έπειτα, ο κόμβος αυτός περιμένει για ένα τυχαίο διάστημα  $t_d$  και διαφημίζει και αυτός το χρονοδιάγραμμα, υποδεικνύοντας πως θα κοιμηθεί σε χρόνο  $t - t_d$  δευτερόλεπτα. Η τυχαία καθυστέρηση χρησιμεύει στην αποφυγή συγκρούσεων έτσι ώστε πολλαπλοί ακόλουθοι που θα κινητοποιηθούν από τον ίδιο συγχρονιστή, να μην συγκρουστούν κατά την αναμετάδοση του χρονοδιαγράμματος.

3. Εάν ένας κόμβος λάβει ένα διαφορετικό χρονοδιάγραμμα αφ’ ότου έχει επιλέξει και μεταδώσει το δικό του, υιοθετεί και τα δύο (δηλ. προγραμματίζει τον εαυτό του ώστε να ξυπνάει την ώρα που ξυπνάει και ο γείτονας του και ο ίδιος). Τέλος, πριν κοιμηθεί διαφημίζει το χρονοδιάγραμμά του.



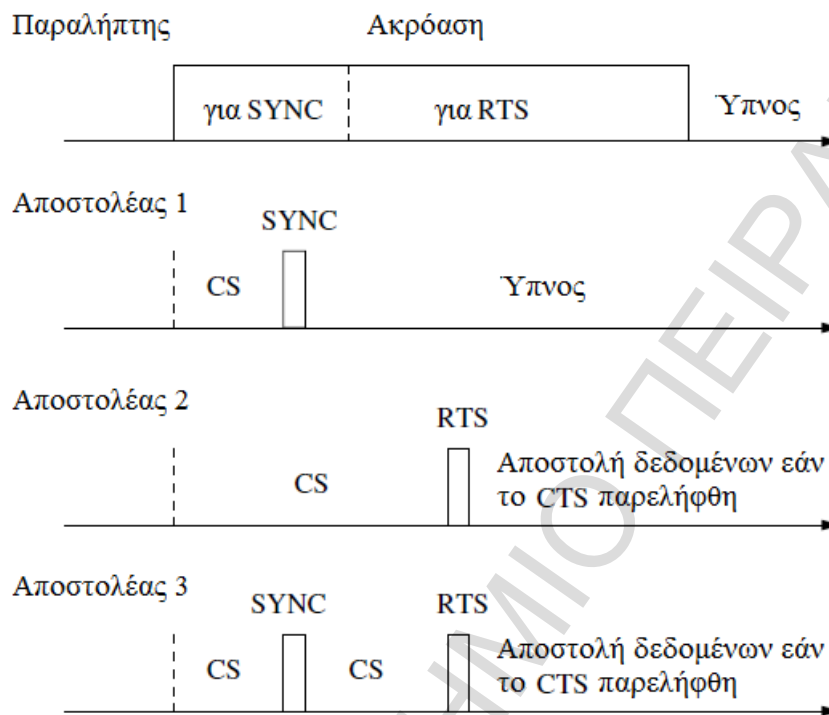
Παρατηρείται πως οι κόμβοι σπάνια υιοθετούν πολλαπλά χρονοδιαγράμματα καθώς προσπαθούν να ακολουθήσουν τα ήδη υπάρχοντα, πριν διαλέξουν ένα ανεξάρτητο. Από την άλλη μεριά, είναι πιθανόν κάποιοι γείτονες κόμβοι να αποτύχουν να ανακαλύψουν ο ένας τον άλλο στην αρχή λόγω συγκρούσεων στις ανακοινώσεις των χρονοδιαγραμμάτων. Θα μπορέσουν όμως να βρουν ο ένας τον άλλο στις μετέπειτα περιοδικές τους ακροάσεις.

### 2.3 Διατηρώντας τον συγχρονισμό

Το μοντέλο ακρόασης/ύπνου απαιτεί συγχρονισμό μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Παρότι μεγάλοι χρόνοι ακρόασης μπορούν να ανεχτούν αρκετό σφάλμα στους ωρολογιακούς μηχανισμούς, οι γείτονες κόμβοι χρειάζεται περιοδικά να ανανεώνουν τα μεταξύ τους χρονοδιαγράμματα για την πρόληψη μακροπρόθεσμου αθροιστικού σφάλματος. Η ανανέωση αυτή επιτυγχάνεται με την αποστολή ενός πακέτου SYNC. Το πακέτο SYNC είναι πολύ μικρό και περιέχει τη διεύθυνση του αποστολέα και την χρονική στιγμή του επόμενου ύπνου του. Η χρονική στιγμή του επόμενου ύπνου είναι σχετική με την στιγμή που ο αποστολέας ολοκληρώνει τη μετάδοση του πακέτου SYNC και συμπίπτει σχεδόν με τη στιγμή που οι παραλήπτες θα λάβουν το πακέτο (η καθυστέρηση λόγω μετάδοσης είναι μικρή). Οι παραλήπτες θα ρυθμίσουν τους μετρητές τους αμέσως μόλις λάβουν το πακέτο SYNC και θα κοιμηθούν όταν αυτοί σημάνουν.

Για να μπορεί ένας κόμβος να λαμβάνει τόσο πακέτα SYNC όσο και πακέτα δεδομένων, η διάρκεια της ακρόασης διαιρείται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι για την λήψη πακέτων SYNC και το δεύτερο για την λήψη πακέτων RTS όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Το κάθε μέρος χωρίζεται περαιτέρω σε πολλές χρονοσχισμές ώστε οι αποστολείς να επιδίδονται σε παρατήρηση του καναλιού. Για παράδειγμα, εάν ένας αποστολέας θέλει να στείλει ένα πακέτο SYNC, ξεκινά την παρατήρηση τη στιγμή που ο παραλήπτης αρχίζει να ακούει. Διαλέγει τυχαία μια χρονοσχισμή για να σταματήσει και εάν σε αυτό το διάστημα δεν έχει εντοπίσει άλλη μετάδοση, κερδίζει το μέσο και αμέσως στέλνει το SYNC πακέτο του. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στην περίπτωση πακέτων δεδομένων. Όλοι οι κόμβοι παρατηρούν το κανάλι προτού ξεκινήσουν τη μετάδοση ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις. Εάν κάποιος κόμβος

δεν καταφέρει να κερδίσει το μέσο, κοιμάται και ξυπνάει στον επόμενο κύκλο ακρόασης του παραλήπτη του. Τα πακέτα SYNC αποστέλλονται χωρίς τη χρήση RTS/CTS πακέτων. Τα πακέτα δεδομένων ακολουθούν την αλληλουχία του RTS/CTS/DATA/ACK μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη.



**ΣΧΗΜΑ 1:** Χρονική Συσχέτιση Τριών Πιθανών Καταστάσεων στο SMAC- δείχνει την χρονική συσχέτιση τριών πιθανών καταστάσεων στις οποίες ένας αποστολέας μεταδίδει σε έναν παραλήπτη, όπου CS σημαίνει carrier sense. Στο σχήμα ο αποστολέας 1 στέλνει μονάχα ένα πακέτο SYNC. Ο αποστολέας 2 θέλει να στείλει μονάχα δεδομένα και ο αποστολέας 3 στέλνει ένα πακέτο SYNC και ένα πακέτο RTS.

Κάθε κόμβος διαφημίζει περιοδικά στους γείτονές του πακέτα SYNC, ακόμα και αν δεν έχει κανέναν ακόλουθο. Αυτό επιτρέπει σε νέους κόμβους να ενσωματωθούν σε μια ήδη υπάρχουσα ομάδα γειτόνων. Ο καινούριος κόμβος ακολουθεί την προαναφερθείσα διαδικασία για να επιλέξει το χρονοδιάγραμμά του. Η πρωταρχική διάρκεια ακρόασης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε ο κόμβος αυτός να ακολουθήσει ένα ήδη υπάρχον χρονοδιάγραμμα πριν αποφασίσει να επιλέξει το δικό του ανεξάρτητο.

## 2.4 Σύγκρουση και άσκοπη λήψη πακέτων λόγω κρυφακούσματος (overhead)

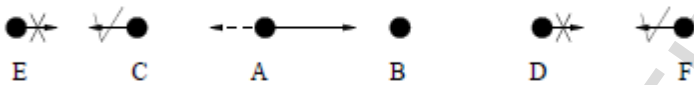
Η αποφυγή σύγκρουσης είναι μια βασική λειτουργία των MAC πρωτοκόλλων. Το S-MAC υιοθετεί ένα σύστημα συγχρονισμού (contention-based scheme). Είναι γνωστό ότι οποιοδήποτε πακέτο μεταδίδεται από έναν κόμβο, παραλαμβάνεται από όλους τους γείτονές του, ακόμη και αν μόνο ένας από αυτούς είναι ο επιδιωκόμενος δέκτης. Η άσκοπη λήψη πακέτων λόγω overhead καθιστά τα contention-based πρωτόκολλα λιγότερο αποτελεσματικά στον τομέα της ενέργειας σε σύγκριση με τα TDMA πρωτόκολλα. Γι' αυτό πρέπει οπωσδήποτε να αποφεύγονται.

### 2.4.1 Αποφυγή συγκρούσεων

Σε περίπτωση αποστολής μηνυμάτων από πολλούς κόμβους την ίδια χρονική στιγμή σε συγκεκριμένο δέκτη θα πρέπει να διεκδικήσουν το μέσο για την αποφυγή συγκρούσεων. Ανάμεσα με τα contention-based πρωτόκολλα το 802.11 είναι το αποδοτικότερο στην αποφυγή συγκρούσεων. Το S-MAC ακολουθεί παρόμοιες διαδικασίες συμπεριλαμβάνοντας τόσο την εικονική και την φυσική ανίχνευση όσο και την ανταλλαγή RTS/CTS πακέτων. Υπάρχει ένα πεδίο διάρκειας σε κάθε μεταδιδόμενο πακέτο το οποίο δείχνει πόσος χρόνος μετάδοσης απομένει. Έτσι λοιπόν εάν ένας κόμβος παραλαμβάνει ένα πακέτο το οποίο προοριζόταν για κάποιον άλλο κόμβο αμέσως γνωρίζει την χρονική διάρκεια που θα παραμείνει 'σιωπηλός'. Ο κόμβος καταγράφει αυτήν την τιμή σε μια μεταβλητή που ονομάζεται φορέας κατανομής δικτύου (network allocation vector-NAV) και καθορίζει έναν μετρητή γι' αυτήν. Κάθε φορά που ο μετρητής NAV ξεκινάει, ο κόμβος μειώνει την τιμή NAV μέχρι να φτάσει το μηδέν. Όταν λοιπόν ο κόμβος θέλει να στείλει δεδομένα κοιτάει πρώτα την τιμή NAV. Εάν η τιμή αυτή είναι μηδέν τότε καταλαβαίνει ότι το μέσο είναι απασχολημένο. Αυτό ονομάζεται εικονική ανίχνευση (virtual carrier sense). Η φυσική ανίχνευση (physical carrier sense) πραγματοποιείται στο φυσικό επίπεδο ακούγοντας πρώτα το κανάλι για πιθανές μεταδόσεις.

## 2.4.2 Άσκοπη λήψη πακέτων λόγω overhead

Το S-MAC προσπαθεί να αποφύγει το overhead αφήνοντας τους εμπλεκόμενους κόμβους να 'κοιμηθούν' μετά το άκουσμα ενός RTS ή CTS πακέτου. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι τα πακέτα δεδομένων είναι μεγαλύτερα από τα πακέτα ελέγχου η προσέγγιση αυτή αποτρέπει τους γειτονικούς κόμβους από το overhead μεγάλων πακέτων δεδομένων και των ακόλουθων ACKs.



Εικόνα 5: Ποιος θα 'κοιμηθεί' όταν ο A μεταδίδει στον B?

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα οι κόμβοι A,B,C,D,E,F αποτελούν ένα multi-hop δίκτυο όπου κάθε κόμβος μπορεί μόνο να ακούσει τον άμεσο του γείτονα-κόμβο. Υποθέτουμε ότι ο A στέλνει δεδομένα στον B. Το ερώτημα είναι ποιος από τους υπόλοιπους κόμβους θα 'κοιμηθεί'. Να θυμηθούμε ότι σύγκρουση συμβαίνει στον παραλήπτη. Είναι προφανές ότι για αρχή ο D πρέπει να 'κοιμηθεί' επειδή η εκπομπή του εμπλέκεται με την λήψη του B. Επίσης ο E και F δεν παρεμβάλουν και έτσι δεν χρειάζεται να 'κοιμηθούν'. Τι γίνεται με τον C όμως; Ο κόμβος C είναι δύο άλματα μακριά από τον B και η εκπομπή του δεν επηρεάζει την λήψη του B, οπότε είναι ελεύθερος να στείλει δεδομένα στον E. Ωστόσο όμως ο C δεν μπορεί να παραλάβει κάποια απάντηση από τον E π.χ. CTS ή δεδομένα επειδή η εκπομπή του E συγκρούεται με την μετάδοση του A στον C. Συνοπτικά όλοι οι άμεσοι γείτονες τόσο του αποστολέα όσο και του παραλήπτη πρέπει να 'κοιμούνται' μετά το άκουσμα ενός RTS/CTS πακέτου και μέχρι την ολοκλήρωση της μετάδοσης. Κάθε κόμβος διατηρεί την τιμή NAV ώστε να αναγνωρίζει την δραστηριότητα στην γειτονιά του. Όταν κάποιος κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο που προοριζόταν για άλλον κόμβο ενημερώνει την τιμή NAV ανάλογα με την διάρκεια του πακέτου. Μια ενδεχόμενη μη μηδενική NAV τιμή υποδηλώνει ότι υπάρχει μια ενεργή μετάδοση στην γειτονιά του. Όπως αναφέρθηκε και πριν η τιμή NAV μειώνεται κάθε φορά που ο μετρητής NAV ξεκινάει.

Επιπρόσθετα ο κόμβος πρέπει να 'κοιμάται' ώστε να αποφύγει την λήψη πακέτων λόγω overhead όταν η τιμή NAV δεν είναι μηδέν. Μπορεί να ξυπνήσει όταν η NAV του γίνει μηδέν.

## 2.5 Ανταλλαγή μηνυμάτων

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε τον μηχανισμό message passing ο οποίος χρησιμοποιείται για την μετάδοση μεγάλων μηνυμάτων τόσο από πλευράς χρόνου μετάδοσης όσο και από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας. Με τον όρο *μήνυμα* εννοούμε την συλλογή σημαντικών, συσχετισμένων μονάδων δεδομένων. Ο παραλήπτης συνήθως χρειάζεται να συλλέξει όλες τις μονάδες δεδομένων προτού εφαρμόσει in-network επεξεργασία ή συνένωση δεδομένων.

Τα μειονεκτήματα της μετάδοσης ενός μεγάλου μηνύματος σε ένα μεμονωμένο πακέτο είναι το μεγάλο κόστος επαναμετάδοσης του πακέτου έστω και αν είναι κατεστραμμένα λίγα bit κατά την διάρκεια της μετάδοσης. Ωστόσο, εάν διασπάσουμε ένα μεγάλο μήνυμα σε πολλά ανεξάρτητα μικρά πακέτα, θα πρέπει να υποστούμε το κόστος μεγάλου overhead και καθυστέρησης στη μετάδοση, λόγω των RTS και CTS πακέτων που πρέπει να συμμετάσχουν στην μετάδοση των επί μέρους τμημάτων.

Το πρωτόκολλο SMAC προτείνει τη διάσπαση ενός μεγάλου μηνύματος σε πολλά μικρά τεμάχια και την συνεχόμενη μετάδοσή τους. Μόνο ένα RTS και ένα CTS χρησιμοποιούνται και καταλαμβάνουν το μέσο για την μετάδοση όλων των τμημάτων. Κάθε φορά που ένα τμήμα μεταδοθεί, ο αποστολέας περιμένει για ένα ACK από τον παραλήπτη. Εάν δεν λάβει το ACK θα περιμένει για ένα χρονικό διάστημα και κατόπιν θα επαναμεταδώσει το τμήμα που δεν επιβεβαιώθηκε.

Όπως και προηγουμένως, όλα τα πακέτα εμπεριέχουν πεδίο διάρκειας, το οποίο τώρα δείχνει το χρόνο που απαιτείται από όλα τα υπολειπόμενα τμήματα και ACK πακέτα. Εάν ένας γειτονικός κόμβος ακούσει ένα RTS ή CTS πακέτο, θα πέσει για ύπνο για όσο χρόνο απαιτείται για να μεταδοθούν όλα τα τμήματα του μηνύματος δεδομένων. Επίσης, με αυτό τον τρόπο εάν ένας κόμβος ξυπνήσει στη διάρκεια της

μετάδοσης ή εισέλθει στο δίκτυο ξαφνικά, τότε θα πέσει για ύπνο ασχέτως αν είναι γείτονας του αποστολέα ή του παραλήπτη. Εάν ένα πακέτο χτυπηθεί από θόρυβο, οι γείτονες που κοιμούνται δεν θα το αντιληφθούν αμέσως. Θα το αντιληφθούν όμως μόλις ξυπνήσουν και έτσι θα παρατείνουν τον ύπνο τους ανάλογα με την επιπλέον διάρκεια που απαιτείται μέχρι να ολοκληρωθεί η μετάδοση του μηνύματος.

Ο σκοπός που χρησιμοποιείται ACK πακέτο μετά από την μετάδοση κάθε τμήματος του μηνύματος είναι για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα του *hidden terminal* στην περίπτωση που ένας κόμβος ξυπνήσει πρόωρα ή εισαχθεί στο δίκτυο κάποια τυχαία χρονική στιγμή. Εάν ο κόμβος είναι γείτονας μόνο του παραλήπτη αλλά όχι του αποστολέα, δεν θα αντιληφθεί τα πακέτα που στέλνει ο αποστολέας στον παραλήπτη. Εάν ο παραλήπτης δεν στέλνει ACK πακέτα συχνά, ο νέος κόμβος μπορεί λανθασμένα να θεωρήσει, μέσω της αίσθησης φέροντος, ότι το μέσο είναι ελεύθερο. Εάν ξεκινήσει μετάδοση, θα συγκρουστεί με την λήψη του παραλήπτη.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι και το IEEE 802.11 υποστηρίζει την διάσπαση μηνυμάτων. Στην περίπτωση αυτή τα RTS και CTS δεσμεύουν το μέσο μόνο για το πρώτο τμήμα δεδομένων και το πρώτο ACK. Το πρώτο τμήμα και ACK δεσμεύουν το μέσο για το δεύτερο τμήμα και ACK κ.ο.κ. Για κάθε γειτονικό κόμβο αφού λάβει ένα τμήμα και ένα ACK, γνωρίζει ότι υπάρχει ένα ακόμα τμήμα για να μεταδοθεί. Συνεπώς θα πρέπει να συνεχίσει να ακούει μέχρις ότου όλα τα τμήματα μεταδοθούν. Και εδώ, το να ακούν συνεχώς οι κόμβοι αποτελεί σπατάλη ενέργειας για δίκτυα όπου οι πόροι ενέργειας είναι περιορισμένοι.

Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 έχει σχεδιαστεί με κύρια προτεραιότητα την δίκαιη αντιμετώπιση των κόμβων. Εάν ο αποστολέας δεν λάβει το ACK για ένα τμήμα, θα πρέπει να διακόψει τη μετάδοση και να διεκδικήσει πάλι το μέσο, ώστε όλοι οι κόμβοι να αποκτήσουν ευκαιρία να μεταδώσουν. Αυτή η τεχνική μπορεί να προκαλέσει μεγάλη καθυστέρηση εάν ο παραλήπτης χρειάζεται ολόκληρο το μήνυμα ώστε να πραγματοποιήσει επεξεργασία. Αντίθετα, με την τεχνική message passing ο χρόνος μετάδοσης του αποστολέα επεκτείνεται ώστε να επαναμεταδοθεί το χαμένο

τμήμα, πράγμα που συνεπάγεται λιγότερη διεκδίκηση και καθυστέρηση. Το πρωτόκολλο S-MAC θέτει έναν περιορισμό στο πόσες επεκτάσεις μπορούν να γίνουν λόγω θορύβου η κακής ποιότητας ζεύξης με τον παραλήπτη. [7,23]

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

## Κεφάλαιο 3: B-MAC

Το B-MAC (Berkeley Media Access Control) όπως και τα υπόλοιπα πρωτόκολλα πρέπει να ικανοποιούν κάποιους στόχους όπως λειτουργίες χαμηλής κατανάλωσης, αποτελεσματική αποφυγή συγκρούσεων, απλή υλοποίηση κ.α. Το B-MAC είναι ένα διαμορφωμένο πρωτόκολλο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και αποτελεί το προεπιλεγμένο MAC πρωτόκολλο για αισθητήρες στο λειτουργικό σύστημα TinyOS.

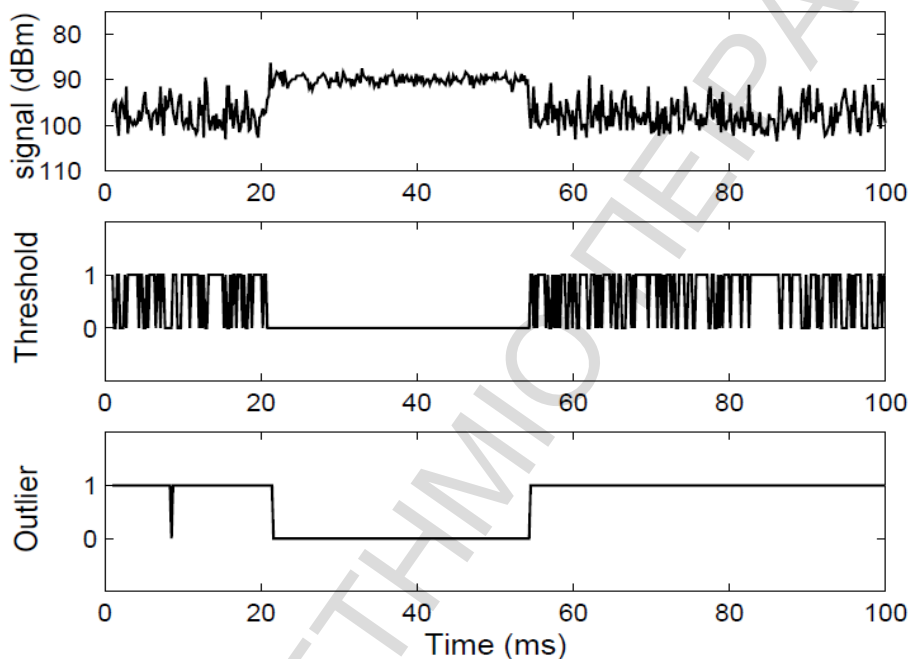
Το πρωτόκολλο αυτό είναι βασισμένο στο CSMA (Carrier Sense Multiple Access) για αποφυγή των συγκρούσεων και επιπρόσθετα χρησιμοποιεί αλγορίθμους οπισθοχώρησης (back-off). Για να είναι αξιόπιστο το πρωτόκολλο, απαιτείται αποστολή επιβεβαιώσεων (acknowledgements) και δεν διαθέτει μηχανισμό RTS/CTS για να συγχρονίζονται οι κόμβοι όπως συμβαίνει στο S-MAC. Σε αντίθεση, το B-MAC πρωτόκολλο χρησιμοποιεί μηχανισμό εκτίμησης ελεύθερων καναλιών (*Clear Channel Assessment-CCA*), back-off πακέτα για την διαχείρισή τους και άκουσμα χαμηλής κατανάλωσης (*Low Power Listening-LPL*) για επικοινωνία χαμηλής κατανάλωσης.

### 3.1 Clear Channel Assessment - CCA

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ο τρόπος που επιλέγεται πότε θα χρησιμοποιηθεί το κανάλι αφού διαφέρει αρκετά από άλλα MAC πρωτόκολλα. Συγκεκριμένα όταν γνωρίζουμε ότι το κανάλι δεν χρησιμοποιείται, καταγράφεται η ισχύς του θορύβου στο κανάλι. Αυτές οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε μία FIFO ουρά, που αποθηκεύει μέχρι και 10 μετρήσεις, των οποίων υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Η τρέχουσα τιμή του θορύβου υπολογίζεται ως συνάρτηση του μέσου όρου και της προηγούμενης τιμής του θορύβου. Με βάση την μέτρηση αυτή το B-MAC είναι σε θέση να ανιχνεύει αξιόπιστα πότε το κανάλι χρησιμοποιείται και πότε όχι συγκρίνοντας την τρέχουσα τιμή ισχύος τους σήματος με τον υπολογισμένο θόρυβο. Η χρήση ενός παρατεταμένου προοιμίου συμβάλλει στη μείωση του χρόνου άεργης ακρόασης ενώ σε περίπτωση που ο ασύρματος ξυπνήσει και δε λάβει κάποιο



προοίμιο επιστρέφει σε κατάσταση ύπνου. Το γεγονός όμως ότι η διεύθυνση του επιθυμητού παραλήπτη εμπεριέχεται στην κεφαλίδα του πακέτου δεδομένων, οδηγεί σε έντονα φαινόμενα overhearing ειδικά σε μεγάλα δίκτυα. Και αυτό γιατί οι ασύρματοι όσον κόμβων είναι σε ενεργή κατάσταση παραμένουν ανοιχτοί μέχρι τη λήψη του πακέτου δεδομένων για να αντιληφθούν αν το πακέτο προορίζεται γι' αυτούς. Αυτό οδηγεί σε περιττή κατανάλωση ενέργειας, μη επιθυμητή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

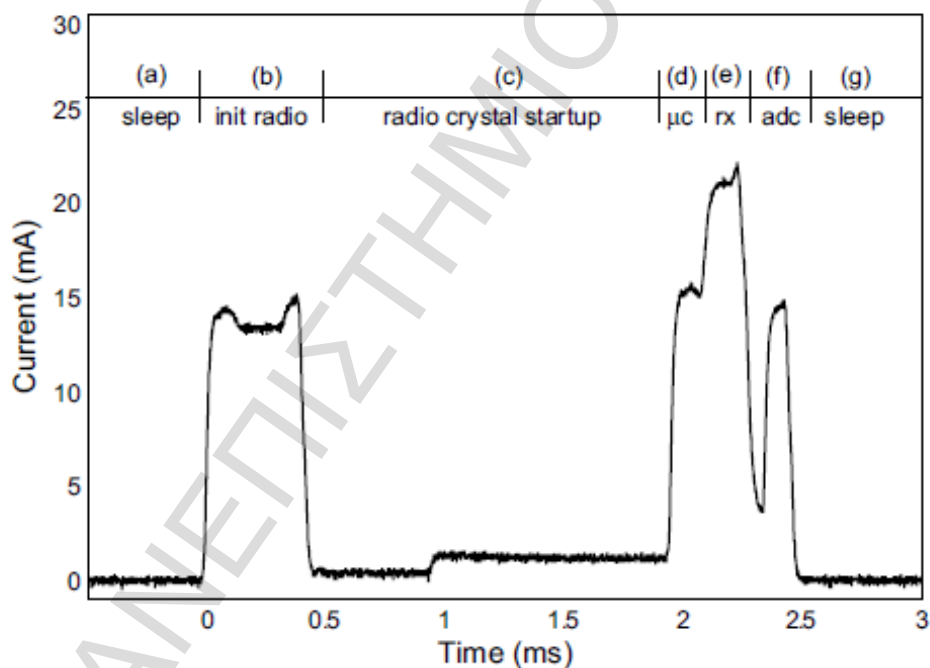


*Εικόνα 6: Παρουσιάζεται η αποδοτικότητα του CCA σε ένα τυπικό ασύρματο κανάλι. Στο άνω γράφημα απεικονίζονται τα ίχνη της ισχύος του σήματος. Ένα πακέτο παραλαμβάνεται μεταξύ 22 και 54 ms. Το μεσαίο γράφημα απεικονίζει τα αποτελέσματα ενός CCA αλγόριθμου. Η ένδειξη 1 συμβολίζει ότι το κανάλι είναι καθαρό, ενώ η ένδειξη 0 ότι είναι χρησιμοποιείται. Το κάτω γράφημα παρουσιάζει τα αποτελέσματα ενός αλγορίθμου ανίχνευσης ακραίων τιμών.*

### 3.2 Low Power Listening-LPL

Το B-MAC βελτιώνει την αρχική ιδέα του CSMA ούτως ώστε να επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας. Το καταφέρνει αυτό βοηθώντας τον μηχανισμό CSMA να αντιλαμβάνεται πότε πρέπει να ακούει το μέσο χωρίς να συγχρονίζονται οι κόμβοι. Συγκεκριμένα απενεργοποιείται ο ασύρματος (radio) των κόμβων και ανά κάποια χρονική περίοδο ενεργοποιείται για να γίνει έλεγχος αν χρησιμοποιείται το μέσο. Αν

ναι, τότε ο κόμβος λαμβάνει ένα προοίμιο (preamble) που τον ενημερώνει ότι θα γίνει αποστολή ακόμη και αν δεν προορίζεται για αυτόν. Όταν θα γίνει η μετάδοση του μηνύματος γίνεται έλεγχος στο κανάλι εάν είναι ελεύθερο. Εάν είναι, τότε το μήνυμα μεταδίδεται, αλλιώς απενεργοποιείται ο ασύρματος και θα ενεργοποιηθεί ξανά μετά από το πέρας της χρονικής περιόδου οπισθοχώρησης (backoff) που έθεσε ο κόμβος. Με άλλα λόγια οι κόμβοι «κοιμούνται» για κάποιο χρονικό διάστημα. Μετά το πέρας αυτού του διαστήματος οι κόμβοι «ξυπνούν» και αφουγκράζονται το δίκτυο. Αν κάποιος κόμβος θέλει να στείλει κάποιο πακέτο τότε θα πρέπει να στείλει ένα προοίμιο προς όλους τους κόμβους για να γνωρίζουν ότι θα γίνει αποστολή και να μείνουν «ξύπνιοι». Αν δεν θα γίνει αποστολή πακέτου δηλαδή αν οι κόμβοι δεν ακούσουν κάποιο προοίμιο μετά από κάποιο χρόνο (timeout) τότε οι κόμβοι «ξανακοιμούνται». Η πιο πάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται καθ' όλη την διάρκεια που παραμένει ενεργό το δίκτυο.



*Εικόνα 7: Όταν ενεργοποιείται ο ασύρματος του κόμβου (radio), ο κόμβος πρέπει να εκτελέσει μια σειρά εργασιών. Πρώτα ξεκινά σε κατάσταση ύπνου (sleep state) (a) και έπειτα ενεργοποιείται ο ασύρματος (b). Ο κόμβος ξεκινά την παραμετροποίηση του ασυρμάτου και την φάση startup του ασύρματος. Η φάση αυτή (c) αναμένει για σταθεροποίηση του ταλαντωτή. Με την σταθεροποίηση, ο ασύρματος μεταβαίνει σε κατάσταση λήψης (d). Μετά τη χρονική διάρκεια αυτής της μετάβασης μπαίνει τελικά σε κατάσταση λήψης (e) και η δειγματοληψία της ισχύος του παραλαμβανόμενου σήματος μπορεί να ξεκινήσει. Όταν είναι επαρκής ο ασύρματος απενεργοποιείται και αναλύονται οι τιμές (f). Με το LPL, αν δεν υπάρχει κάποια κινητικότητα στο κανάλι, ο κόμβος επιστρέφει σε κατάσταση ύπνου (g).*

Η διαδικασία της Εικόνας 7 μπορεί να εφαρμοστεί ουσιαστικά σε κάθε πρωτόκολλο MAC για τα δίκτυα αισθητήρων. Πραγματοποιεί παραμετροποίηση του ασυρμάτου (b), ενεργοποίηση του (c), εναλλαγή του ασυρμάτου σε κατάσταση λήψης (d) και μετά εκτελεί τις εντολές του πρωτοκόλλου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το κόστος για την ενεργοποίηση του ασυρμάτου να είναι το ίδιο για όλα για πρωτόκολλα. Η διαφορά μεταξύ των πρωτοκόλλων βρίσκεται στο χρόνο κατά τον οποίο παραμένει ενεργός ο ασύρματος, πόσες φορές αυτός θα ενεργοποιηθεί καθώς και πόσο διαρκεί η φάση δειγματοληψίας (e).

Παρόλα αυτά το B-MAC είναι απλό σε σχεδιασμό και εφαρμογή, και ανεκτικό σε αλλαγές συνθηκών δικτύου. Αποδίδει αρκετά καλά σε σχέση με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα από την άποψη της ρυθμαπόδοσης (throughput), της καθυστέρησης (delay) και της κατανάλωσης ενέργειας (power consumption) στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι λόγοι όμως που δεν μπορούν να κρατήσουν την κατανάλωση ενέργειας στα επιθυμητά χαμηλά επίπεδα είναι το φαινόμενο του overhearing και το μακροχρόνιο προοίμιο που κυριαρχούν στο ενεργειακό ζήτημα. Και αυτό γιατί όσο αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου, η τεχνική δειγματοληψίας μηνυμάτων εφαρμόζεται πιο συχνά και ο κάθε κόμβος ακούει (overhears) περισσότερα πακέτα που πιθανότατα δε προορίζονται γι' αυτόν. [2, 12, 13]

## Κεφάλαιο 4: Z-MAC

Το υβριδικό MAC πρωτόκολλο με την ονομασία Z-MAC για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των TDMA (Time Division Multiple Access) και CSMA (Carrier Sense Multiple Access) ενώ εξαλείφει τις αδυναμίες τους. Όπως το CSMA, το Z-MAC επιτυγχάνει υψηλή μετάδοση και χαμηλή καθυστέρηση υπό χαμηλό ανταγωνισμό ενώ όπως το TDMA, επιτυγχάνει υψηλή μετάδοση υπό υψηλή συμφόρηση και περιορίζει τις συγκρούσεις πακέτων με μικρό ενεργειακό κόστος. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του Z-MAC είναι πως η απόδοση του δεν επηρεάζεται εύκολα από σφάλματα συγχρονισμού, απόδοσης των χρονοσχημάτων (time slots) και χρονικές αλλαγές στις συνθήκες του καναλιού. Στη χειρότερη περίπτωση, η λειτουργία του θα εκφυλλιστεί σε αυτή ενός πρωτοκόλλου CSMA.

Δύο ή περισσότεροι κόμβοι δε μπορούν να έχουν πρόσβαση ταυτόχρονα σε μια μετάδοση. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ο έλεγχος της πρόσβασης στη μετάδοση γνωστός ως MAC παίζει το βασικότερο ρόλο στον καθορισμό της χρήσης του καναλιού, στις καθυστερήσεις του δικτύου και στην κατανάλωση ενέργειας που είναι και η πιο σημαντική. Επηρεάζει επίσης τη συμφόρηση αλλά και τη δίκαιη χρήση του καναλιού.

Ένα κοινό παράδειγμα του MAC στα ασύρματα δίκτυα είναι το CSMA (carrier sense multiple access). Είναι δημοφιλές λόγω της απλότητας, της ευελιξίας και της ανθεκτικότητας. Δεν απαιτεί μεγάλη υποστήριξη από υποδομές: συγχρονισμός ρολογιού και σφαιρική τοπολογία πληροφόρησης δεν απαιτούνται, ενώ η είσοδος και η έξοδος των κόμβων αντιμετωπίζονται ευέλικτα χωρίς πρόσθετες λειτουργίες. Τα πλεονεκτήματα αυτά, ωστόσο, έρχονται σε αντίθεση με την επανεκπομπή και το σφάλμα (μια επανεκπομπή μπορεί να προκαλέσει καταστροφή των πακέτων όταν περισσότεροι από δύο συγκρουόμενοι κόμβοι εκπέμπουν την ίδια χρονική στιγμή). Η σύγκρουση μπορεί να συμβεί σε μια περιοχή 2 αλμάτων (two-hop) γύρω από τον κάθε κόμβο. Ενώ οι συγκρούσεις σε περιοχές ενός άλματος μπορούν να μειωθούν από ανιχνευτές σήματος πριν την εκπομπή, αυτό δε μπορεί να συμβεί σε περιοχές 2 ή παραπάνω αλμάτων. Αυτό το πρόβλημα που ονομάζεται *πρόβλημα κρυμμένου τερματικού* προκαλεί σοβαρή μείωση της ρυθμαπόδοσης, ειδικά σε εφαρμογές που

απαιτούν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Παρόλο που το RTS/CTS μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού απαιτεί μεγάλο overhead (40%-75% της χωρητικότητας του καναλιού στα δίκτυα αισθητήρων) επειδή τα πακέτα δεδομένων είναι συνήθως πολύ μικρά.

Το TDMA (Time Division Multiple Access), από τη άλλη πλευρά, μπορεί να λύσει αυτό το πρόβλημα γιατί προγραμματίζει τους χρόνους εκπομπών γειτονικών κόμβων να συμβαίνουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (κατανομής των χρονοσχισμών – time slots). Παρόλα αυτά το TDMA έχει σοβαρά μειονεκτήματα:

1. Η εύρεση αποτελεσματικού χρονοδιαγράμματος δεν είναι κάτι ασήμαντο. Κάθε ακραίος σταθμός που θέλει να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία TDMA θα ζητήσει τη χρήση ενός καναλιού ανάλογα με το επίπεδο της υπηρεσίας που απαιτεί η αντίστοιχη εφαρμογή. Ο επικεφαλής κόμβος θα αποφασίσει για την ικανοποίηση του αιτήματος και θα εκκινήσει τις διαδικασίες κατανομής των χρονοσχισμών (slots). Για να επιτευχθεί αυτός ο συγχρονισμός των αιτημάτων πέρα από τη δυσκολία που παρουσιάζει σαν διαδικασία απαιτεί και υψηλά ποσοστά ενέργειας καθώς η ανταλλαγή μηνυμάτων είναι συνεχής.
2. Απαιτεί συγχρονισμό ρολογιού. Ενώ ο συγχρονισμός ρολογιού αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό πολλών εφαρμογών, όταν είναι ακριβής (tight) προκαλεί μεγάλη σπατάλη ενέργειας (high energy overhead) καθώς απαιτεί συχνή ανταλλαγή μηνυμάτων.
3. Τα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να υποβληθούν σε συχνές αλλαγές τοπολογίας λόγω των διαφορετικών χρονοσχισμών των μεταδόσεων, των φυσικών αλλαγών του περιβάλλοντος, της διακοπής της μπαταρίας και της αποτυχίας των κόμβων. Η διαχείριση των αλλαγών της δυναμικής τοπολογίας είναι ακριβή και πιθανώς να απαιτεί ολοκληρωτική αλλαγή.
4. Παρουσιάζεται δυσκολία στην εξακρίβωση της σχέσης των παρεμβολών μεταξύ των γειτονικών κόμβων γιατί το εύρος των παρεμβολών είναι διαφορετικό από αυτό των μεταδόσεων και κάποιοι εμπλεκόμενοι κόμβοι μπορεί να μην είναι σε άμεση εμβέλεια επικοινωνίας (*φαινόμενο παρατυπίας παρεμβολών – interference irregularity*). Ως εκ τούτου, οποιαδήποτε παραχώρηση καναλιού που χρησιμοποιεί την εμβέλεια μετάδοσης, στη θέση

της εμβέλειας παρεμβολών, για τη δημιουργία συγκρουόμενων σχέσεων δεν αποφέρει απαραίτητα ένα χρονοδιάγραμμα χωρίς παρεμβολές. Επιπλέον καθώς η εμβέλεια των παρεμβολών και οι συνθήκες μετάδοσης ποικίλουν ανά κάθε χρονική στιγμή είναι απίθανο να επαρκεί ένα σταθερό χρονοδιάγραμμα που θα αποτρέπει τις συγκρούσεις διαρκώς.

5. Σε χαμηλή συμφόρηση το TDMA δίνει μικρότερη χρήση καναλιών και μεγαλύτερες καθυστερήσεις απ' ό,τι το CSMA επειδή στο TDMA ένας κόμβος μπορεί να εκπέμπει μόνο κατά τη διάρκεια των προγραμματισμένων του χρονοσχημάτων ενώ στο CSMA οι κόμβοι μπορούν να εκπέμπουν οποιαδήποτε στιγμή με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει συμφόρηση.

Αυτές οι δυσκολίες του TDMA υποδηλώνουν ότι μια μεμονωμένη τεχνική TDMA δεν είναι πρακτική. Ακόμα και αν υπάρχει ένα επαρκές χρονοδιάγραμμα, οι υπόλοιποι παράγοντες όπως η παρατυπία των παρεμβολών, οι χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες των καναλιών και τα σφάλματα στο συγχρονισμό αποδυναμώνουν τα πλεονεκτήματα του. Παρόλα αυτά αναγνωρίζουμε πως οι πληροφορίες που παρέχονται από ένα αποτελεσματικό χρονοδιάγραμμα του TDMA, συγκεκριμένα οι ανεξάρτητες ομάδες των κόμβων με ταυτόχρονη μετάδοση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να περιοριστούν τα φαινόμενα σύγκρουσης ειδικά κάτω από υψηλή συμφόρηση.

Παρακάτω, θα παρουσιαστεί ένα νέο υβριδικό MAC πρωτόκολλο που ονομάζεται Z-MAC (Zebra- MAC), για τα δίκτυα αισθητήρων που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των TDMA και CSMA ενώ εξαλείφει τις αδυναμίες τους. Το κύριο χαρακτηριστικό του Z-MAC είναι η ευελιξία που παρουσιάζει ανάλογα με το βαθμό συμφόρησης του δικτύου: όταν η συμφόρηση είναι χαμηλή συμπεριφέρεται σαν ένα CSMA πρωτόκολλο ενώ όταν είναι υψηλή σαν ένα TDMA πρωτόκολλο. Είναι επίσης ανθεκτικό σε αλλαγές στη δυναμική τοπολογία και στις αποτυχίες συγχρονισμού που συμβαίνουν συχνά στα δίκτυα αισθητήρων.

Το Z-MAC χρησιμοποιεί το CSMA σαν βάση αλλά χρησιμοποιεί και το χρονοδιάγραμμα του TDMA ενισχύοντας την ανάλυση της συμφόρησης. Στο Z-MAC, το timeslot εκχωρείται κατά τη στιγμή της εγκατάστασης – υψηλό overhead

πραγματοποιείται κατά την εκκίνηση. Η φιλοσοφία σχεδιασμού του είναι πως το αρχικά υψηλό overhead γενικά αποσβένεται σε μια μακρά περίοδο λειτουργίας του δικτύου, ενώ τελικά αντισταθμίζεται από τη βελτίωση της απόδοσης και της ενεργειακής αποδοτικότητας. Χρησιμοποιήθηκε ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος προγραμματισμού καναλιών - DRAND. Ο DRAND είναι μια εκδοχή του RAND αλγόριθμου προγραμματισμού επανα-χρησιμοποίησης καναλιού. Μετά την εκχώρηση των slot, κάθε κόμβος επαναχρησιμοποιεί το slot περιοδικά σε κάθε προκαθορισμένη περίοδο η οποία ονομάζεται πλαίσιο (frame). Ένας κόμβος που του έχει εκχωρηθεί μια χρονοσχισμή αποκαλείται κάτοχος (owner) αυτής της χρονοσχισμής και οι υπόλοιποι μη κάτοχοι (non-owners). Μπορούν να υπάρχουν παραπάνω από ένας κάτοχοι για κάθε χρονοσχισμή επειδή ο DRAND επιτρέπει σε δύο οποιουσδήποτε κόμβους πέραν των two-hop περιοχών να κατέχουν την ίδια χρονοσχισμή.

Στο Z-MAC ένας κόμβος μπορεί να εκπέμπει κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε χρονοσχισμής σε αντίθεση με το TDMA. Πριν την εκπομπή ενός κόμβου κατά τη διάρκεια της χρονοσχισμής (όχι απαραίτητα στην έναρξη της), εκτελείται πάντα ανίχνευση φέροντος (carrier-sensing) και εκπέμπεται ένα πακέτο όταν το κανάλι είναι ελεύθερο. Ωστόσο, ο κάτοχος της εν λόγω χρονοσχισμής έχει πάντα προτεραιότητα από τους μη κατόχους για την πρόσβαση στο κανάλι. Η προτεραιότητα δίνεται προσαρμόζοντας το αρχικό μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης (contention window) με τέτοιο τρόπο ώστε οι κάτοχοι να προηγούνται στη μετάδοση από τους μη κατόχους. Ο στόχος είναι ότι κατά την διάρκεια των slots όπου οι κάτοχοι έχουν δεδομένα προς μετάδοση, το Z-MAC να μειώνει την πιθανότητα σύγκρουσης αφού δίνεται στους κατόχους προτεραιότητα για μετάδοση και τα slots τους έχουν προγραμματιστεί εξ' αρχής να αποφεύγουν τη σύγκρουση. Όμως όταν το slot δεν είναι σε χρήση από τους κατόχους, οι μη κάτοχοι μπορούν να κλέψουν το slot. Αυτό το σενάριο προτεραιότητας έχει επίδραση έμμεσα στην εναλλαγή μεταξύ του CSMA και του TDMA ανάλογα με το επίπεδο της συμφόρησης. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του σεναρίου προτεραιότητας είναι πως η δυνατότητα των κατόχων να έχουν πρόσβαση στο κανάλι μπορεί να ρυθμιστεί ανεξάρτητα από εκείνη των μη κατόχων. Αποδεικνύεται έτσι πως με αυτόν τον τρόπο

αυξάνεται η ανθεκτικότητα του πρωτοκόλλου σε συγχρονισμό και στην αποτυχία εκχώρησης των slots ενώ ενισχύεται η κλιμάκωση της συμφόρησης.

Με τον συνδυασμό των CSMA και TDMA, το Z-MAC γίνεται πιο ανθεκτικό σε αποτυχίες συγχρονισμού, στις χρονικές μεταβολές των καναλιών, στην αποτυχία εκχώρησης των slots και στις αλλαγές των τοπολογιών απ' ότι ένα μεμονωμένο TDMA ενώ όπως προείπαμε στη χειρότερη περίπτωση, η λειτουργία του θα εκφυλιστεί σε αυτή του CSMA.

## 4.1 Παραμετροποίηση του Z-MAC

Το πρωτόκολλο Z-MAC διατρέχει μια φάση αρχικοποίησης στους κόμβους αισθητήρες η οποία αποτελείται από τα εξής στάδια:

- ανακάλυψη γειτονικών κόμβων
- απόδοση χρονοσχισμών
- ορισμός χρονικού πλαισίου
- κεντρικός συγχρονισμός

Αυτές οι διεργασίες πραγματοποιούνται μόνο μια φορά στη φάση εγκατάστασης και δεν τρέχουν έως ότου πραγματοποιηθεί κάποια αξιολογή μεταβολή στην τοπολογία του δικτύου (π.χ. αναδιάρθρωση των αισθητήρων). Αυτό συμβαίνει γιατί το αρχικό κόστος για τη λειτουργία αυτών των εργασιών αντισταθμίζεται από τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά τη μετάδοση των δεδομένων.

### 4.1.1 Ανακάλυψη γειτονικών κόμβων και απόδοση χρονοσχισμών

Καθώς ενεργοποιείται ένας κόμβος, διατρέχει αρχικά ένα απλοποιημένο πρωτόκολλο ανίχνευσης γειτόνων που εκπέμπει περιοδικά ένα μήνυμα εντοπισμού (ring) στους one-hop γείτονες ώστε να τους καταγράψει. Ένα ring μήνυμα περιέχει αυτή την λίστα των γειτόνων. Έστω ότι κάθε κόμβος στέλνει ένα ring μήνυμα κάθε δευτερόλεπτο για κάποιο χρονικό διάστημα. Με αυτόν τον τρόπο κάθε κόμβος



συγκεντρώνει τις πληροφορίες που έχουν παραληφθεί από τα rings των one-hop γειτόνων που στην ουσία συγκροτούν πληροφορίες για τους two-hop γείτονες.

Η λίστα των two-hop γειτόνων χρησιμοποιείται σαν δεδομένο για έναν αλγόριθμο εκχώρησης χρονοσχισμών. Η τρέχουσα έκδοση του ZMAC χρησιμοποιεί όπως προαναφέρθηκε τον αλγόριθμο DRAND για την εκχώρηση χρονοσχισμών κάθε κόμβου στο δίκτυο. Ο DRAND εξασφαλίζει ένα χρονοδιάγραμμα μετάδοσης στο οποίο είναι αδύνατη η εκχώρηση της ίδιας χρονοσχισμής σε δύο κόμβους μέσα σε μια περιοχή μετάδοσης two-hop. Αυτή η εκχώρηση εγγυάται την ανεμπόδιστη μετάδοση μεταξύ των one-hop γειτόνων από τους two-hop γείτονες. Να σημειωθεί ότι το χρονοδιάγραμμα μετάδοσης αναλαμβάνει οποιαδήποτε αλλαγή διαδρομής ανάμεσα στους one-hop γείτονες.

Η απόδοση του DRAND είναι κλιμακούμενη επειδή δεν εξαρτάται από το μέγεθος του δικτύου αλλά από το μέγεθος της γειτονιάς του κάθε κόμβου. Το πρωτόκολλο παράγει ένα πολύ αποδοτικό χρονοδιάγραμμα ώστε ο αριθμός των χρονοσχισμών που έχουν εκχωρηθεί σε έναν κόμβο μα μην υπερβαίνει το μέγεθος των παρακείμενων two-hop γειτόνων.

#### **4.1.2 Ορισμός χρονικού πλαισίου**

Όταν εκχωρηθεί σε έναν κόμβο μια χρονοσχισμή, πρέπει να αποφασιστεί ο χρόνος χρήσης της για την αναμετάδοση. Αυτή η περίοδος ονομάζεται πλαίσιο χρόνου (time frame) του κόμβου. Λογικά όλοι οι κόμβοι πρέπει να έχουν το ίδιο πλαίσιο χρόνου καθώς συγχρονίζονται ώστε να έχουν ταυτόχρονα χρονοσχισμή 0. Κάτι τέτοιο απαιτεί τη διάδοση του μέγιστου αριθμού slots (*MSN-Maximum Slot Number*) σε ολόκληρο το δίκτυο ενώ δεν είναι ευπροσάρμοστο στις αλλαγές των τοπικών χρονοσχισμών. Όταν νέοι κόμβοι προστίθενται στο δίκτυο, ο DRAND μπορεί να τρέχει τις τοπικές εκχωρήσεις των slot διατηρώντας τις υπάρχουσες. Αν αυτή η διεργασία προκαλέσει αλλαγή στο MSN, αυτή η αλλαγή πρέπει να διαδοθεί ξανά σε ολόκληρο το δίκτυο. Αυτό μπορεί να προκαλέσει υψηλά ενεργειακά κόστη ακόμα και για τη προσαρμογή μιας μικρής αλλαγής στην τοπολογία του δικτύου.

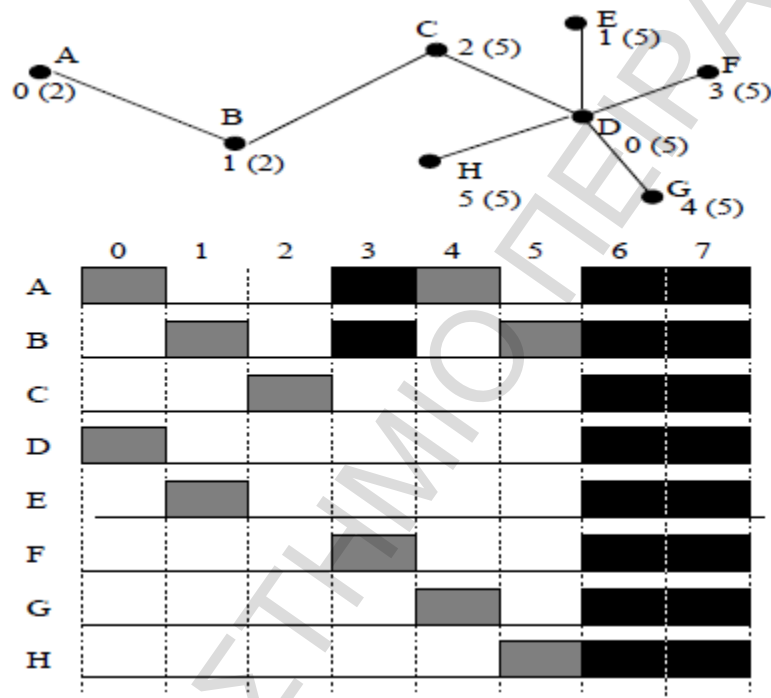
**Ο κανόνας του χρονικού πλαισίου (TF rule).** Ας υποθέσουμε ότι σε έναν κόμβο  $i$  ανατίθεται ένα slot  $s_i$  σύμφωνα με το DRAND έστω ότι το MSN μέσα στην two-hop γειτονιά είναι το  $F_s$ . Ρυθμίζουμε το χρονικό πλαίσιο του  $i$  να είναι  $2^\alpha$  όπου ένας θετικός ακέραιος  $\alpha$  έχει επιλεγεί για να ικανοποιήσει τη συνθήκη  $2^{\alpha-1} \leq F_s \leq 2^\alpha - 1$ . Αυτό συμβαίνει επειδή το  $i$  χρησιμοποιεί το  $s_i$  στο slot για κάθε  $2^\alpha$  χρονικό πλαίσιο (τα slot του  $i$  είναι  $l \cdot 2^\alpha + s_i$ , για κάθε  $l = 1, 2, 3, \dots$ )

Θεώρημα : Αν κάθε κόμβος  $i$  χρησιμοποιεί μόνο  $l \cdot 2^\alpha + s_i$ , για κάθε  $l=1, 2, 3, \dots$ , τότε κανένας κόμβος  $j$  στην two-hop γειτονιά του  $i$  δε μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιο slot που χρησιμοποιεί ο  $i$ .

Ο κανόνας του χρονικού πλαισίου επιτρέπει στους κόμβους να διαλέξουν το δικό τους μέγεθος χρονικού πλαισίου ανάλογα με τις τοπικές two-hop πληροφορίες. Αυτός ο κανόνας κάνει τον DRAND ευέλικτο στις δυναμικές αλλαγές του χρονικού πλαισίου (που προκαλούνται από τοπικές αλλαγές τοπολογίας) χωρίς να απαιτούνται ολοκληρωτικές αλλαγές. Η Εικόνα 8 δίνει ένα παράδειγμα ενός TDMA χρονοδιαγράμματος που λαμβάνει υπ' όψιν τον κανόνα χρονικού πλαισίου. Αν χρησιμοποιηθεί το γενικό χρονικό πλαίσιο, τότε το μέγεθος του χρονικού πλαισίου παίρνει την τιμή 6. Οι κόμβοι A και B μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα slots τους μια φορά κάθε 6 slots ανεξάρτητα αν το μέγεθος του πλαισίου τους είναι 2 για το καθένα. Όταν όμως χρησιμοποιηθεί ο κανόνας του χρονικού πλαισίου, επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν πλαίσια μεγέθους 4. Έτσι ενισχύεται ο συγχρονισμός στη χρήση των καναλιών και μειώνεται η καθυστέρηση του μηνύματος από τον κόμβο A στον B. Παρόλα αυτά, διαπιστώνεται ότι τα slots 6 και 7 δεν εκχωρούνται σε κάποιον κόμβο στη γειτονιά. Αυτό συμβαίνει επειδή: όταν το δίκτυο είναι ομοιόμορφα πυκνό, το γενικό χρονικό πλαίσιο δημιουργεί μικρότερο αριθμό κενών slots. Όταν όμως το δίκτυο περιέχει αρκετά κενά και λίγες πυκνές περιοχές, τότε το τοπικό πλαίσιο θα προτιμάται. Στο Z-MAC σε περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμα slots για το CSMA δεν μένουν πάντα αχρησιμοποίητα.

**Συγχρονίζοντας στο Slot 0.** Ο κανόνας του τοπικού πλαισίου υποθέτει σιωπηρά πως όλοι οι κόμβοι ξεκινούν με μια χρονοσχισμή 0 την ίδια χρονική στιγμή. Αυτό επιτυγχάνεται χωρίς επικοινωνία αρκεί να υπάρχει συγχρονισμός με το slot 0. Για

παράδειγμα, έστω ότι θέτουμε την αρχή του πραγματικού χρόνου (όταν η τιμή συγχρονισμού είναι 0) να είναι η έναρξη του slot 0. Οι νέοι κόμβοι μπορούν εύκολα να συγχρονίσουν τα slots τους αν συγχρονιστούν με το γενικό 'ρολόι'. Για να επιτραπεί αυτός ο συγχρονισμός, το Z-MAC εκτελεί γενικό συγχρονισμό ρολογιού όπως και το TPSN αλλά μόνο κατά την έναρξη. Μετά τον αρχικό συγχρονισμό, κάθε κόμβος διατρέχει ένα χαμηλού κόστους πρωτόκολλο συγχρονισμού όπως θα συζητηθεί παρακάτω.



*Εικόνα 8: Ένα παράδειγμα του TF κανόνα. Η πρώτη εικόνα παρουσιάζει μια τοπολογία δικτύου και οι αριθμοί υποδηλώνουν τον αριθμό των slots που έχουν οριστεί από το DRAND, οι αριθμοί στην παρένθεση είναι οι Fi. Στην κάτω εικόνα παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα των slots των κόμβων (τα σκιασμένα slots είναι αυτά στα οποία εκπέμπει ο κάθε κόμβος, ενώ τα σκούρα slots είναι τα κενά τα οποία δεν χρησιμοποιούνται από κάποιον one-hop ή two-hop γείτονα.*

## 4.2 Έλεγχος μετάδοσης του Z-MAC

Με το τέλος της φάσης DRAND, κάθε κόμβος προωθεί το πλαίσιο χρόνου και τον αριθμό των slots στην two-hop γειτονιά του. Με αυτόν τον τρόπο κάθε κόμβος γνωρίζει τις πληροφορίες για τα slots και για τα πλαίσια στην one-hop και two-hop γειτονιά του στην αρχή της Z-MAC φάσης. Σε αυτό το σημείο, κάθε κόμβος συγχρονίζει το slot στο 0 κάνοντας δυνατή τελικά την μετάδοση ελέγχου του Z-MAC.

Στο Z-MAC, ένας κόμβος μπορεί να βρίσκεται σε μια από τις παρακάτω καταστάσεις: χαμηλό επίπεδο συμφόρησης (low contention level - LCL) ή υψηλό επίπεδο συμφόρησης (high contention level - HCL). Ένας κόμβος βρίσκεται σε HCL μόνο όταν παραλάβει μια ρητή ειδοποίηση συμφόρησης (ECN) από έναν two-hop γείτονα μέσα στο τελευταίο  $t_{ECN}$  χρονικό διάστημα. Διαφορετικά ο κόμβος βρίσκεται σε LCL. Ένας κόμβος στέλνει ένα ECN όταν αντιληφθεί υψηλή συμφόρηση.

Στην κατάσταση LCL, οποιοσδήποτε κόμβος μπορεί να διαγωνιστεί για την μετάδοση σε κάποιο slot, αλλά στην κατάσταση HCL, μόνο οι κάτοχοι του συγκεκριμένου slot και οι one-hop γείτονες του επιτρέπεται να διαγωνιστούν για την πρόσβαση στο κανάλι. Και στις δυο καταστάσεις, οι κάτοχοι έχουν υψηλότερη προτεραιότητα από τους μη κατόχους. Αν ένα slot δεν έχει κάτοχο ή ο κάτοχος του δεν έχει δεδομένα προς αποστολή, οι μη κάτοχοι μπορούν να “κλέψουν” το slot. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτυγχάνει υψηλή χρήση καναλιών ακόμα και σε καταστάσεις χαμηλής συμφόρησης καθώς ένας κόμβος μπορεί να ξεκινήσει την εκπομπή μόλις απελευθερωθεί κάποιο κανάλι.

**Κανόνας μετάδοσης.** Καθώς ένας κόμβος  $i$  για να εκπέμπει απαιτεί δεδομένα, ελέγχει αν είναι ο κάτοχος του συγκεκριμένου slot. Αν είναι ο κάτοχος του slot κάνει ένα τυχαίο backoff για μια καθόρισμένη περίοδο  $T_0$ . Όταν ο χρόνος του backoff λήξει, διατρέχει το CCA και αν το κανάλι είναι ελεύθερο εκπέμπει τα δεδομένα. Αν το κανάλι δεν είναι ελεύθερο τότε περιμένει μέχρι να απελευθερωθεί και επαναλαμβάνει την παραπάνω διαδικασία. Αν ο κόμβος  $i$  δεν είναι ο κάτοχος του συγκεκριμένου slot που είναι σε κατάσταση LCL, ή είναι σε HCL και το συγκεκριμένο slot δεν καταλαμβάνεται από τους two-hop γείτονες, περιμένει για χρόνο  $T_0$  και

έπειτα εκτελεί ένα τυχαίο backoff μέσα σε ένα παράθυρο συμφόρησης  $[T_o, T_{no}]$ . Όταν ο μετρητής backoff λήξει, διατρέχει το CCA και αν το κανάλι είναι ελεύθερο αρχίζει να εκπέμπει. Αν το κανάλι δεν είναι ελεύθερο περιμένει ως την απελευθέρωση του και επαναλαμβάνει την παραπάνω διαδικασία. Αν ο κόμβος  $i$  δεν είναι ο κύριος του slot και είναι σε κατάσταση HCL τότε αναβάλλει τη εκπομπή (μπορεί να κοιμηθεί) ώσπου να βρει μια χρονοσχισμή η οποία είτε δεν ανήκει σε κάποιον two-hop γείτονα είτε είναι αυτός ο κύριος της. Αφού ξυπνήσει θα επαναλάβει την παραπάνω διαδικασία.

Σύμφωνα με τους παραπάνω κανόνες μετάδοσης, στην κατάσταση LCL, ένας κόμβος μπορεί να διεκδικήσει οποιοδήποτε slot ανάλογα με τις προτεραιότητες του. Στην κατάσταση HCL, μπορεί να διεκδικήσει ένα συγκεκριμένο slot μόνο εάν είναι ο κάτοχός του ή είναι one-hop γείτονας του κατόχου του slot. Να σημειωθεί ότι μια μετάδοση που ξεκίνησε από το προηγούμενο slot μπορεί να περάσει σε ένα slot κατάστασης HCL και να προκαλέσει σύγκρουση με τον κάτοχο του. Ένας τρόπος για να αποφευχθεί το παραπάνω είναι να απαγορευτεί στη μετάδοση να περάσει πάνω από ένα HCL slot. Βέβαια κάτι τέτοιο δεν συνίσταται καθώς μπορεί να προκαλέσει κατακερματισμούς στις χρονοσχισμές περιορίζοντας τη χρήση του καναλιού. Επειδή το μέγεθος του slot είναι επαρκές ώστε να παραλάβει παραπάνω από ένα πακέτα, τα HCL slots δίνουν περισσότερες πιθανότητες στον κάτοχο να επιτύχει χωρίς κρυμμένα τερματικά.

### 4.3 Ρητή Ειδοποίηση Συμφόρησης (Explicit Contention Notification-ECN)

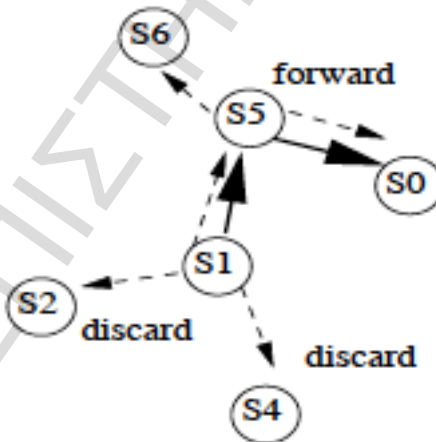
Τα μηνύματα ECN ενημερώνουν τους two-hop γείτονες να μην δρουν σαν κρυμμένα τερματικά προς τον κάτοχο του κάθε slot όταν η συμφόρηση είναι υψηλή. Κάθε κόμβος παίρνει μια τοπική απόφαση να αποστείλει ένα ECN μήνυμα ανάλογα με τις εκτιμήσεις για το επίπεδο της συμφόρησης. Υπάρχουν δυο τρόποι για να εκτιμηθεί η two-hop συμφόρηση. Ο πρώτος είναι να ειδοποιηθεί από τον one-hop αποδέκτη και να υπολογίσει το εύρος απώλειας του πακέτου. Καθώς η συμφόρηση

μεταξύ two-hop προκαλεί σύγκρουση, συνδέεται άμεσα με το εύρος της απώλειας. Παρ'όλα αυτά αυτή η τεχνική απαιτεί ο αποδέκτης να αποστείλει πίσω αναφορά προκαλώντας επιπλέον φόρτιο. Αν η εφαρμογή δεν ενεργοποιήσει τη λειτουργία αναγνώρισης, μπορεί αυτός ο φόρτος να περιορίσει αισθητά τη χρήση του καναλιού. Η άλλη τεχνική είναι ο υπολογισμός του επιπέδου του θορύβου του καναλιού. Η υψηλή συμφόρηση τίνει να αυξάνει το επίπεδο θορύβου του καναλιού. Αυτή η τεχνική δεν απαιτεί επιπλέον φόρτο καθώς ο θόρυβος μπορεί να καταμετρηθεί παθητικά τη στιγμή μετάδοσης των δεδομένων. Για να συμβεί όμως αυτό χωρίς να γίνει ενεργή δειγματοληψία του καναλιού πρέπει να υπολογιστεί ο μέσος όρος των αποσύρσεων λόγω θορύβου (noise backoffs) που εκτελεί ο αποστολέας πριν την αποστολή ενός πακέτου. Ένα noise backoff είναι το backoff που παραλαμβάνει ο αποστολέας όταν αισθάνεται ότι το κανάλι χρησιμοποιεί CCA πριν την μετάδοση του πακέτου (μεταδίδει μόνο όταν το κανάλι είναι ελεύθερο). Όταν το επίπεδο θορύβου είναι είναι υψηλότερο από το κατώτατο όριο του CCA threshold, ο κόμβος κάνει ένα backoff.

Όταν ένας κόμβος που εκπέμπει αντιληφθεί υψηλή συμφόρηση στέλνει ένα μεμονωμένο μήνυμα (unicast message), ένα one-hop ECN με προορισμό εκεί όπου ο κόμβος αντιλαμβάνεται τη συμφόρηση. Αν παραπάνω από μια περιοχές υφίστανται συμφόρηση, μπορεί να στείλει μια εκπομπή με πληροφορίες για τους πολλαπλούς προορισμούς. Τυπικά, στα δίκτυα αισθητήρων επειδή κάθε κόμβος έχει 'κόμβο-γονέα' για να αποστείλει δεδομένα, ο κόμβος έχει μόνο έναν προορισμό. Όταν ένας κόμβος  $j$  παραλαμβάνει ένα one-hop ECN μήνυμα που ενεργοποιείται από τον one-hop γείτονα του  $i$ , ελέγχει πρώτα αν ο προορισμός του μηνύματος ήταν όντως ο  $j$ . Αν ισχύει κάτι τέτοιο τότε εκπέμπει το ECN μήνυμα στους one-hop γείτονες του (αυτά τα μηνύματα ονομάζονται two-hop ECN). Αν ο  $j$  δεν είναι ο προορισμός απλά αγνοεί το one-hop ECN του  $i$ . Όταν ένας κόμβος παραλαμβάνει ένα two-hop ECN τότε σηκώνει την HCL σημαία. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα προώθησης ECN. Η σημαία HCL είναι απλά μια προειδοποίηση εννοώντας πως αν δεν παρουσιαστεί κάποιο άλλο ECN μήνυμα μέσα στην τελευταία  $t_{ECN}$  περίοδο τότε η σημαία θα κατέβει. Σε περίπτωση που ο κόμβος  $i$  αντιλαμβάνεται συμφόρηση συνεχόμενα, τότε πρέπει να εκπέμπει το ECN μήνυμα περιοδικά. Αυτή η χρονική

περίοδος  $t_{ECN}$  ορίζεται από το σύστημα.

Τυπικά, όταν ένας κόμβος αντιληφθεί συμφόρηση το ίδιο συμβαίνει πιθανότατα και στους γειτονικούς του κόμβους την ίδια χρονική στιγμή. Γι'αυτό θα υπάρχουν αρκετά ECN μηνύματα που θα προωθούνται προς τους κόμβους δρομολόγησης. Για να αποτραπεί ενδεχόμενη ECN κατάρρευση, χρησιμοποιούμε overhearing για την εξάλειψη των ECN. Όταν ένας κόμβος  $i$  αντιληφθεί υψηλή συμφόρηση, κάνει τυχαία backoffs πριν την εκπομπή ενός one-hop ECN μηνύματος. Παράλληλα, αν παραλάβει ένα one-hop ECN που προοριζόταν για κάποιον άλλο κόμβο αλλά έχει τον ίδιο προορισμό με το δικό του, τότε παύει τη λειτουργία ECN και ακυρώνει τη δική του αποστολή. Μετά απο  $t_{ECN}$  αν αντιλαμβάνεται ακόμα υψηλή συμφόρηση προγραμματίζει ένα άλλο ECN κάνοντας ένα τυχαίο backoff και επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία. Ο ίδιος κανόνας παύσης ισχύει για τους κόμβους δρομολόγησης. Αν ένας κόμβος δρομολόγησης παραλάβει ένα one-hop ECN και έχει ήδη προωθήσει ένα ECN μέσα σε μια περίοδο  $t_{ECN}$  τότε δεν προωθεί το two-hop ECN.



Εικόνα 9 : Ένα Παράδειγμα προώθησης ECN. Όταν ένας κόμβος  $s1$  αντιλαμβάνεται βαριές απώλειες πακέτων, στέλνει ένα one-hop ECN στον  $s5$ . Τα έντονα βέλη υποδεικνύουν το μονοπάτι δρομολόγησης ενώ τα διακεκομμένα βέλη τα ECN μηνύματα. Εφόσον οι κόμβοι  $s2$  και  $s4$  δεν αποτελούν προορισμούς απλά αγνοούν το ECN. Ο κόμβος  $s5$  εκπέμπει ένα ECN στους δικούς του one-hop. Μόλις ενεργοποιηθεί το HCL οι κόμβοι  $s6$  και  $s0$  δε μπορούν να ανταγωνιστούν κατά τη διάρκεια της χρονοσχισμής του  $s1$  ενώ οι κόμβοι  $s5, s2$  και  $s4$  μπορούν ως one-hop γείτονες με μικρότερη βέβαια προτεραιότητα από τον  $s1$ .

Το ECN είναι παρόμοιο με το RTS/CTS στο CSMA/CA, όμως η διαφορά του είναι ότι το HCL χρησιμοποιεί πληροφορίες τοπολογίας (π.χ. πληροφορίες slot) για να αποφύγει two-hop συγκρούσεις. Το κόστος του ECN είναι επίσης κατά πολύ μικρότερο από εκείνο του RTS/CTS αφού ενεργοποιείται μόνο όταν η συμφόρηση είναι υψηλή. Χρησιμοποιώντας τη διακοπή λειτουργίας του ECN μόνο ένας μικρός αριθμός ECN μηνυμάτων χρειάζεται να αποσταλεί. Μπορεί η κατάσταση HCL να διαρκέσει περισσότερο από όσο κάνει να σταλεί ένα πακέτο, το κόστος της όμως αποσβένεται λόγω των πολλών εκπομπών πακέτων.

#### 4.4 Παραλαβή του χρονοδιαγράμματος του Z-MAC

Ο DRAND ορίζει μόνο το χρονοδιάγραμμα εκπομπής των κόμβων. Στο Z-MAC, ένας κόμβος μπορεί να εκπέμπει σε κάθε slot. Καθώς το Z-MAC εφαρμόζεται πάνω στο B-MAC, εξορισμού χρησιμοποιεί LPL, όπου κάθε κόμβος διατηρεί τον κύκλο ακούσματος ξεχωριστό από την περίοδο ελέγχου, ενώ πριν από κάθε μετάδοση προηγείται ένα προοίμιο (preamble) μεγέθους όσο η περίοδος ελέγχου. Γι' αυτό, η κατανάλωση ενέργειας του Z-MAC για idle listening ειδικά κάτω από κύκλο χαμηλού φόρτου είναι συγκρίσιμη με αυτή του B-MAC.

Η περίοδος ελέγχου αποτελεί παράγοντα καθορισμού του μεγέθους του slot γιατί ένα slot πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μπορεί να εκπέμπει ένα πακέτο. Έτσι, το μέγεθος του slot πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το σύνολο της περιόδου ελέγχου  $T_o$ ,  $T_{no}$ , της CCA περιόδου και του χρόνου που απαιτεί ένα πακέτο να διαδοθεί. Υπάρχει μια συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους του slot και της καθυστέρησης του δικτύου, ειδικά κάτω από συνθήκες υψηλής συμφόρησης. Υπό συνθήκες χαμηλής συμφόρησης το μέγεθος του slot δεν επηρεάζει την καθυστέρηση καθώς ο κόμβος μπορεί να εκπέμπει ανά πάσα στιγμή. Υπό συνθήκες όμως υψηλής συμφόρησης ο κόμβος είναι σε HCL και εκπέμπει μόνο κατά τη διάρκεια ορισμένων slots. Γι' αυτό ένα μεγάλο μέγεθος slot μπορεί να προκαλέσει μεγάλη καθυστέρηση. Η επιλογή του μεγέθους αποτελεί απόφαση της εφαρμογής. Οι σχεδιαστές της εφαρμογής πρέπει να αξιολογήσουν τις συσχετίσεις και να βρουν το μέγεθος που καλύπτει τις ανάγκες τους.



## 4.5 Τοπικός Συγχρονισμός

Χρησιμοποιώντας αίσθηση φέροντος (carrier-sensing) και backoffs συμφόρησης, το Z-MAC γίνεται ανθεκτικότερο σε σφάλματα ρολογιού από το TDMA. Ακόμα και χωρίς συγχρονισμό, η απόδοση του εκφυλλίζεται σε εκείνη του CSMA. Επιπλέον υπό συνθήκες χαμηλής συμφόρησης, το Z-MAC λειτουργεί σαν το CSMA με ή χωρίς συγχρονισμό. Παρόλα αυτά το Z-MAC απαιτεί συγχρονισμό ρολογιού σε συνθήκες υψηλής συμφόρησης για να εφαρμόσει HCL. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του Z-MAC είναι ότι συγχρονισμός απαιτείται μόνο μεταξύ γειτονικών αποστολέων και ειδικά όταν είναι υπο συνθήκες υψηλής συμφόρησης. Αυτά τα σημεία προσφέρουν μια εξαιρετική δυνατότητα βελτίωσης της επιβάρυνσης που υφίσταται ο συγχρονισμός του ρολογιού επειδή απαιτείται μόνο τοπικά μεταξύ γειτονικών αποστολέων. Η συχνότητα συγχρονισμού μπορεί να ρυθμιστεί σύμφωνα με το ποσοστό μετάδοσης των αποστολέων ώστε εκείνοι που έχουν εκπομπές περισσότερων δεδομένων να εκπέμπουν συχνότερα μηνύματα συγχρονισμού. Σε αυτό το σενάριο, οι αποδέκτες συγχρονίζουν παθητικά τα ρολόγια τους με αυτά των αποστολέων χωρίς να απαιτείται αποστολή μηνυμάτων συγχρονισμού.

Για να εφαρμοστεί ο τοπικός συγχρονισμός ρολογιών μεταξύ των αποστολέων, το Z-MAC υιοθετεί μια τεχνική από το RTP/RTCP (real-time transport protocol). Σε αυτό το πρωτόκολλο, το ποσοστό εκπομπής μηνυμάτων ελέγχου περιορίζεται σε ένα μικρό ποσοστό του bandwidth ενώ κάθε μέλος προσαρμόζει το ρυθμό αποστολής των μηνυμάτων ελέγχου σύμφωνα με το κατανεμόμενο bandwidth. Στο Z-MAC, κάθε αποστολέας δεδομένων περιορίζει το bandwidth που καταναλώνεται από μηνύματα συγχρονισμού για ένα προκαθορισμένο ποσοστό του ρυθμού αποστολής δεδομένων (π.χ. ένα πακέτο συγχρονισμού για κάθε 100 πακέτα δεδομένων). Στην πραγματικότητα, κάθε αποστολέας μπορεί να προσδιορίσει ανεξάρτητα αυτό το ποσοστό συναρτήσει της ενέργειας και του bandwidth.

Οι κόμβοι οι οποίοι αποστέλλουν και παραλαμβάνουν μηνύματα συγχρονισμού τείνουν να έχουν υψηλότερο δείκτη αξιοπιστίας και οι τιμές τους έχουν βαρύνουσα σημασία για την ανανέωση των τιμών ρολογιού. Τυπικά, αυτοί οι κόμβοι στα μονοπάτια δρομολόγησης τείνουν να είναι πιο αξιόπιστοι επειδή

στέλνουν περισσότερα πακέτα από τους υπόλοιπους. Ομοίως, οι κόμβοι πηγών που σπάνια αποστέλλουν δεδομένα δεν είναι το ίδιο αξιόπιστοι. Όταν μια πηγή ξεκινά την αποστολή δεδομένων μετά από μια μακρά περίοδο αδράνειας, το ρολόι της μπορεί να αποκλίνει σοβαρά από τα υπόλοιπα συγχρονισμένα ρολόγια. Καθώς όμως αυξάνει το ρυθμό και την δρομολόγηση των δεδομένων προς τον κόμβο συγκεντρωτή (sink), η τιμή του ρολογιού της θα πλησιάζει τις τιμές των ρολογιών των άλλων κόμβων δρομολόγησης. [17]

Παρακάτω παρουσιάζεται το πρόγραμμα προσομοίωσης NS-2 και συγκρίνονται τα προαναφερθέντα πρωτόκολλα σε δύο διαφορετικά σενάρια, χαμηλού και υψηλού φορτίου.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

## Κεφάλαιο 5: NS-2

Το NS-2 είναι ένα αντικειμενοστραφές πρόγραμμα δικτυακής προσομοίωσης, προϊόν ανοιχτού κώδικα (open source) γραμμένο σε C++, ενώ για τη διεπαφή εντολών και παραμετροποίησής του χρησιμοποιείται η OTcl. Έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί σε διάφορα συστήματα όπως Unix (SunOS, Linux), Windows κ.α. και περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία δικτυακών πρωτοκόλλων (ενσύρματα, ασύρματα, δορυφορικά, δρομολόγηση σε ad-hoc δίκτυα, multicast, TCP, UDP, web, telnet, ftp). Για να τρέξει το NS απαιτεί ελεύθερο χώρο στο δίσκο 320MB και ένα μεταγλωττιστή της C++.

Ο κύριος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε το NS-2 είναι η ανάπτυξη του ενεργειακού μοντέλου των ΑΔΑ σε αυτό. Το μοντέλο αυτό έχει για κάθε κόμβο μια αρχική τιμή που αποτελεί το επίπεδο ενέργειας του, κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Αυτό είναι γνωστό ως `initialEnergy`. Έχει επίσης συγκεκριμένες τιμές ισχύος ενέργειας για κάθε πακέτο που αποστέλλεται και λαμβάνεται. Αυτές ορίζονται ως `txPower` και `rxPower`. Τα αρχεία στα οποία το ενεργειακό μοντέλο υλοποιείται είναι τα `ns/energymodel.cc` και `.h`.

Επιπλέον το NS πραγματοποιεί προσομοίωση διακριτού γεγονότος (discrete event simulation). Αυτό σημαίνει ότι τα πάντα αντιμετωπίζονται ως γεγονότα. Τα γεγονότα που εκκρεμούν διατηρούνται σε μία λίστα από το NS, το οποίο επιλέγει το πιο άμεσο γεγονός και το εκτελεί μέχρι την ολοκλήρωσή του.

Τα βασικά τμήματα τα οποία συνθέτουν τον προσομοιωτή NS είναι :

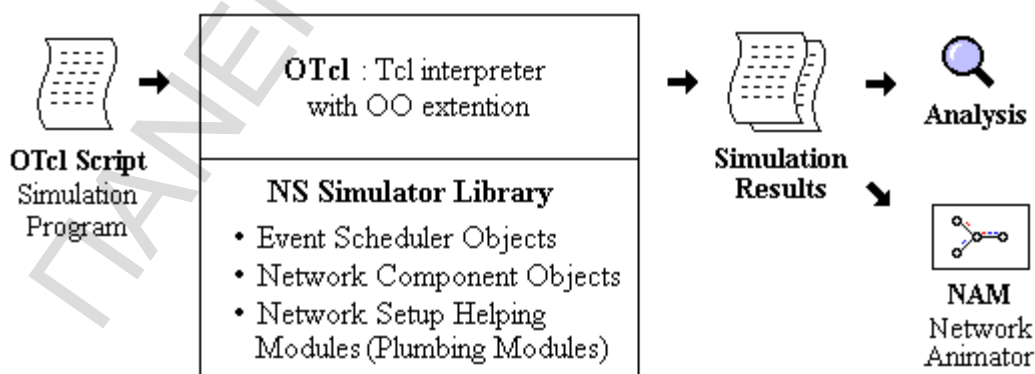
- ns (Network Simulator)
- Nam (Network AniMator)
- προ-επεξεργαστικά (γεννήτριες τοπολογιών, σχημάτων κίνησης)
- μετα-επεξεργαστικά (ανάλυση και επεξεργασία)

Όλα τα αποτελέσματα του NS αποθηκεύονται σε ένα αρχείο trace (trace file), με όνομα της μορφής \*.tr. Για τα υπόλοιπα «βοηθητικά» προγράμματα δίνονται αντίστοιχα αρχεία καταγραφής αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, το nam χρησιμοποιεί αρχεία με όνομα της μορφής \*.nam.

Το NS χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ερευνητικής δραστηριότητας, επειδή παρέχει δυνατότητα σύγκρισης παρόμοιων λύσεων με εύκολο τρόπο και έλεγχο των θεωρητικών αποτελεσμάτων. Ακόμα χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Είναι φανερό ότι η κατανόηση των αφαιρετικών εννοιών των δικτύων γίνεται ευκολότερη με την παρουσίαση αποτελεσμάτων και παραδειγμάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι το NS έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται για τη μελέτη όλων των επιπέδων του προτύπου αναφοράς OSI, από το επίπεδο εφαρμογής μέχρι το φυσικό επίπεδο.

## 5.1 Σχεδιασμός NS2

Όπως φαίνεται στο απλοποιημένο σχήμα της Εικόνας 10, το NS2 αποτελεί ένα αντικειμενοστραφές πρόγραμμα προσομοίωσης Tcl σεναρίων και απαρτίζεται από έναν προγραμματιστή προσομοίωσης γεγονότων και από κάποιες βιβλιοθήκες.



*Εικόνα 10: Απλοποιημένη άποψη χρήση για το NS2*

Για να χρησιμοποιήσει κάποιος το NS2, προγραμματίζει στη γλώσσα του σεναρίου OTcl. Ένα σενάριο OTcl θα κάνει τα ακόλουθα:

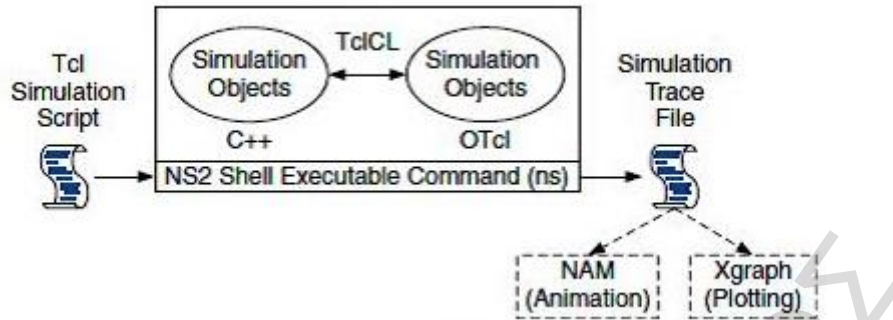
- Θα εισάγει το χρονοπρογραμματισμό των γεγονότων.
- Θα παραμετροποιήσει την τοπολογία δικτύου χρησιμοποιώντας τα αντικείμενα του δικτύου.
- Θα ενημερώνει της πηγές κυκλοφορίας για το πότε να ξεκινούν/ σταματούν την εκπομπή πακέτων μέσα στο χρονοπρογραμματισμό των γεγονότων.
- Ένας χρήστης μπορεί να προσθέσει OTcl ενότητες στο NS2 εισάγοντας ένα νέο αντικείμενο στην OTcl. Αυτό μετά θα πρέπει να συγχωνευτεί με τον αρχικό κώδικα.
- Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα του NS2 πέρα από τα δικτυακά αντικείμενα είναι ο χρονοπρογραμματισμός γεγονότων. Ένα γεγονός στο NS2 είναι ένα πακέτο ID που είναι μοναδικό για κάθε πακέτο με χρονοπρογραμματισμό και αποτελεί το δείκτη του αντικειμένου που διαχειρίζεται το γεγονός.

Ο χρονοπρογραμματισμός γεγονότων στο NS2 εκτελεί τις παρακάτω διεργασίες:

- Οργανώνει το χρονοδιάγραμμα της προσομοίωσης.
- Εκτελεί τα γεγονότα που αναμένουν στην ουρά.
- Επικαλείται στοιχεία του δικτύου στην προσομοίωση.

Ανάλογα με τους στόχους του χρήστη για ένα OTcl σενάριο προσομοίωσης, τα αποτελέσματα της αποθηκεύονται ως trace files, τα οποία μπορούν να φορτωθούν για ανάλυση από μια εξωτερική εφαρμογή:

1. Ένα NAM trace file (file.nam) για χρήση από το Network Animator Tool
2. Ένα trace file(file.tr) για χρήση στο XGraph ή TraceGraph.



Εικόνα 11 : Η ροή των γεγονότων για ένα αρχείο Tcl του NS2.

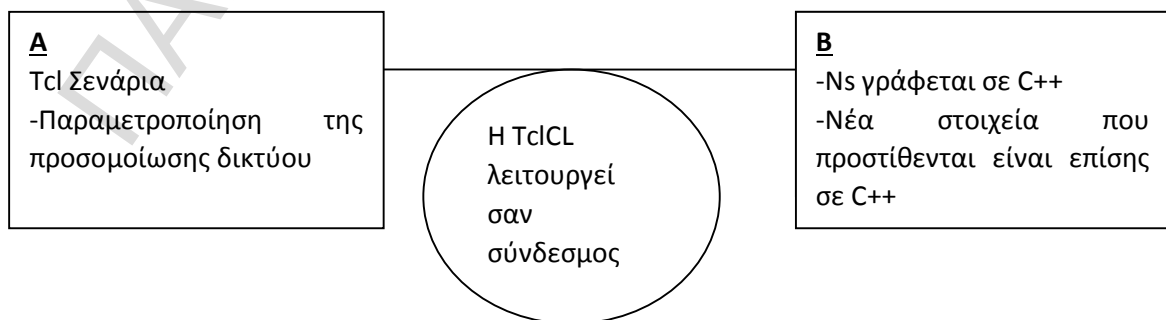
## 5.2 Σχέση C++ και OTcl

Το NS-2 είναι γραμμένο σε γλώσσα C++ με τον διερμηνέα OTcl ως ένα εμπρόσθιο κομμάτι διεπαφής για εισαγωγή δεδομένων από τον χρήστη.

Οι γλώσσες που χρησιμοποιούνται στο NS-2 είναι:

- Διττή γλώσσα προγραμματισμού:
  1. Γλώσσα σεναρίων (Tcl- Tool Command Language ή αλλιώς “tickle”)
  2. Γλώσσα προγραμματισμού του συστήματος (C/C++)
- Το NS είναι ένας Tcl διερμηνέας για να τρέξουν τα Tcl σενάκια.
- Χρησιμοποιώντας C++/OTcl, ο προσομοιωτής του δικτύου είναι απολύτως αντικειμενοστραφής.

Η γλώσσα μεσολάβησης TclCL αποτελεί το σύνδεσμο μεταξύ της C++ και της OTcl. Τα σενάκια Toolkit Command Language(Tcl/OTcl) είναι γραμμένα για να παραμετροποιήσουν τις τοπολογίες δικτύου.



Εικόνα 12: Το TclCL παρέχει σύνδεση μεταξύ C++ και OTCL

### 5.3 Χαρακτηριστικά NS-2

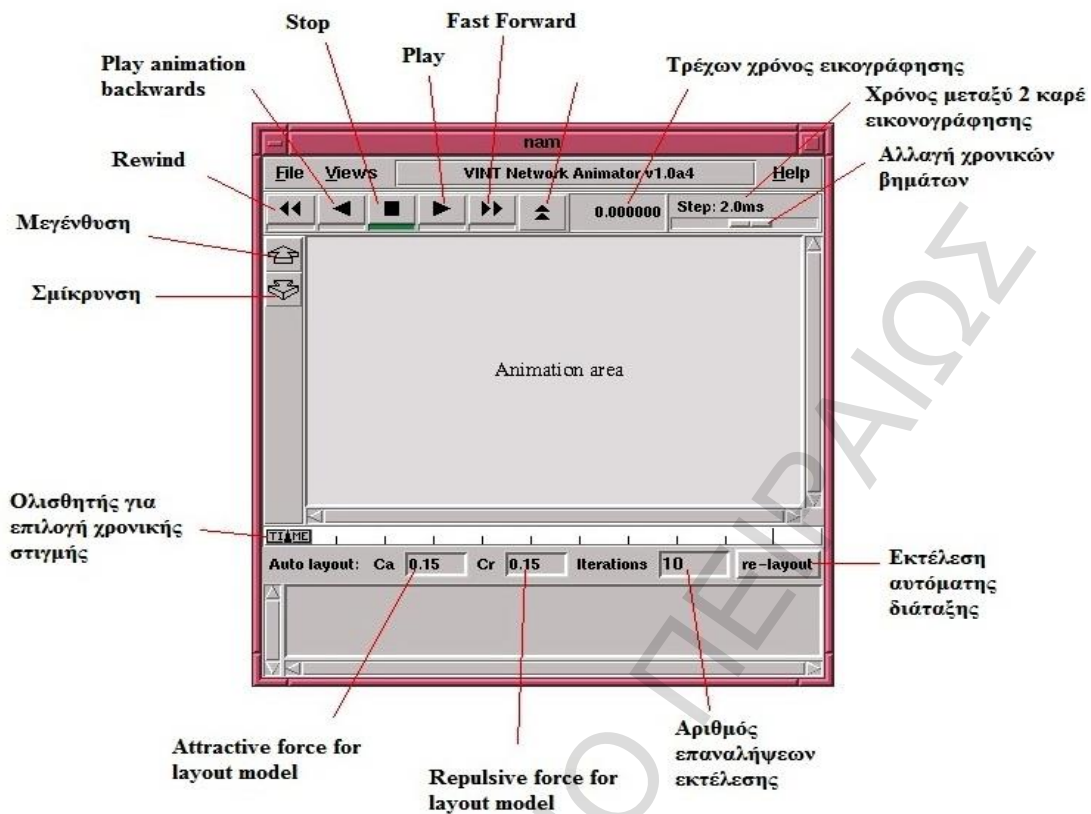
Το NS-2 ενσωματώνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Τεχνικές διαχείρισης δρομολόγησης DropTail, RED, CBQ.
2. Multicasting
3. Προσομοίωση ασύρματων δικτύων
  - Επίγεια (κυψελωτά, adhoc, GPRS, WLAN BLUETOOTH),δορυφορικά
  - IEEE 802.11 μπορούν να προσομοιωθούν, Mobile-IP και adhoc πρωτόκολλα όπως DSR, TORA, DSDV και AODV.
4. Traffic Source- www, CBR, VBR
5. Transport Agents- UDP/TCP
6. Δρομολόγηση (Routing)
7. Ροή πακέτων (Packet flow)
8. Τοπολογία δικτύου
9. Εφαρμογές- Telnet, FTP, Ping
10. Εντοπισμός πακέτων σε όλα/συγκεκριμένα links (Tracing packets).

### 5.4 Nam

Το NAM παρέχει μια οπτική ερμηνεία της τοπολογίας δικτύου που δημιουργείται. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε σαν ένα κομμάτι του VINT. Η Εικόνα 13 απεικονίζει την εφαρμογή NAM και τα μέρη από τα οποία αποτελείται.

- Παρέχει μια οπτική ερμηνεία του δικτύου που δημιουργείται
- Μπορεί να εκτελεστεί κατευθείαν από ένα σενάριο Tcl
- Τα κουμπιά χειρισμού περιλαμβάνουν play, stop, ff, rw, pause και ένα ρυθμιστή ταχύτητας προβολής.
- Παρουσιάζει πληροφορίες όπως throughput, αριθμός πακέτων σε κάθε σύνδεσμο.
- Παρέχει τη δυνατότητα drag and drop για τη δημιουργία τοπολογιών.



Εικόνα 13: Εφαρμογή NAM

## 5.5 Αναλυτές δεδομένων (Trace Data Analyzers)

Αυτή η παράγραφος περιγράφει το XGraph και το TraceGraph, δύο εφαρμογές που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση trace files που παράγονται από την προσομοίωση.

### 5.5.1 XGraph

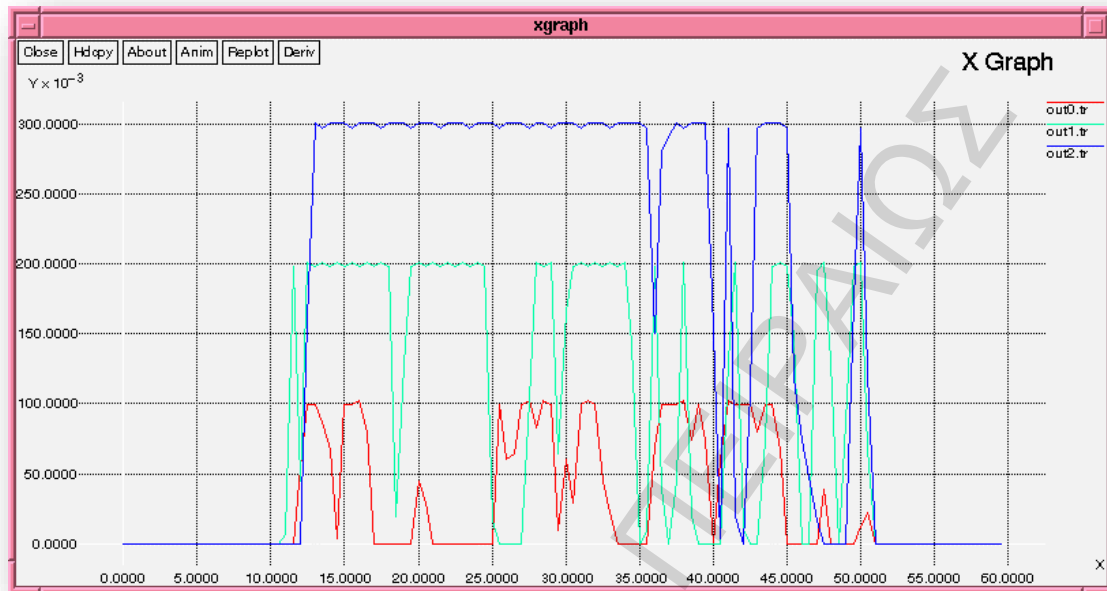
Το XGraph είναι μια X-Windows εφαρμογή που περιλαμβάνει:

- Διαδραστική σχεδίαση.
- Εικονογράφηση και τα παράγωγα της.

Για να χρησιμοποιηθεί το XGraph στο NS-2 το εκτελέσιμο αρχείο μπορεί να ανακληθεί μέσα σε ένα TCL σενάριο. Αυτό με τη σειρά του θα δημιουργήσει ένα



γράφημα που θα απεικονίζει τις πληροφορίες του trace file που παράγεται από την προσομοίωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 14.



*Εικόνα 14: Παράδειγμα διαγράμματος XGraph.*

### 5.5.2 TraceGraph

Το TraceGraph είναι ένας αναλυτής trace files που εκτελείται σε συστήματα Windows, Linux και Unix και απαιτεί Matlab. Υποστηρίζει διάφορες μορφές trace files όπως ενσύρματα, δορυφορικά και ασύρματα. [11, 21]

## Κεφάλαιο 6: Περιβάλλον προσομοίωσης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των παραπάνω πρωτοκόλλων με την χρήση του NS-2. Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικά σενάρια, χαμηλού και υψηλού φορτίου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι του ενεργειακού μοντέλου που είναι ενσωματωμένο στο NS-2 και του physical layer.

### *Βασικές Παράμετροι Ενεργειακού Μοντέλου*

|                     |  |
|---------------------|--|
| initialEnergy 1000  | # Αρχική Ενέργεια (Joule)                                  |
| txPower 0.075       | # Ισχύς εκπομπής (Watt)                                    |
| rxPower 0.075       | # Ισχύς λήψης (W)  |
| idlePower 0.2       | # Ισχύς άεργης κατάστασης (W)                              |
| sleepPower 0.005    | # Ισχύς κατάστασης ύπνου (W)                               |
| transitionPower 0.8 | # Ισχύς από κατάσταση idle σε active (W)                   |
| transitionTime 0.8  | # Χρόνος που απαιτείται από κατάσταση idle σε active (sec) |

### *Βασικές Παράμετροι Φυσικού Στρώματος (PHY Layer)*

|                      |   |
|----------------------|---|
| CPTthresh_ 10.0      | # Ισχύς πάνω από την οποία δεν έχουμε σύγκρουση πακέτων   |
| CSTthresh_ 1.559e-11 | # Ισχύς κάτω από την οποία έχουμε κατάσταση idle          |
| RXThresh_ 3.652e-10  | # Ισχύς κάτω από την οποία ένα πακέτο δε γίνεται αποδεκτό |
| Rb_ 2*1e6            | # Bandwidth μετάδοσης                                     |
| Pt_ 0.2818           | # Ισχύς μετάδοσης   |
| freq_ 914e+6         | # Συχνότητα   |

Στα σενάρια που παρουσιάζονται παρακάτω έχουν οριστεί συντεταγμένες για κάθε κόμβο όπως απαιτείται στις προσομοιώσεις του NS-2. Περισσότερες λεπτομέρειες και άλλα χαρακτηριστικά μπορούν να βρεθούν στον πλήρη κώδικα tcl, ο οποίος βρίσκεται στο παράρτημα.

## 6.1 Σενάριο 1: Χαμηλού φορτίου (Low Load)

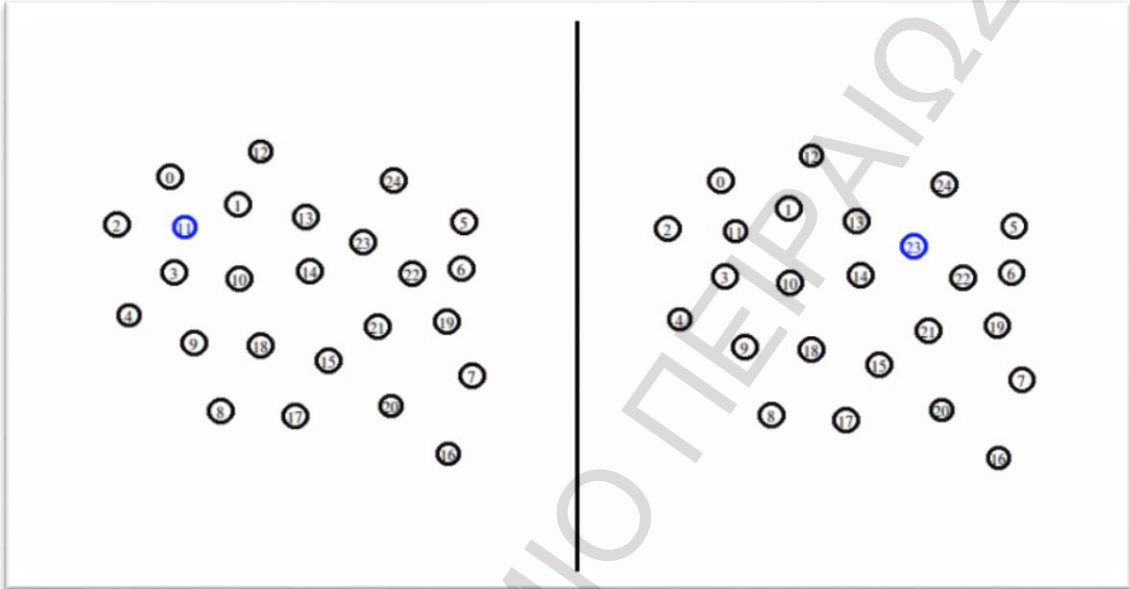
Το σενάριο χαμηλού φορτίου λαμβάνει χώρα σε διάστημα 20 λεπτών. Η περιοχή προσομοίωσης είναι διαστάσεων 500x500. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο αυτό είναι οι εξής:

| Παράμετροι                          | Τιμές                       |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Net – Interface                     | WirelessPHY                 |
| MAC πρωτόκολλο επιπέδου             | MAC/802_11                  |
| Πρωτόκολλο δρομολόγησης             | AOMDV                       |
| Μοντέλο Antenna                     | Antenna/OmniAntenna         |
| Interface Queue type                | Queue/DropTail/PriQueue     |
| Μέγιστο πακέτο στο ifq              | 50                          |
| Τύπος καναλιού                      | WirelessChannel             |
| Propagation model                   | TwoRayGround                |
| Συνολικός χρόνος προσομοίωσης       | 20 min                      |
| Μέγεθος<br>Τοπολογίας/Περιβάλλοντος | 500x500                     |
| Traffic Pattern                     | TCP agent με την κίνηση CBR |
| Αριθμός Κόμβων                      | 25                          |
| Αριθμός πακέτων ανά αποστολή        | 64                          |
| Μέγεθος πακέτων                     | 1460 bytes                  |

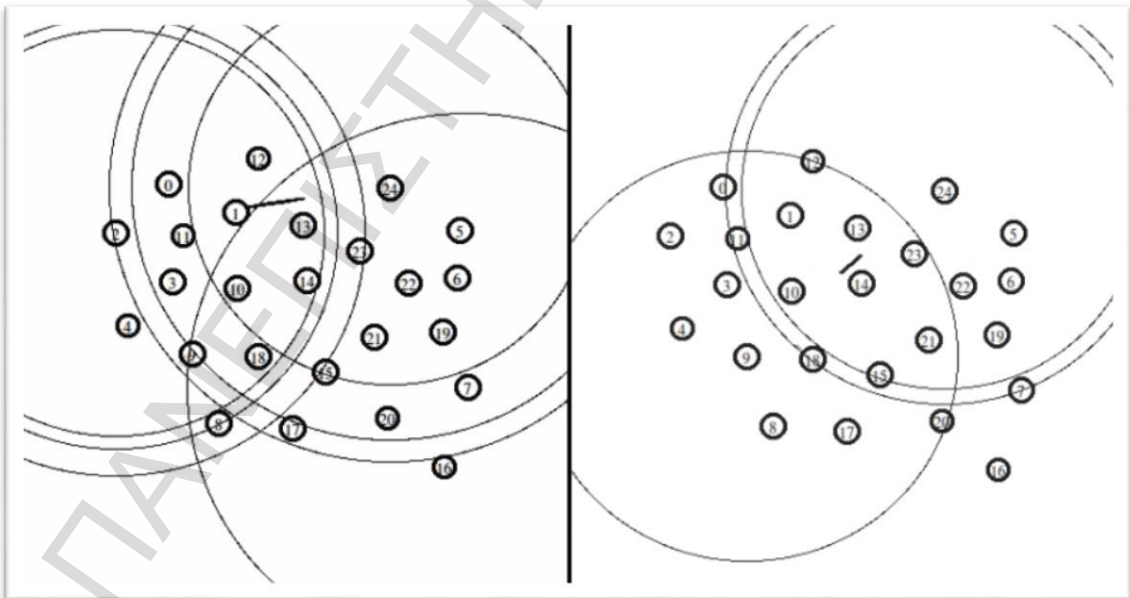
Αρχικά τοποθετήθηκαν 25 κόμβοι στον χώρο σε διάφορες συντεταγμένες. Στην συνέχεια ορίστηκαν ο αριθμός των πακέτων προς αποστολή και το μέγεθός τους. Εισήχθη το ενεργειακό μοντέλο με τις παραμέτρους που ορίστηκαν πιο πάνω και στο σενάριο αυτό εφαρμόστηκαν και τα τρία πρωτόκολλα η λειτουργία των οποίων αναλύεται ξεχωριστά παρακάτω.

## SMAC

Στο SMAC στην έναρξη της προσομοίωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, ο κάθε κόμβος ξυπνάει και θέτει τον δικό του χρονοδιάγραμμα ξυπνήματος. Ξυπνάει όταν τελειώσει ο χρόνος ύπνου ή όταν δεχθεί κάποιο μήνυμα.



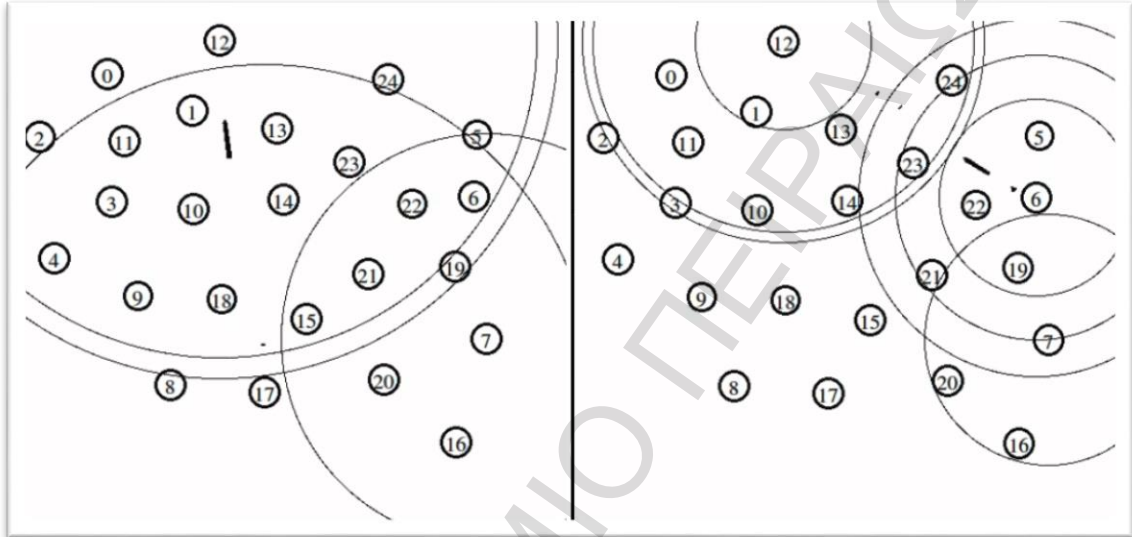
Εικόνα 15: Ξύπνημα κόμβων (μπλε) σε διαφορετικές φάσεις.



Εικόνα 16: Στην αριστερή εικόνα ο κόμβος 2 στέλνει πακέτα στον 24 ενώ ακροάζεται και ο 7. Αμέσως μετά (δεξιά) ο κόμβος 9 στέλνει στον 24 ενώ ο 7 είναι σε κατάσταση ύπνου.

## ΒΜΑC

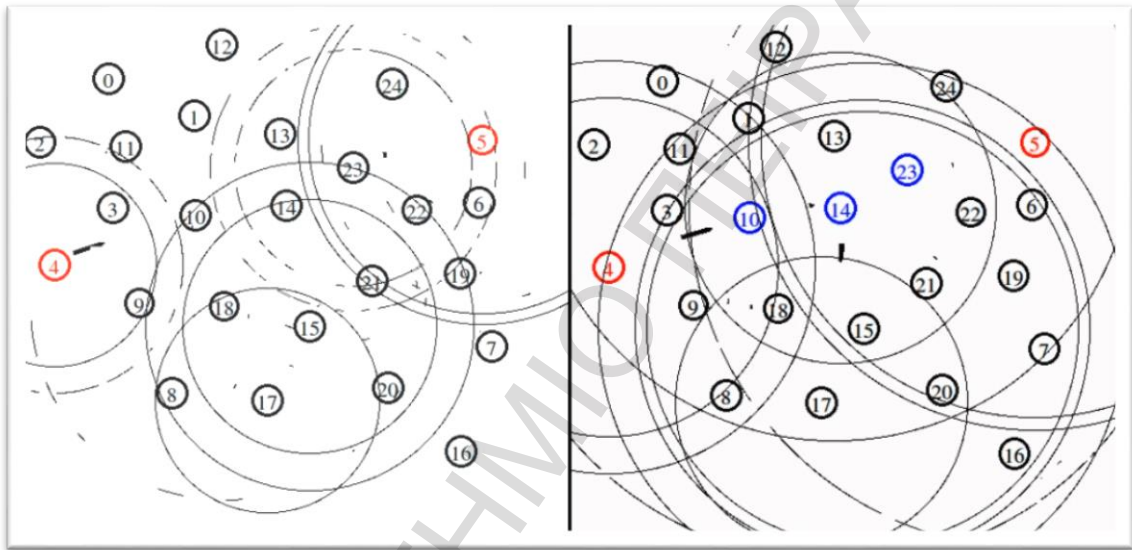
Στο ΒΜΑC δεν υπάρχει χρονοδιάγραμμα. Ο κάθε κόμβος όταν επιθυμεί να στείλει κάποιο μήνυμα στέλνει πρώτα ένα preamble για να σιγουρευτεί ότι ο παραλήπτης θα λάβει το μήνυμα, ξεκινάει να στέλνει τα πακέτα του και όταν τελειώσει τότε γυρνάει σε κατάσταση ύπνου.



Εικόνα 17: Ο κόμβος 17 στέλνει στον 12, ο 7 αντιλαμβάνεται ότι το κανάλι είναι κατειλημμένο και δεν στέλνει. Αντιστοίχως στην δεξιά εικόνα ο 6 στέλνει στον 12.

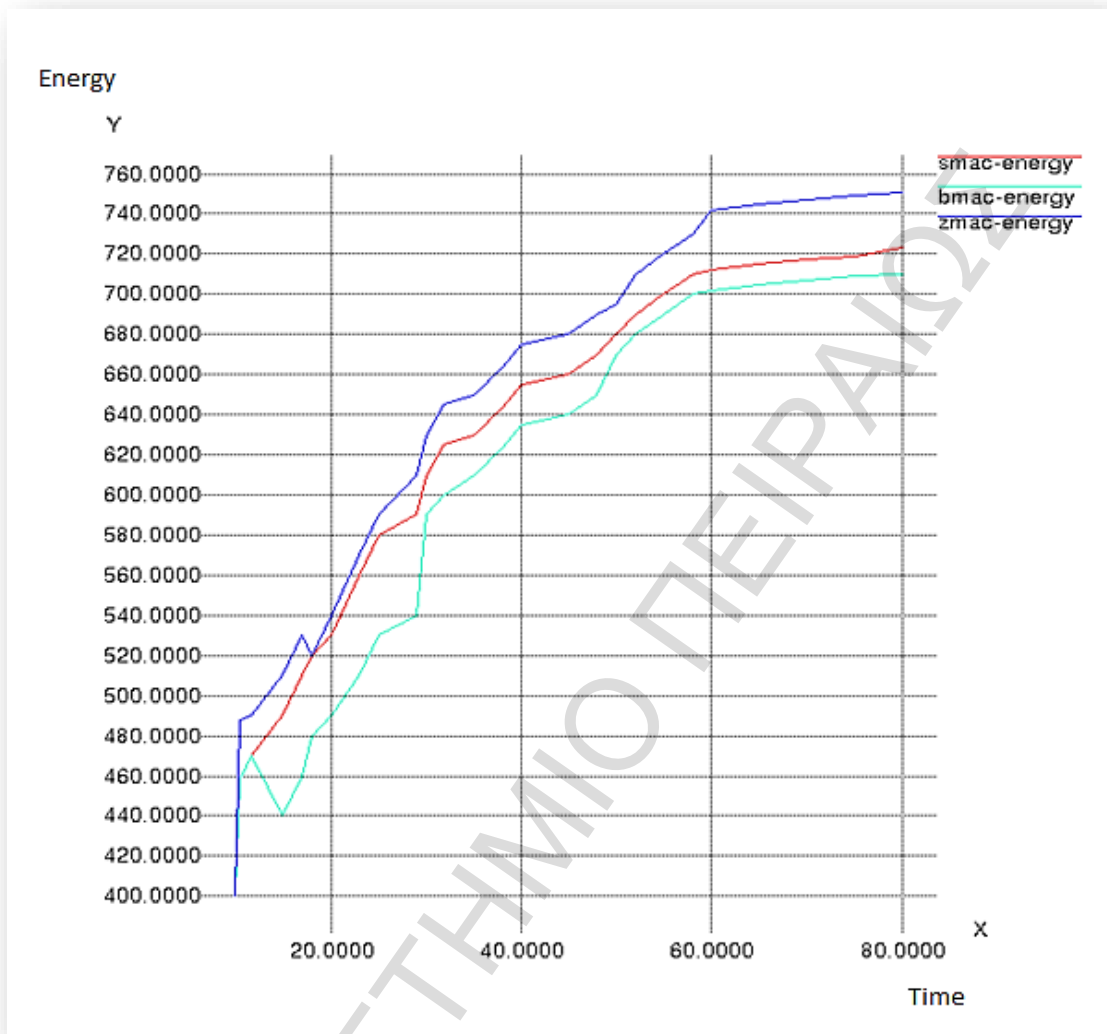
## ZMAC

Στο ZMAC ο 4<sup>ος</sup> κόμβος θέλει να επικοινωνήσει με τον 5<sup>ο</sup>. Αυτό που κάνει πρώτα είναι η αναζήτηση των γειτονικών κόμβων ώστε να προωθήσει το πακέτο. Έτσι λοιπόν ανακαλύπτει πώς το μονοπάτι 10<sup>ου</sup>-14<sup>ου</sup>-23<sup>ου</sup> κόμβου είναι το συντομότερο. Έπειτα ο 17<sup>ος</sup> θέλει να στείλει πακέτα στον 14<sup>ο</sup> και στον 23<sup>ο</sup> όμως εκείνη την στιγμή είναι απασχολημένοι. Τότε δημιουργείται χρονοδιάγραμμα ώστε όταν είναι ελεύθεροι να ξεκινήσει η μετάδοση.



*Εικόνα 18: Ο κόμβος 4 στην αριστερή εικόνα ανακαλύπτει το συντομότερο μονοπάτι (10-14-23) για να επικοινωνήσει με τον 5.*

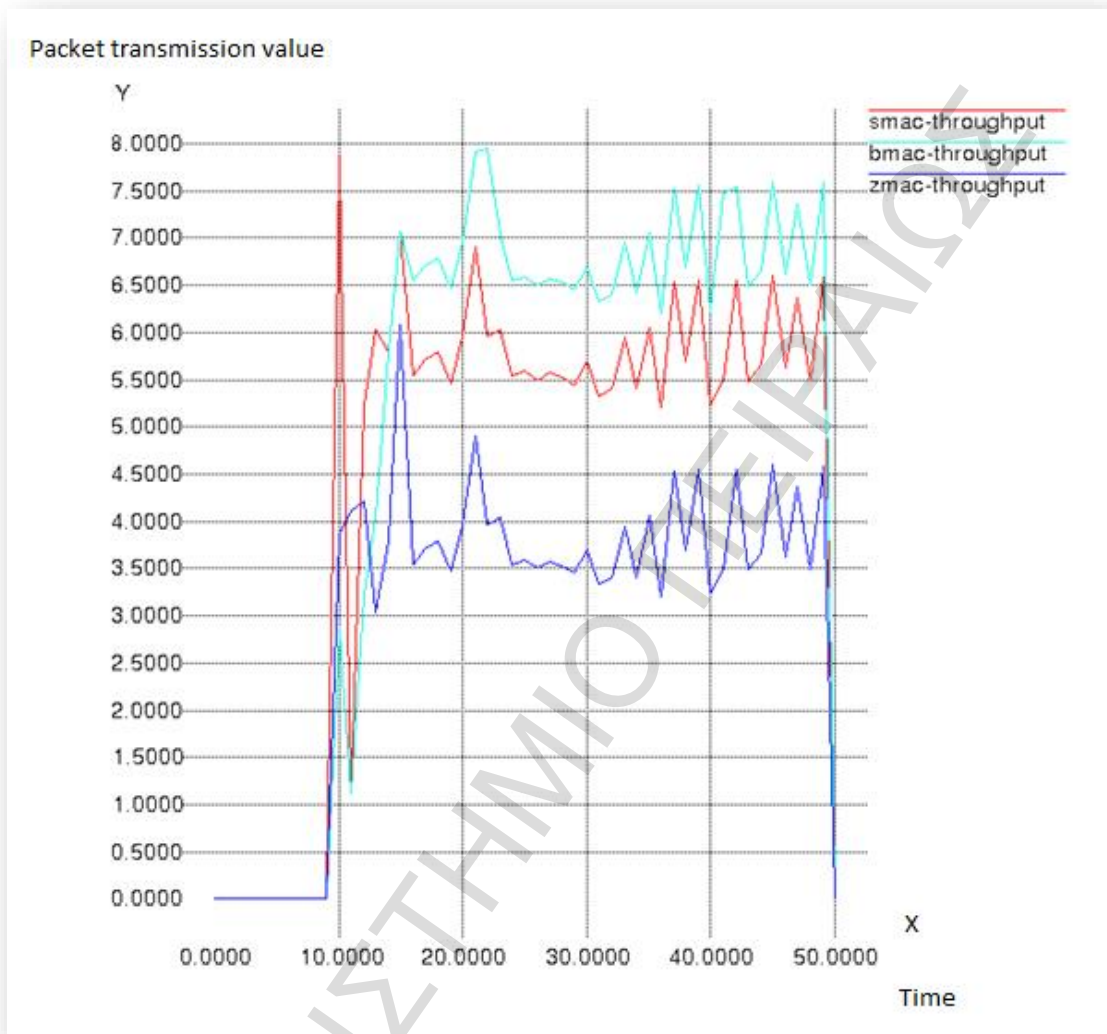
Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ενεργειακής απόδοσης σύμφωνα με το σενάριο χαμηλού φορτίου.



*Γράφημα 1: Κατανάλωση ενέργειας των τριών πρωτοκόλλων για το σενάριο χαμηλού φορτίου. Στον κάθετο άξονα του διαγράμματος απεικονίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται ενώ στον οριζόντιο η χρονική στιγμή.*

Το BMAC φαίνεται να αποδίδει καλύτερα ενεργειακά κάτι που αποδεικνύει πώς η ύπαρξη preamble είναι λιγότερο ενεργοβόρα από την επαναλαμβανόμενη διαδικασία ακρόασης-ύπνου που υπάρχει στο SMAC. Όσον αφορά το ZMAC επαληθεύεται η επιπλέον κατανάλωση ενέργειας σε συνθήκες χαμηλού φορτίου συγκριτικά με το BMAC λόγω του υψηλού overhead που δημιουργεί το μικρό μέγεθος των πακέτων.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα throughput σύμφωνα με το σενάριο χαμηλού φορτίου.



*Γράφημα 2: Throughput των τριών πρωτοκόλλων για το σενάριο χαμηλού φορτίου. Στον κάθετο άξονα περιγράφεται η τιμή μετάδοσης των πακέτων και στον οριζόντιο η χρονική στιγμή.*

Παρατηρούμε ότι το BMAC αποδίδει γενικά καλύτερα από τα υπόλοιπα δύο πρωτόκολλα. Αυτό συμβαίνει επειδή λειτουργεί καλύτερα σε συνθήκες χαμηλού φορτίου μέσω του Clear Channel Assessment που ανιχνεύει πότε το κανάλι χρησιμοποιείται. Επίσης το ZMAC φαίνεται να έχει χειρότερη απόδοση λόγω του χαμηλού φορτίου καθώς συμπεριφέρεται ως CSMA πρωτόκολλο και αντιμετωπίζει το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού που μπορεί να εμφανιστεί σε two-hop γειτονιές.



## 6.2 Σενάριο 2: Υψηλού φορτίου (High Load)

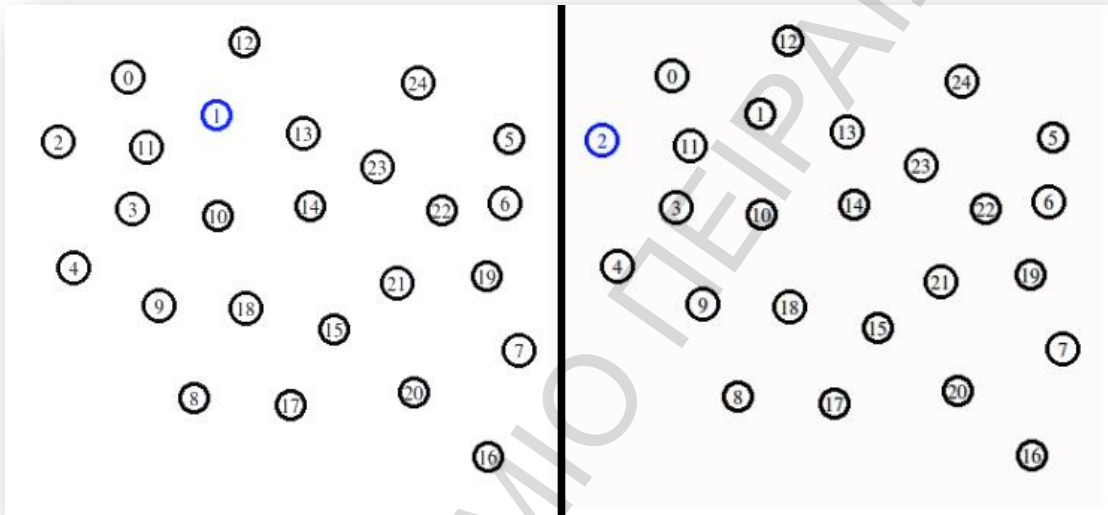
Το σενάριο υψηλού φορτίου λαμβάνει χώρα σε διάστημα 30 λεπτών. Η περιοχή προσομοίωσης είναι διαστάσεων 650x600. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το σενάριο αυτό είναι οι εξής:

| Παράμετροι                          | Τιμές                       |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Net – Interface                     | WirelessPHY                 |
| MAC πρωτόκολλο επιπέδου             | MAC/802_11                  |
| Πρωτόκολλο δρομολόγησης             | AOMDV                       |
| Μοντέλο Antenna                     | Antenna/OmniAntenna         |
| Interface Queue type                | Queue/DropTail/PriQueue     |
| Μέγιστο πακέτο στο ifq              | 50                          |
| Τύπος καναλιού                      | WirelessChannel             |
| Propagation model                   | TwoRayGround                |
| Συνολικός χρόνος προσομοίωσης       | 30 min                      |
| Μέγεθος<br>Τοπολογίας/Περιβάλλοντος | 650x600                     |
| Traffic Pattern                     | TCP agent με την κίνηση CBR |
| Αριθμός Κόμβων                      | 25                          |
| Αριθμός πακέτων ανά αποστολή        | 20000                       |
| Μέγεθος πακέτων                     | 15460 bytes                 |

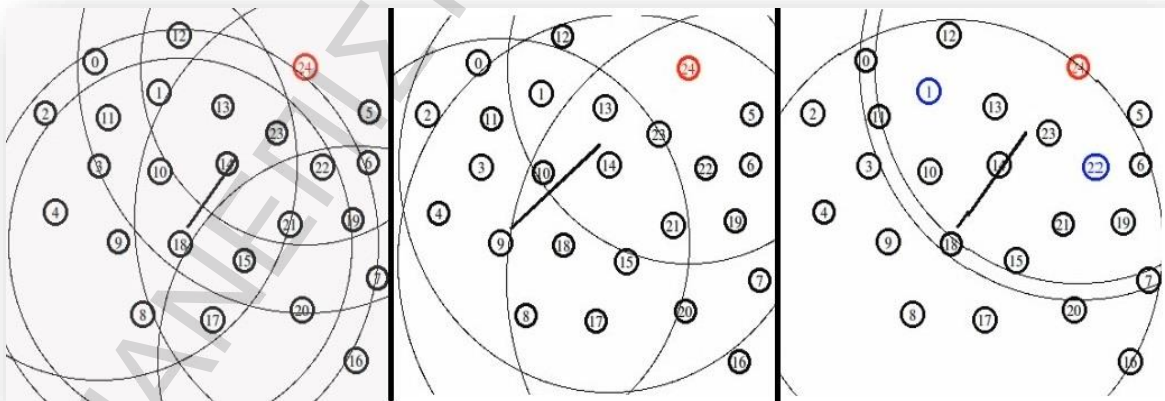
Σε αυτό το σενάριο δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες διαφορές στην απεικόνιση των κόμβων όσον αφορά το BMAC και SMAC. Μόνο ότι πλέον έχουμε αρκετές απώλειες πακέτων.

## SMAC

Το SMAC, όπως αναφέρθηκε και πιο πριν, είναι το πρωτόκολλο που πραγματοποιεί περιοδικό ξύπνημα και ύπνο. Στην αρχή ξυπνάει και ακούει αν κάποιος θέλει να του μιλήσει. Στην συνέχεια αν δεν ανιχνεύσει κάτι θέτει το δικό του χρονοδιάγραμμα ξυπνήματος και μεταβαίνει σε κατάσταση ύπνου μέχρι να λήξει ο χρόνος.



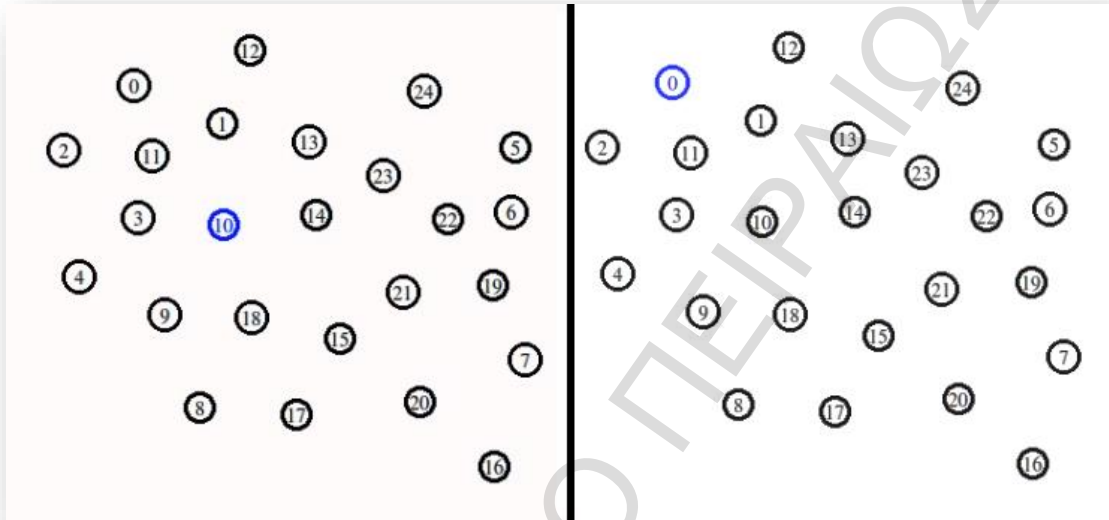
*Εικόνα 19: Ξύπνημα κόμβων (μπλε) σε διαφορετικές φάσεις*



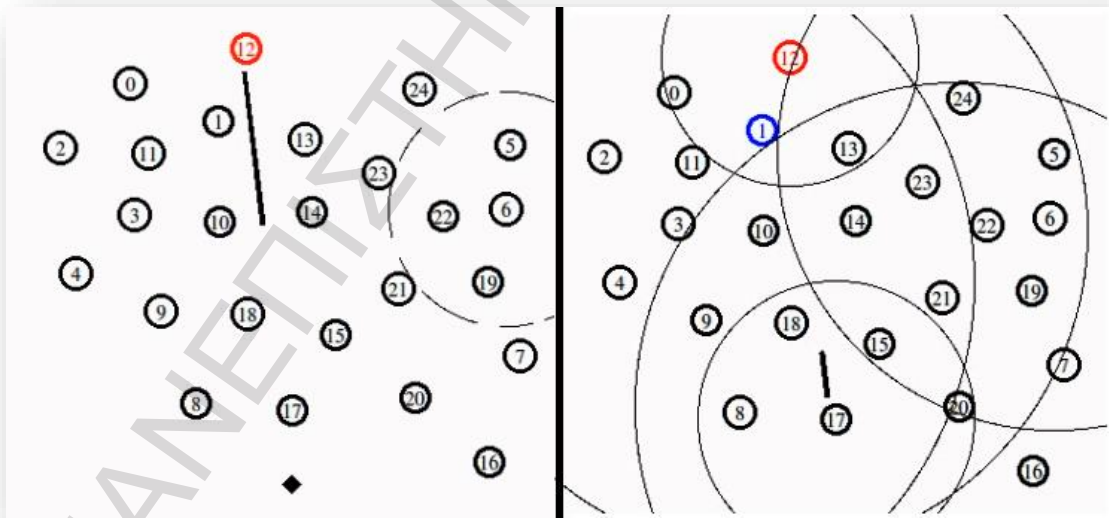
*Εικόνα 20: Στις πρώτες δυο εικόνες οι κόμβοι 8 και 9 στέλνουν δεδομένα στον 24 ενώ στην τρίτη οι 1 και 22 ξυπνούν.*

## ΒΜΑC

Το ΒΜΑC, όπως αναφέρθηκε και πριν είναι το πρωτόκολλο όπου δεν υπάρχει χρονοδιάγραμμα. Εκτελεί προκαθορισμένα ξυπνήματα και αν δεν ανιχνευθεί κάποιος θόρυβος στο κανάλι πέφτε σε κατάσταση ύπνου.



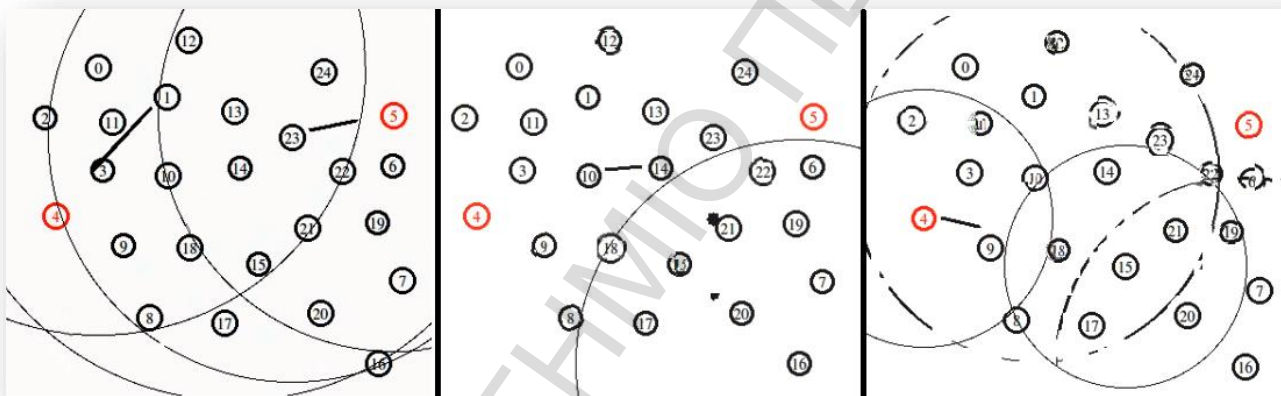
*Εικόνα 21: Περιοδικό ξύπνημα κόμβων.*



*Εικόνα 22: Ο κόμβος 17 στέλνει μηνύματα στον 12 ενώ μετά από λίγο αφουγκράζεται το κανάλι και ο 1.*

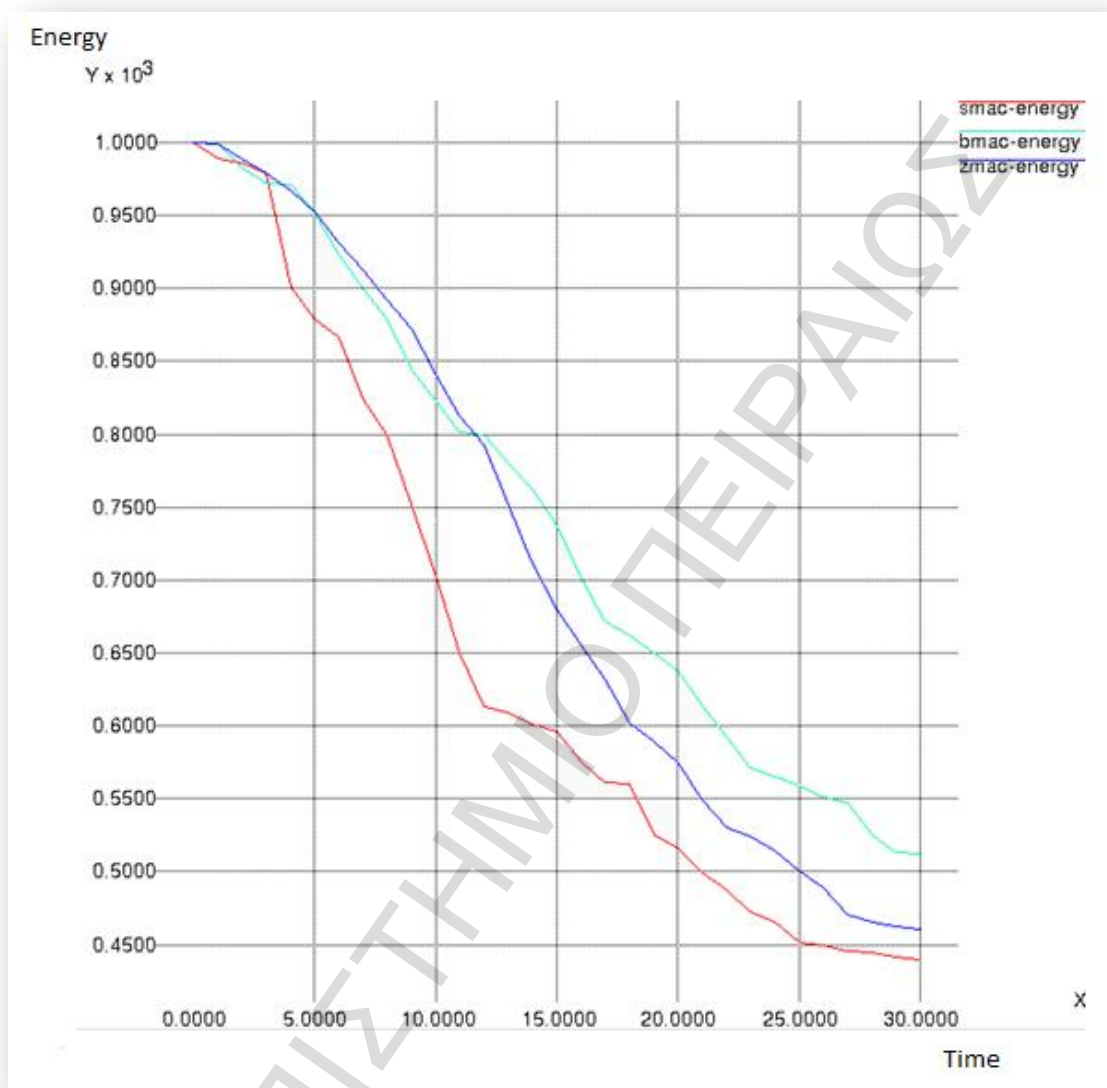
## ZMAC

Μεγαλύτερη διαφορά παρατηρούμε στο ZMAC το οποίο ως υβριδικό μοντέλο αλλάζει τον τρόπο μετάδοσης και χρησιμοποιεί δύο ακόμη μονοπάτια. Συγκεκριμένα ο κόμβος 4 θέλει να στείλει στον 5 στην αρχή γίνεται η αναζήτηση των γειτόνων και το μονοπάτι είναι μέσω των κόμβων 10-14-23. Επειδή όμως έχουμε υψηλή κίνηση μόλις τελειώσει το χρονοδιάγραμμα τους θα έχει υψηλή απώλεια πακέτων. Γι' αυτό ορίζονται μονοπάτια αν όχι γειτονικών κόμβων, αυτών που έχει εκχωρηθεί το timeslot του 4<sup>ου</sup> κόμβου και πιο συγκεκριμένα ο κόμβος 1 και ο κόμβος 15 όπως φαίνεται και στην Εικόνα 23.



*Εικόνα 23: Χρήση από το πρωτόκολλο ZMAC τριών διαφορετικών μονοπατιών λόγω υψηλού φορτίου για την μετάδοση των πακέτων.*

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ενεργειακής απόδοσης σύμφωνα με το σενάριο υψηλού φορτίου.

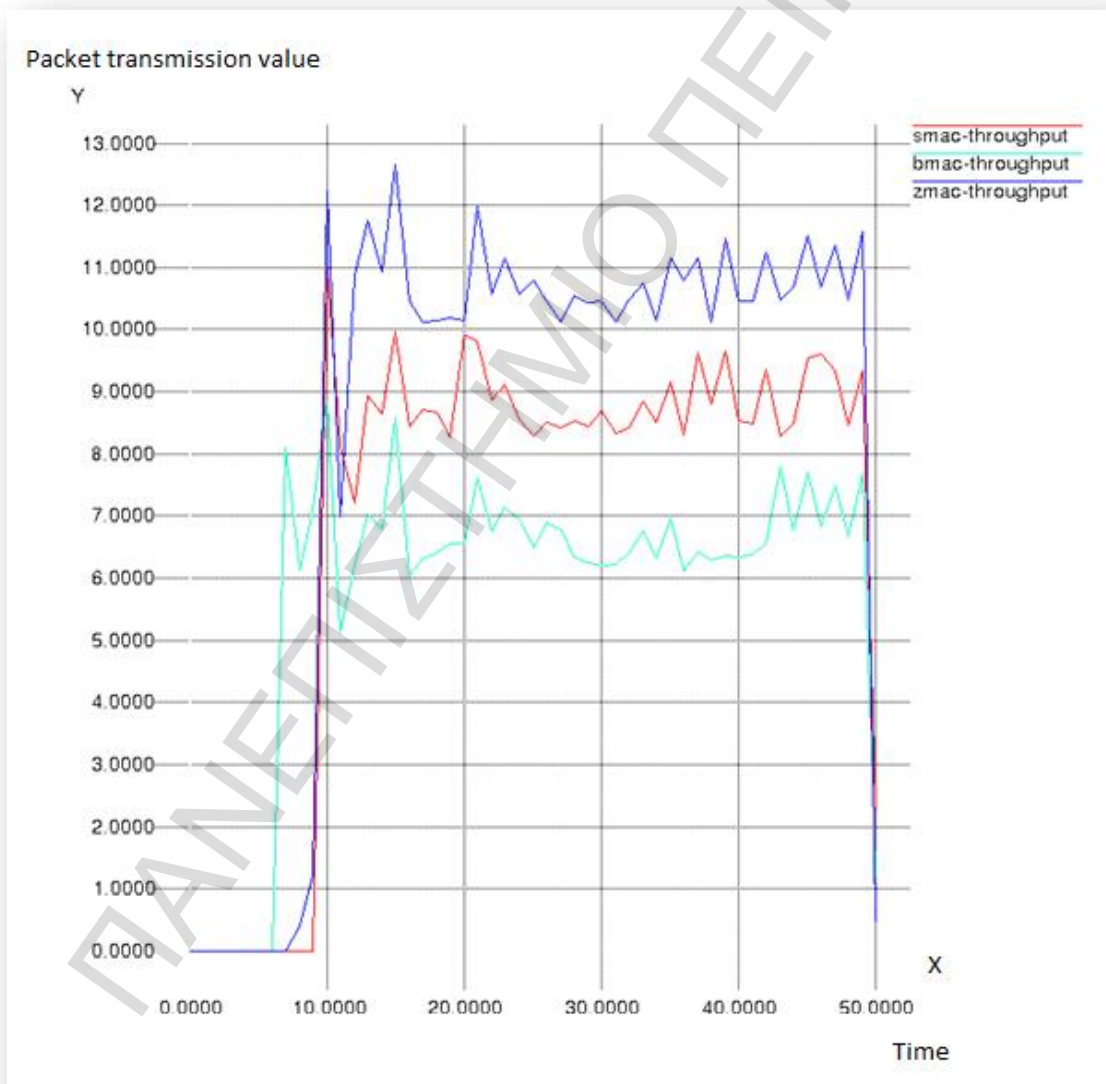


*Γράφημα 3: Κατανάλωση ενέργειας των τριών πρωτοκόλλων για το σενάριο υψηλού φορτίου. Στον κάθετο άξονα του διαγράμματος απεικονίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται ενώ στον οριζόντιο η χρονική στιγμή.*

Παρατηρείται ότι το BMAC καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια και το SMAC την λιγότερη. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς το SMAC σε συνθήκες υψηλού φορτίου όπως έχει ήδη αναφερθεί ανταποκρίνεται καλύτερα με την βοήθεια του μηχανισμού message passing και του avoidance overhearing. Αντιθέτως το BMAC σε συνθήκες υψηλού φορτίου αντιμετωπίζει πολλά προβλήματα overhearing επειδή οι κόμβοι παραμένουν ξύπνιοι μέχρι να παραλάβουν ολόκληρη την πληροφορία με

αποτέλεσμα, να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια κατά την λειτουργία του. Επιπλέον επαληθεύεται πως το ZMAC είναι ενεργειακά καλύτερο από το BMAC και προσαρμόζει τη λειτουργία του αναλόγως των συνθηκών, εφαρμόζοντας τους μηχανισμούς του TDMA. Στο τέλος του διαγράμματος παρατηρείται μια σταθεροποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης των πρωτοκόλλων η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι στις τελευταίες χρονικές στιγμές οι κόμβοι παύουν να στέλνουν/λαμβάνουν πακέτα. Σε περίπτωση αύξησης του χρόνου, επαναλαμβάνεται η διαδικασία εξαρχής.

Στο τελευταίο διάγραμμα περιγράφεται το throughput των τριών πρωτοκόλλων.



**Γράφημα 4:** Throughput των τριών πρωτοκόλλων για το σενάριο υψηλού φορτίου. Στον κάθετο άξονα περιγράφεται η τιμή μετάδοσης των πακέτων και στον οριζόντιο η χρονική στιγμή.

Παρατηρείται η υπεροχή του ZMAC ως προς τα άλλα δύο πρωτόκολλα καθώς όπως έχει αναφερθεί εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα του CSMA και του TDMA εισάγει όμως ένα επιπλέον χαρακτηριστικό: Οι κόμβοι μέσω των ECN μηνυμάτων μεταβαίνουν σε κατάσταση HCL επιτρέποντας στους μη κάτοχους να “κλέψουν” ελεύθερο slot. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτυγχάνει υψηλή χρήση καναλιών καθώς ένας κόμβος μπορεί να ξεκινήσει την εκπομπή μόλις απελευθερωθεί κάποιο κανάλι. Τέλος το BMAC είχε χαμηλό ρυθμό απόδοσης λόγω των πολλαπλών συγκρούσεων που παρουσιάζονται σε συνθήκες υψηλού φορτίου.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

## Συμπεράσματα - Μελλοντική Έρευνα

Συνοψίζοντας, μετά την παρουσίαση και ανάλυση των τριών πρωτοκόλλων SMAC, BMAC και ZMAC καθώς και την προσομοίωση τους στο πρόγραμμα NS2 για δυο διαφορετικά σενάρια, χαμηλού και υψηλού φορτίου, καταλήξαμε στη σύγκριση τους όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας και στο throughput.

Στο σενάριο χαμηλού φορτίου παρατηρήθηκε πως το BMAC υπερέχει των άλλων δυο πρωτοκόλλων. Η υπεροχή αυτή οφείλεται κατά πρώτον ενεργειακά λόγω της ύπαρξης preamble και κατά δεύτερον στο throughput λόγω της εφαρμογής του Clear Channel Assessment. Στο σενάριο υψηλού φορτίου παρατηρήθηκε πως ενεργειακά υπερέχει το SMAC λόγω του μηχανισμού message passing και του avoidance overhearing ενώ στο throughput καλύτερη επίδοση είχε το ZMAC λόγω του υβριδικού σχεδιασμού του.

Προφανώς δε μπορεί να χαρακτηριστεί κάποιο από τα τρία αυτά πρωτόκολλα ως το καλύτερο καθώς όπως αποδείχθηκε από τις προσομοιώσεις οι συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο καλούνται να ανταποκριθούν επηρεάζουν την αποδοτικότητα τους. Άρα πριν την επιλογή τους θα πρέπει να γίνεται μια όσο το δυνατόν καλύτερη εκτίμηση των συνθηκών του περιβάλλοντος στο οποίο καλούνται να ανταπεξέλθουν αλλά και μια ιεράρχηση των αναγκών που επιθυμείται να καλύψουν (πχ. μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κτλ). Έτσι μπορεί να επιτευχθεί η καταλληλότερη επιλογή ενός εκ των τριών πρωτοκόλλων.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αποτελέσει μια πιο εκτενής σύγκριση των τριών πρωτοκόλλων σε περίπτωση όπου οι κόμβοι είναι κινούμενοι αντί των σταθερών που έχουν οριστεί στα σενάρια όπως επίσης το φορτίο του δικτύου να αυξομειώνεται εφαρμόζοντας έτσι ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο που ανταποκρίνεται στις ανάγκες της καθημερινότητας. Απαραίτητη τέλος κρίνεται η καλύτερη μοντελοποίηση των σεναρίων και η διεξαγωγή πρόσθετων προσομοιώσεων, προκειμένου τα συμπεράσματα να είναι ξεκάθαρα και αδιαμφισβήτητα.



## Βιβλιογραφία

### *Papers*

- [1] Agrawal, P., & Chen, J. Y. H. C. (2001). A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks , 343–358.
- [2] Corbellini, G., Abgrall, C., Strinati, E. C., & Cea-leti, A. D. (n.d.). Energy Evaluation of Preamble Sampling MAC Protocols for Wireless Sensor Networks, 1–23.
- [3] Daly, D. C., & Chandrakasan, A. (n.d.). Energy Efficiency of the IEEE 802 . 15 . 4 Standard in Dense Wireless Microsensor Networks : Modeling and Improvement Perspectives.
- [4] Downard, I., & Dc, W. (n.d.). Simulating Sensor Networks in NS-2, 1–9.
- [5] Ghosh, S., Veeraraghavan, P., Singh, S., & Zhang, L. (n.d.). Performance of a Wireless Sensor Network MAC Protocol with a Global Sleep Schedule, 99–114.
- [6] Heidemann, J. (n.d.). Energy and latency control in low duty cycle MAC protocols. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2005, 2*, 676–682. doi:10.1109/WCNC.2005.1424589
- [7] Heidemann, J., & Estrin, D. (n.d.). An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 3*, 1567–1576. doi:10.1109/INFCOM.2002.1019408
- [8] In, O., & Hoc, D. (2006). TOPICS IN ADHOC AND SENSOR NETWORKS MAC Protocols for Wireless Sensor Networks : A Survey, (April), 115–121.
- [9] Kumar, S., & Chauhan, S. (2011). A Survey on Scheduling Algorithms for Wireless Sensor Networks, *20(5)*, 7–13.
- [10] Lewis, F. L. (2004). Wireless Sensor Networks. (C. S. Raghavendra, K. M. Sivalingam, & T. Znati, Eds.), 1–18. doi:10.1007/b117506
- [11] Meeneghan, P., & Delaney, D. (n.d.). An Introduction to NS , Nam and OTcl scripting.
- [12] Polastre, J. (n.d.). Sensor Network Media Access Design.
- [13] Polastre, J., Hill, J., & Culler, D. (n.d.). Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks Categories and Subject Descriptors, 95–107.
- [14] Project, T. V., Berkeley, U. C., Parc, X., Fall, K., & Varadhan, E. K. (n.d.). The Ns manual, (3).

- [15] Sha, M., Hackmann, G., & Lu, C. (n.d.). Energy-Efficient Low Power Listening for Wireless Sensor Networks in Noisy Environments Categories and Subject Descriptors.
- [16] Shukur, M. I., Chyan, L. S., & Yap, V. V. (n.d.). Wireless Sensor Networks : Delay Guarentee and Energy Efficient MAC Protocols, 1061–1065.
- [17] Warriar, a., Aia, M., & Sichitiu, M. L. (2008). Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(3), 511–524. doi:10.1109/TNET.2007.900704
- [18] Ye, W., Heidemann, J., & Estrin, D. (n.d.). Medium Access Control with Coordinated , Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks, (January 2003), 1–14.
- [19] Ye, W., Heidemann, J., & Estrin, D. (2004). Sleeping for Wireless Sensor Networks, (June), 493–506.
- [20] Ma, J., Lou, W., Wu, Y., Li, X.-Y., & Chen, G. (2009). Energy Efficient TDMA Sleep Scheduling in Wireless Sensor Networks. *IEEE INFOCOM 2009 - The 28th Conference on Computer Communications*, 630–638. doi:10.1109/INFCOM.2009.5061970

### Web Sites

- [21] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [22] <http://www.wikipedia.com>
- [23] <http://www.isi.edu/ilense/software/smac/>
- [24] <http://www.mathcs.emory.edu/~cheung/Courses/558-old/Syllabus/90-NS/trace.html>
- [25] <http://ns2-master.blogspot.gr/2011/04/sample-coding-in-wireless.html>
- [26] <http://www4.ncsu.edu/~rhee/export/zmac/software/zmac/zmac.htm>
- [27] <http://nile.wpi.edu/NS/>
- [28] <http://wsn-bmac.googlecode.com/svn/trunk/>
- [29] [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_sensor\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network)

## Παράρτημα

### Εγκατάσταση NS-2

Ο δικτυακός προσομοιωτής NS-2 μπορεί να βρεθεί στη σελίδα <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns.html>. Όλη η τεκμηρίωση μπορεί να βρεθεί μέσω δεσμών στην κεντρική σελίδα <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Στους καταλόγους `~ns-2/tcl/ex` και `~ns-2/tcl/test` της εγκατάστασης βρίσκονται πολλά παραδείγματα προγραμμάτων.

Για την εγκατάσταση του NS-2 σε συστήματα UNIX υπάρχουν δύο επιλογές. Είτε να εγκαταστήσετε όλο το πρόγραμμα «με τη μία» κατεβάζοντας το αρχείο `ns-allinone-2.35.tar` από τη σελίδα <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-build.html>, είτε να εγκαταστήσετε ξεχωριστά τα τμήματά του, τα οποία μπορείτε να βρείτε στην ίδια σελίδα. Αν και ο δεύτερος τρόπος εξοικονομεί χώρο στο δίσκο, είναι πολυπλοκότερος από τον πρώτο, ο οποίος είναι αυτοματοποιημένος και για το λόγο αυτό προτείνεται η «με τη μία» εγκατάσταση (all-in-one).

Αφού λοιπόν κατεβάσουμε το αρχείο το αποσυμπιέζουμε με την εντολή `gunzip ns-allinone-2.35.tar.gz` και το εξάγουμε με την εντολή `tar -xvf ns-allinone-2.35.tar`. Στη συνέχεια μεταβαίνουμε στον κατάλογο `ns-allinone-2.35` και τρέχουμε την εντολή `./install`. Η διαδικασία αυτή κρατάει αρκετή ώρα και είναι αυτοματοποιημένη. Το μόνο που πρέπει να προσέξουμε είναι ότι στο τέλος πρέπει να προσθέσουμε κάποιες βιβλιοθήκες, σύμφωνα με τις οδηγίες που μας δίνει το ίδιο το πρόγραμμα.

Συγκεκριμένα, πρέπει να οριστούν οι διαδρομές `/rootdirectory/ns-allinone-2.35/otcl-1.14` και `/rootdirectory/ns-allinone-2.35/lib` στη μεταβλητή περιβάλλοντος `LD_LIBRARY_PATH`, και η διαδρομή `/rootdirectory/ns-allinone-2.35/tcl8.5.10/library` στη μεταβλητή περιβάλλοντος `TCL_LIBRARY` (όπου `rootdirectory` ο κατάλογος κάτω από τον οποίο έχει γίνει η αποσυμπίεση του αρχείου). Για παράδειγμα, αν ο

κατάλογος ns-allinone-2.35 βρίσκεται κάτω από το /usr/adm και χρησιμοποιείται φλοιός sh οι εντολές που θα πρέπει να εκτελεστούν είναι:

```
$ export LD_LIBRARY_PATH=/usr/adm/ns-allinone-2.35/otcl-1.14:/usr/adm/ns-allinone-2.35/lib
```

```
$ export TCL_LIBRARY=/usr/adm/ns-allinone-2.35/tcl8.5.10/library
```

Αφού γίνουν όλα αυτά τρέχουμε την εντολή ./validate που βρίσκεται στον κατάλογο ns-2.35 για επαλήθευση της εγκατάστασης. Η επαλήθευση αυτή είναι εξαιρετικά χρονοβόρα. [4,21,25,27]

## TCL file example

```
set val(chan) Channel/WirelessChannel
set val(prop) Propagation/TwoRayGround
set val(netif) Phy/WirelessPhy
set val(mac) Mac/802_11
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue
set val(ll) LL
set val(ant) Antenna/OmniAntenna
set val(x) 600
set val(y) 650
set val(ifqlen) 50
set val(seed) 0.0
set val(adhocrouting) BMAC
set val(nn) 25
set val(cp) cbr-bmac
set val(sc) scen
set val(len) len
set val(stop) 20.0
set val(traffic) tcp
set val(rxPower) 0.1
set val(txPower) 0.1
set val(energymodel) EnergyModel
set val(initialenergy) 1000
set val(sleeppower) 0.00005
set val(ener) 500
set val(energy) cal
set val(freq) node
```

```

set ns_ [new Simulator]
LL set mindelay_ 50us
LL set delay_ 25us
LL set bandwidth_ 0

Agent/Null set sport_ 0
Agent/Null set dport_ 0

Agent/CBR set sport_ 0
Agent/CBR set dport_ 0

Agent/TCPSink set sport_ 0
Agent/TCPSink set dport_ 0

Agent/TCP set sport_ 0
Agent/TCP set dport_ 0
Agent/TCP set packetSize_ 15460

Queue/DropTail/PriQueue set Prefer_Routing_Protocols 1

Antenna/OmniAntenna set X_ 0
Antenna/OmniAntenna set Y_ 0
Antenna/OmniAntenna set Z_ 1.5
Antenna/OmniAntenna set Gt_ 1.0
Antenna/OmniAntenna set Gr_ 1.0

Phy/WirelessPhy set CPTresh_ 10.0
Phy/WirelessPhy set CSTresh_ 1.559e-11
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 3.652e-10
Phy/WirelessPhy set Rb_ 2*1e6
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.2818
Phy/WirelessPhy set freq_ 914e+6
Phy/WirelessPhy set L_ 1.0

set topo [new Topography]

set tracefd [open bmac.tr w]
set namtrace [open bmac.nam w]

$ns_ trace-all $tracefd
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)

$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

set god_ [create-god $val(nn)]

source $val(len)

$ns_ node-config -adhocRouting $val(adhocRouting) \
                 -llType $val(ll) \
                 -macType $val(mac) \

```

```

        -ifqType $val(ifq) \
        -ifqLen $val(ifqlen) \
        -antType $val(ant) \
        -propType $val(prop) \
        -phyType $val(netif) \
        -channelType $val(chan) \
-topoInstance $topo \
-agentTrace ON \
        -routerTrace ON \
        -macTrace ON
$ns_ node-config -energyModel EnergyModel \
        -initialEnergy 1000 \
        -txPower 0.075 \
        -rxPower 0.075 \
        -idlePower 0.2 \
        -sleepPower 0.005\
        -transitionPower 0.8 \
        -transitionTime 0.8 \

for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0
}

set node(0) 20
set node(1) 80
set node(2) 20
set node(3) 20
set node(4) 10
set node(5) 17
set node(6) 60
set node(7) 50
set node(8) 20
set node(9) 70
set node(10) 80
set node(11) 30
set node(12) 17
set node(13) 20
set node(15) 20
set node(20) 20
#set $node_(21) 3
set node(19) 20
set node(16) 60
set node(17) 60
set node(18) 60
#set $node_(2) 60
set node(14) 60
source trbmac
set x0 400
set y0 400

set x1 350
set y1 350

set x2 450

```

```
set y2 350

set x3 375
set y3 300

set x4 425
set y4 300

set x5 450
set y5 500

set x6 550
set y6 650

set x7 450
set y7 350

set x8 600
set y8 350

set a [expr $x5 - $x0]
set a1 [expr $y5 - $y0]
set a2 [expr $a * $a]
set a3 [expr $a1 * $a1]
set a4 [expr $a2 + $a3]
set a5 [expr sqrt($a4)]

set x50 $a5

set b [expr $x5 - $x1]
set b1 [expr $y5 - $y1]
set b2 [expr $b * $b]
set b3 [expr $b1 * $b1]
set b4 [expr $b2 + $b3]
set b5 [expr sqrt($b4)]

set x51 $b5

set c [expr $x5 - $x2]
set c1 [expr $y5 - $y2]
set c2 [expr $c * $c]
set c3 [expr $c1 * $c1]
set c4 [expr $c2 + $c3]
set c5 [expr sqrt($c4)]

set x52 $c5

set d [expr $x5 - $x3]
set d1 [expr $y5 - $y3]
set d2 [expr $d * $d]
set d3 [expr $d1 * $d1]
set d4 [expr $d2 + $d3]
set d5 [expr sqrt($d4)]

set x53 $d5
```

```
set e [expr $x5 - $x4]
set e1 [expr $y5 - $y4]
set e2 [expr $e * $e]
set e3 [expr $e1 * $e1]
set e4 [expr $e2 + $e3]
set e5 [expr sqrt($e4)]
```

```
set x54 $e5
```

```
set aa [expr $x1 - $x0]
set aa1 [expr $y1 - $y0]
set aa2 [expr $aa * $aa]
set aa3 [expr $aa1 * $aa1]
set aa4 [expr $aa2 + $aa3]
set aa5 [expr sqrt($aa4)]
```

```
set x10 $aa5
```

```
set bb [expr $x1 - $x3]
set bb1 [expr $y1 - $y3]
set bb2 [expr $bb * $bb]
set bb3 [expr $bb1 * $bb1]
set bb4 [expr $bb2 + $bb3]
set bb5 [expr sqrt($bb4)]
```

```
set x13 $bb5
```

```
set cc [expr $x1 - $x2]
set cc1 [expr $y1 - $y2]
set cc2 [expr $cc * $cc]
set cc3 [expr $cc1 * $cc1]
set cc4 [expr $cc2 + $cc3 ]
set cc5 [expr sqrt($cc4)]
```

```
set x12 $cc5
```

```
set dd [expr $x1 - $x4]
set dd1 [expr $y1 - $y4]
set dd2 [expr $dd * $dd]
set dd3 [expr $dd1 * $dd1]
set dd4 [expr $dd2 + $dd3]
set dd5 [expr sqrt($dd4)]
```

```
set x14 $dd5
```

```
set dd5 [expr $x1 - $x5]
set dd51 [expr $y1 - $y5]
set dd52 [expr $dd5 * $dd5]
set dd53 [expr $dd51 * $dd51]
set dd54 [expr $dd52 + $dd53]
set dd55 [expr sqrt($dd54)]
```

```
set x15 $dd55
```



```

set aaa [expr $x2 - $x1]
set aaa1 [expr $y2 - $y1]
set aaa2 [expr $aaa * $aaa]
set aaa3 [expr $aaa1 * $aaa1]
set aaa4 [expr $aaa2 + $aaa3]
set aaa5 [expr sqrt($aaa4)]

set x21 $aaa5

set bbb [expr $x2 - $x0]
set bbb1 [expr $y2 - $y0]
set bbb2 [expr $bbb * $bbb]
set bbb3 [expr $bbb1 * $bbb1]
set bbb4 [expr $bbb2 + $bbb3]
set bbb5 [expr sqrt($bbb4)]

set x20 $bbb5

set ccc [expr $x2 - $x3]
set ccc1 [expr $y2 - $y3]
set ccc2 [expr $ccc * $ccc]
set ccc3 [expr $ccc1 * $ccc1]
set ccc4 [expr $ccc2 + $ccc3]
set ccc5 [expr sqrt($ccc4)]

set x23 $ccc5

set ddd [expr $x2 - $x4]
set ddd1 [expr $y2 - $y4]
set ddd2 [expr $ddd * $ddd]
set ddd3 [expr $ddd1 * $ddd1]
set ddd4 [expr $ddd2 + $ddd3]
set ddd5 [expr sqrt($ddd4)]

set x24 $ddd5

set ddd2 [expr $x2 - $x5]
set ddd21 [expr $y2 - $y5]
set ddd22 [expr $ddd2 * $ddd2]
set ddd23 [expr $ddd21 * $ddd21]
set ddd24 [expr $ddd22 + $ddd23]
set ddd25 [expr sqrt($ddd24)]

set x25 $ddd25

set aaaa [expr $x3 - $x0]
set aaaa1 [expr $y3 - $y0]
set aaaa2 [expr $aaaa * $aaaa]
set aaaa3 [expr $aaaa1 * $aaaa1]
set aaaa4 [expr $aaaa2 + $aaaa3]
set aaaa5 [expr sqrt($aaaa4)]

set x30 $aaaa5

```

```
set bbbb [expr $x3 - $x1]
set bbbb1 [expr $y3 - $y1]
set bbbb2 [expr $bbbb * $bbbb]
set bbbb3 [expr $bbbb1 * $bbbb1]
set bbbb4 [expr $bbbb2 + $bbbb3]
set bbbb5 [expr sqrt($bbbb4)]
```

```
set x31 $bbbb5
```

```
set cccc [expr $x3 - $x2]
set cccc1 [expr $y3 - $y2]
set cccc2 [expr $cccc * $cccc]
set cccc3 [expr $cccc1 * $cccc1]
set cccc4 [expr $cccc2 + $cccc3]
set cccc5 [expr sqrt($cccc4)]
```

```
set x32 $cccc5
```

```
set dddd [expr $x3 - $x4]
set dddd1 [expr $y3 - $y4]
set dddd2 [expr $dddd * $dddd]
set dddd3 [expr $dddd1 * $dddd1]
set dddd4 [expr $dddd2 + $dddd3]
set dddd5 [expr sqrt($dddd4)]
```

```
set x34 $dddd5
```

```
set ddddd [expr $x3 - $x5]
set ddddd1 [expr $y3 - $y5]
set ddddd2 [expr $dddd * $dddd]
set ddddd3 [expr $dddd1 * $dddd1]
set ddddd4 [expr $dddd2 + $dddd3]
set ddddd5 [expr sqrt($dddd4)]
```

```
set x35 $dddd5
```

```
set f [expr $x4 - $x0]
set f1 [expr $y4 - $y0]
set f2 [expr $f * $f]
set f3 [expr $f1 * $f1]
set f4 [expr $f2 + $f3]
set f5 [expr sqrt($f4)]
```

```
set x40 $f5
```

```
set ff [expr $x4 - $x1]
set ff1 [expr $y4 - $y1]
set ff2 [expr $ff * $ff]
set ff3 [expr $ff1 * $ff1]
set ff4 [expr $ff2 + $ff3]
set ff5 [expr sqrt($ff4)]
```

```
set x41 $ff5
```

```
set fff [expr $x4 - $x2]
set fff1 [expr $y4 - $y2]
```

```

set fff2 [expr $fff * $fff]
set fff3 [expr $fff1 * $fff1]
set fff4 [expr $fff2 + $fff3]
set fff5 [expr sqrt($fff4)]

set x42 $fff5

set ffff [expr $x4 - $x3]
set ffff1 [expr $y4 - $y3]
set ffff2 [expr $ffff * $ffff]
set ffff3 [expr $ffff1 * $ffff1]
set ffff4 [expr $ffff2 + $ffff3]
set ffff5 [expr sqrt($ffff4)]

set x43 $ffff5

set fffff [expr $x4 - $x5]
set fffff1 [expr $y4 - $y5]
set fffff2 [expr $ffffff * $ffffff]
set fffff3 [expr $ffffff1 * $ffffff1]
set fffff4 [expr $ffffff2 + $ffffff3]
set fffff5 [expr sqrt($ffffff4)]

set x45 $ffffff5

set s [expr $x0 - $x1]
set s1 [expr $y0 - $y1]
set s2 [expr $s * $s]
set s3 [expr $s1 * $s1]
set s4 [expr $s2 + $s3]
set s5 [expr sqrt($s4)]

set x01 $s5

set ss [expr $x0 - $x2]
set ss1 [expr $y0 - $y2]
set ss2 [expr $ss * $ss]
set ss3 [expr $ss1 * $ss1]
set ss4 [expr $ss2 + $ss3]
set ss5 [expr sqrt($ss4)]

set x02 $ss5

set sss [expr $x0 - $x3]
set sss1 [expr $y0 - $y3]
set sss2 [expr $sss * $sss]
set sss3 [expr $sss1 * $sss1]
set sss4 [expr $sss2 + $sss3]
set sss5 [expr sqrt($sss4)]

set x03 $sss5

set ssss [expr $x0 - $x4]
set ssss1 [expr $y0 - $y4]
set ssss2 [expr $ssss * $ssss]
set ssss3 [expr $ssss1 * $ssss1]

```

```

set ssss4 [expr $sssss2 + $sssss3]
set ssss5 [expr sqrt($sssss4)]

set x04 $sssss5

set sssss [expr $x0 - $x5]
set sssss1 [expr $y0 - $y5]
set sssss2 [expr $sssss * $sssss]
set sssss3 [expr $sssss1 * $sssss1]
set sssss4 [expr $sssss2 + $sssss3]
set sssss5 [expr sqrt($sssss4)]

set x05 $sssss5

source $val(cp)

source $val(sc)

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {

    $ns_ initial_node_pos $node_($i) 20
}

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $val(stop).0 "$node_($i) reset";
}

proc finish {} {
    global ns_ tracefd namtrace
    close $tracefd
    close $namtrace

    exec nam bmac.nam &
}
$ns_ at $val(stop).0001 "finish"
$ns_ at $val(stop).0002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"

puts $tracefd "M 0.0 nn $val(nn) x $val(x) y $val(y) rp
$val(adhocrouting)"
puts $tracefd "M 0.0 sc $val(sc) cp $val(cp) seed $val(seed)"
puts $tracefd "M 0.0 prop $val(prop) ant $val(ant)"
puts "Starting Simulation..."

$ns_ run

```

## tr file

```
N -t 6.462890 -n 17 -e 999.437031
N -t 6.462890 -n 5 -e 999.437031
N -t 6.462890 -n 20 -e 999.437031
N -t 6.462890 -n 0 -e 999.437032
N -t 6.462890 -n 8 -e 999.437031
N -t 6.462890 -n 4 -e 999.437032
N -t 6.462890 -n 7 -e 999.437031
N -t 6.462890 -n 2 -e 999.437032
N -t 6.462891 -n 16 -e 999.437031
r 6.463194048 _23_ MAC --- 0 CTS 38 [4f4 17 0 0] [energy
999.437032 ei 0.125 es 0.000 et 0.109 er 0.328]
s 6.463204048 _23_ MAC --- 592 ack 118 [13a e 17 800] [energy
999.437032 ei 0.125 es 0.000 et 0.109 er 0.328] ----- [23:0
14:1 30 14] [19 0] 0 0
N -t 6.463204 -n 22 -e 999.436958
N -t 6.463204 -n 14 -e 999.436959
N -t 6.463204 -n 13 -e 999.436959
N -t 6.463204 -n 24 -e 999.436958
N -t 6.463204 -n 21 -e 999.436958
N -t 6.463204 -n 6 -e 999.436958
N -t 6.463204 -n 5 -e 999.436959
N -t 6.463204 -n 19 -e 999.436958
N -t 6.463204 -n 10 -e 999.436959
N -t 6.463204 -n 15 -e 999.436958
N -t 6.463204 -n 1 -e 999.436959
N -t 6.463204 -n 12 -e 999.436958
N -t 6.463204 -n 18 -e 999.436959
N -t 6.463205 -n 20 -e 999.436958
N -t 6.463205 -n 7 -e 999.436958
N -t 6.463205 -n 11 -e 999.436959
N -t 6.463205 -n 3 -e 999.436959
N -t 6.463205 -n 17 -e 999.436958
N -t 6.463205 -n 9 -e 999.436959
N -t 6.463205 -n 0 -e 999.436959
N -t 6.463205 -n 8 -e 999.436958
N -t 6.463205 -n 16 -e 999.436958
N -t 6.463205 -n 4 -e 999.436959
N -t 6.463205 -n 2 -e 999.436959
r 6.464148224 _14_ MAC --- 592 ack 60 [13a e 17 800] [energy
999.436959 ei 0.125 es 0.000 et 0.039 er 0.399] ----- [23:0
14:1 30 14] [19 0] 1 0
s 6.464158224 _14_ MAC --- 0 ACK 38 [0 17 0 0] [energy
999.436959 ei 0.125 es 0.000 et 0.039 er 0.399]
N -t 6.464158 -n 13 -e 999.436934
N -t 6.464158 -n 23 -e 999.436934
N -t 6.464158 -n 10 -e 999.436934
N -t 6.464158 -n 21 -e 999.436934
N -t 6.464158 -n 18 -e 999.436934
N -t 6.464159 -n 15 -e 999.436934
N -t 6.464159 -n 1 -e 999.436934
N -t 6.464159 -n 22 -e 999.436934
```

N -t 6.464159 -n 24 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 11 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 12 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 3 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 9 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 19 -e 999.436933  
N -t 6.464159 -n 6 -e 999.436933  
N -t 6.464159 -n 17 -e 999.436933  
N -t 6.464159 -n 5 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 20 -e 999.436933  
N -t 6.464159 -n 0 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 8 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 4 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 7 -e 999.436933  
N -t 6.464159 -n 2 -e 999.436934  
N -t 6.464159 -n 16 -e 999.436933  
r 6.464173224 \_14\_ AGT --- 592 ack 60 [13a e 17 800] [energy  
999.436934 ei 0.125 es 0.000 et 0.039 er 0.399] ----- [23:0  
14:1 30 14] [19 0] 1 0  
s 6.464173224 \_14\_ AGT --- 614 tcp 1500 [0 0 0 0] [energy  
999.436934 ei 0.125 es 0.000 et 0.039 er 0.399] ----- [14:1  
23:0 32 0] [39 0] 0 0  
r 6.464173224 \_14\_ RTR --- 614 tcp 1500 [0 0 0 0] [energy  
999.436934 ei 0.125 es 0.000 et 0.039 er 0.399] ----- [14:1  
23:0 32 0] [39 0] 0 0  
s 6.464173224 \_14\_ RTR --- 614 tcp 1520 [0 0 0 0] [energy  
999.436934 ei 0.125 es 0.000 et 0.039 er 0.399] ----- [14:1  
23:0 30 17] [39 0] 0 0  
r 6.464462400 \_23\_ MAC --- 0 ACK 38 [0 17 0 0] [energy  
999.436934 ei 0.125 es 0.000 et 0.110 er 0.328]  
s 6.464672432 \_10\_ MAC --- 0 RTS 44 [33ce e a 0] [energy  
999.436934 ei 0.125 es 0.000 et 0.114 er 0.324]  
N -t 6.464673 -n 3 -e 999.436866  
N -t 6.464673 -n 14 -e 999.436866  
N -t 6.464673 -n 18 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 11 -e 999.436866  
N -t 6.464673 -n 1 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 9 -e 999.436866  
N -t 6.464673 -n 13 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 4 -e 999.436866  
N -t 6.464673 -n 15 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 0 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 23 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 2 -e 999.436866  
N -t 6.464673 -n 12 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 8 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 21 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 17 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 22 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 24 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 20 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 19 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 6 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 5 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 7 -e 999.436865  
N -t 6.464673 -n 16 -e 999.436865