

# **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΑΝΕΚΤΙΚΩΝ ΣΤΙΣ DTN ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΟΛΕΣ. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ.**

Τεχνική Αναφορά

Βασίλης Δεμίρογλου και Χρήστος Χατζηανδρέογλου

## **1. Εισαγωγή**

Οι αποστολές διαστημικών εξερευνήσεων προϋποθέτουν τη διασύνδεση της Γης με άλλα αντικείμενα και πλανήτες στο ηλιακό σύστημα σχηματίζοντας ένα διαπλανητικό διαδίκτυο (Interplanetary Internet IPN). Μέρος αυτού του διαπλανητικού διαδικτύου αποτελεί το πλανητικό δίκτυο (Planetary network) με το οποίο εξασφαλίζεται η διασύνδεση μεταξύ δορυφορικών οχημάτων και στοιχείων στην επιφάνεια ενός πλανήτη. Το πλανητικό δίκτυο επιφάνειας περιλαμβάνει συνδέσμους επικοινωνίας μεταξύ επιφανειακών κόμβων υψηλής ισχύος (π.χ. ρομποτικών οχημάτων και σταθμών βάσης), καθώς και επιφανειακούς κόμβους χαμηλότερης ισχύος (π.χ. δικτύων αισθητήρων, ρομποτικών οχημάτων) που δεν μπορούν να επικοινωνούν απευθείας με τους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους. Η εξερεύνηση του ηλιακού συστήματος πρόκειται να παρέχει μια συνεχή ροή επιστημονικών πληροφοριών, πηγές της οποίας είναι οι επιφανειακοί κόμβοι των πλανητών. Προκειμένου να επιτευχθεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα η μεταφορά αυτών των δεδομένων, από τα απομακρυσμένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, στα ρομποτικά οχήματα και έπειτα στους σταθμούς βάσης του πλανήτη εξερεύνησης, θεωρείται χρήσιμη η εφαρμογή δικτύων ανεκτικών στις καθυστερήσεις και τις διακοπές (Delay Tolerant Networking DTN) [1].

## **2. Σκοπός της μελέτης**

Η παρούσα έκθεση αναφοράς αποσκοπεί στην διερεύνηση εργαστηριακών σεναρίων για την εξομοίωση εφαρμογών πρωτοκόλλων ανεκτικών στις DTN καθυστερήσεις σε διαστημικές αποστολές. Συγκεκριμένα, εξετάζονται μέθοδοι μεταφοράς δεδομένων από απομακρυσμένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μέσω κινητών κόμβων (π.χ. ρομποτικά οχήματα) για την αποτελεσματική λειτουργία των αποστολών πλανητικής εξερεύνησης.

Αρχικά, παρατίθενται ορισμένα γενικά στοιχεία για την λειτουργία του DTN. Κατόπιν, εξετάζονται ορισμένα εργαστηριακά σενάρια εξομοίωσης πλανητικών δικτύων διαφορετικών τοπολογιών, καθώς και της διασύνδεσης τους με το διαπλανητικό διαδίκτυο, κάνοντας χρήση του ήδη υπάρχοντος υλικού του εργαστηρίου. Τέλος παρατίθενται ορισμένοι ενδεικτικοί τρόποι χρήσης των παραπάνω σεναρίων σε εργαστηριακά πειράματα, ενώ προτείνονται και κάποια επόμενα βήματα που μπορεί να γίνουν, με σκοπό την εμπάθυνση και εμπλουτισμό των δυνατοτήτων του εργαστηρίου σε τέτοιου είδους μελέτες.

## **3. Γενικά για δίκτυα ανεκτικά στις καθυστερήσεις και τις διακοπές**

Η προσπάθεια επίλυσης των προβλημάτων διασύνδεσης συστημάτων και εφαρμογών μέσω δικτύων που αντιμετωπίζουν καθυστερήσεις και διαταραχές έχει ξεκινήσει εδώ και αρκετά χρόνια[2]. Οι προσπάθειες τυποποίησης χρησιμοποιούν ως βάση δύο προτάσεις προς σχόλια (Request For Comments, RFC), συγκεκριμένα τις RFC 4838 [3] και RFC 5050 [4], οι οποίες

καθορίζουν τις λεπτομέρειες της αρχιτεκτονικής δικτύων ανεκτικών σε καθυστερήσεις (Delay Tolerant Networking, DTN) και του πρωτοκόλλου δέσμης (Bundle Protocol, BP) αντίστοιχα.

### 3.1 Το πρωτόκολλο δέσμης

Το πρωτόκολλο δέσμης είναι ένα πρωτόκολλο δικτύου το οποίο υλοποιεί όλες τις απαραίτητες λειτουργίες που απαιτούνται για την υποστήριξη της δικτύωσης ανεκτικής σε καθυστερήσεις και διακοπές. Τα βασικά χαρακτηριστικά του BP περιλαμβάνουν:

**α) Αποθήκευση και προώθηση (Store-and-forward):** Τα δεδομένα μετακινούνται σταδιακά και αποθηκεύονται σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο μέχρι να φτάσουν στον προορισμό τους. Τα δεδομένα διαγράφονται από την μνήμη κάθε κόμβου, μόνο όταν προωθηθούν στον επόμενο παραλήπτη.

**β) Μη-συνομιλητική ασύγχρονη επικοινωνία (Non-conversational Asynchronous Communication):** Τα πακέτα δεδομένων της BP, που ονομάζονται "δέσμες" (bundles), επιδιώκουν να συσσωρεύουν όσο το δυνατόν περισσότερο χρήσιμες πληροφορίες σε μια μοναδική μονάδα δεδομένων ωφέλιμου φορτίου (PDU) προτού αποσταλούν στον αποδέκτη, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των ανταλλαγών επικοινωνίας που απαιτούνται για την ολοκλήρωση μιας συνεδρίας επικοινωνίας.

**γ) Εναλλαγή εικονικών μηνυμάτων (Virtual message switching):** Τα πακέτα είναι δομημένα ως μηνύματα μεταβλητού μήκους με θεωρητικά απεριόριστο μέγεθος. Κάθε μήνυμα μεταφέρεται ολόκληρο από κόμβο σε κόμβο, επιτρέποντας έτσι στους ενδιάμεσους δρομολογητές να λαμβάνουν πιο ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με τη δρομολόγηση, τον προγραμματισμό και την επιλογή διαδρομής, αφού γνωρίζουν εκ των προτέρων το ακριβές ποσό των δεδομένων που πρέπει να μεταφερθούν.

**δ) Αξιοπιστία και μεταφορά κηδεμονίας (Reliability and custody transfer):** Κατά την έκδοση μιας δέσμης μπορεί να ζητηθεί αναφορά παράδοσης. Με την χρήση αυτού του μηχανισμού μετά την παραλαβή της δέσμης από τον προορισμό της, ο αποδέκτης εκδίδει μια δέσμη αναφοράς κατάστασης, την οποία επιστρέφει στην πηγή, ενημερώνοντάς την ότι η δέσμη έχει παραδοθεί επιτυχώς. Παράλληλα η hop-by-hop αξιοπιστία της μετάδοσης παρέχεται μέσω ενός μηχανισμού μεταφοράς κηδεμονίας, ο οποίος επιτρέπει την ανάθεση ευθύνης αναμετάδοσης μεταξύ διαφορετικών κόμβων κατά μήκος της διαδρομής.

**ε) Μηχανισμός ονοματοδοσίας και διευθυνσιοδότησης (Naming and Addressing Mechanism):** Κάθε κόμβος στην αρχιτεκτονική DTN αναγνωρίζεται μέσω ενός αναγνωριστικού τελικού σημείου (Endpoint Identifier, EID) Ένα EID είναι ένα όνομα, που εκφράζεται χρησιμοποιώντας τη γενική σύνταξη των Ενιαίων Αναγνωριστικών Πόρων (Uniform Resource Identifiers - URI) [5], το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των τελικών σημείων προέλευσης και προορισμού μιας δέσμης καθώς και του τρέχοντα κηδεμόνα της δέσμης. Σε περίπτωση πολυεκπομπής, ένα EID μπορεί να αναφέρεται σε πολλαπλούς κόμβους DTN.

### 3.2 Πλατφόρμες DTN

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές εφαρμογές λογισμικού που να υλοποιούν τα DTN πρωτόκολλα, ανάλογα με τις ειδικές ανάγκες του συστήματος και αρχιτεκτονικές επεξεργασίας. Η κύρια πλατφόρμα η οποία χρησιμοποιείται σε διαστημικές αποστολές είναι το ION. Το Διαπλανητικό Δίκτυο Επικάλυψης (Interplanetary Overlay Network ION) [6] είναι μια πλατφόρμα DTN που έχει αναπτυχθεί από το Jet Propulsion Laboratory (JPL) και είναι ειδικά σχεδιασμένη για να χρησιμοποιηθεί για διαπλανητικές επικοινωνίες.

Η επικοινωνία μεταξύ διαστημικών οχημάτων και Γης διαφέρει αρκετά από τις αντίστοιχες επίγειες επικοινωνίες. Τα ασύρματα δίκτυα είναι σχετικά αργά (σε σύγκριση με τα αντίστοιχα επίγεια), οι εκπομπές μπορεί να χρειαστούν αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα να φτάσουν στο προορισμό τους, ενώ το χρησιμοποιούμενο hardware έχει σαφώς μεγαλύτερους περιορισμούς, τόσο προς την υπολογιστική ισχύ του όσο και προς τις ενεργειακές απαιτήσεις του. Επιπρόσθετα λόγω της φύσης της τροχιακής ή διαπλανητικής πτήσης και της περιστροφής της Γης, όπως και άλλων πλανητικών σωμάτων, τα παράθυρα επικοινωνιακής επαφής είναι περιορισμένα και αυστηρά καθορισμένα. Για τον λόγο αυτό, η δρομολόγηση δεδομένων στο ION γίνεται αποκλειστικά με χρήση ενός πίνακα προγραμματισμένων επαφών [7].

Ενώ το ION περιέχει όλες τις λειτουργίες προδιαγραφών BP, δεν είναι κατάλληλο για επιφανειακές εφαρμογές, όπως π.χ. ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στην επιφάνεια της Σελήνης. Δεν υποστηρίζει ένα μηχανισμό ανακάλυψης γειτονικών κόμβων, καθιστώντας την δημιουργία κατ' απαίτηση δικτύων (ad hoc network) το λιγότερο προβληματική, ενώ δεν προβλέπεται η χρήση μηχανισμών δρομολόγησης για δίκτυα πλέγματος (mesh network routing). Πέραν της επέκτασης του ION με την προσθήκη αντίστοιχων δυνατοτήτων, μια εναλλακτική λύση θα είναι η χρησιμοποίηση μιας άλλης πλατφόρμας DTN δικτύωσης, η οποία να είναι συμβατή σε επίπεδο BP με αυτό. Μια τέτοια πλατφόρμα είναι το IBR-DTN.

Το IBR-DTN [8] είναι μια ελαφριά και εξαιρετικά φορητή πλατφόρμα πρωτοκόλλων DTN σχεδιασμένη για ενσωματωμένα συστήματα. Περιλαμβάνει υποστήριξη αποστολής bundle πάνω από γνωστά πρωτόκολλα επικοινωνιών όπως τα TCP, UDP και HTTP. Επιπλέον, υποστηρίζει την απευθείας αποστολή bundle μέσω του πρότυπου ασύρματης δικτύωσης IEEE 802.15.4 [9], η οποία μπορεί να είναι χρήσιμη για δίκτυα αισθητήρων εξαιρετικά χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων. Ο συμπεριλαμβανόμενος DTN δαίμονας παρέχει διαφορετικά συστήματα δρομολόγησης, καθώς και μηχανισμό ανακάλυψης γειτονικών κόμβων, ενώ είναι συμβατός με την προδιαγραφή ασφαλείας BSP [10]. Λόγω του γεγονότος ότι το IBR-DTN αναπτύχθηκε στοχεύοντας σε ενσωματωμένα συστήματα, οι εξαρτήσεις λογισμικού διατηρήθηκαν στο ελάχιστο.

Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται η εργαστηριακή υλοποίηση ενός μικτού δικτύου κόμβων, που θα μπορεί να προσομοιώσει διάφορα σενάρια διασύνδεσης επιφανειακών δικτύων με δορυφορικά.

### 4. Προτεινόμενες Εργαστηριακές εφαρμογές

Στη συγκεκριμένη μελέτη, διερευνώνται σενάρια όπου ένας σταθμός βάσης είναι επιφορτισμένος με την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων κόμβων με τους αντίστοιχους σταθμούς ελέγχου τους. Οι κόμβοι θεωρούνται απομακρυσμένοι γιατί βρίσκονται εκτός ραδιοφωνικής εμβέλειας της βάσης, λόγω απόστασης ή και μορφολογίας του εδάφους. Η επικοινωνία της βάσης με τους σταθμούς ελέγχου γίνεται με αναμετάδοση δεδομένων μέσω ενός ή και περισσότερων

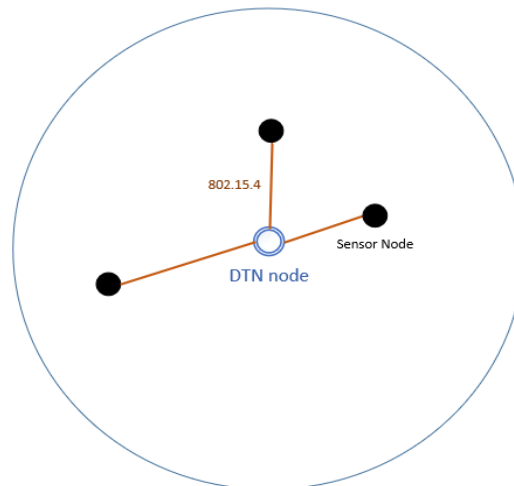
διαστημικών οχημάτων (π.χ. τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων, διαστημικών σταθμών κλπ). Τέτοια σενάρια μπορούν να βρουν εφαρμογή, τόσο σε αποστολές εξερεύνησης πλανητικών σωμάτων στο ηλιακό σύστημα, όσο και σε επίγειες εφαρμογές σε δυσπρόσιτες περιοχές.

Η χρήση DTN πρωτοκόλλων σε αυτά τα σενάρια, επιτρέπει την χρήση ενδιάμεσων μεταφορέων, οι οποίοι μπορούν να μετακινηθούν διαδοχικά εντός εμβέλειας του σταθμού βάσης και των απομακρυσμένων κόμβων, επιτελώντας έναν ρόλο “μουλαριού” μεταφοράς δεδομένων. Τέτοιος μεταφορέας σε μια αποστολή στον Άρη ή την Σελήνη για παράδειγμα, μπορεί να είναι ένα ρομποτικό όχημα (rover), ενώ σε μια επίγεια εφαρμογή τον ρόλο αυτό να αναλάβει ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος (drone).

Σε όλα τα σενάρια γίνεται η παραδοχή ότι η επικοινωνία του σταθμού βάσης με τους ενδιάμεσους αναμεταδότες και η δρομολόγηση των δεδομένων μέχρι τους σταθμούς ελέγχου υλοποιείται με τεχνολογία DTN βασισμένη στην πλατφόρμα ION. Οι ιδιαιτερότητες της επικοινωνίας επιφανείας/τροχιάς και τροχιάς/τροχιάς, κάνουν απαραίτητη την δρομολόγηση με χρήση πίνακα προγραμματισμένων επαφών. Από την άλλη, η επικοινωνία του σταθμού βάσης με το μουλάρι και του μουλαριού με τους απομακρυσμένους κόμβους βασίζεται στο IBR-DTN και κάνει χρήση της ad-hoc δικτύωσης και της mesh δρομολόγησης που παρέχει.

#### 4.1 Σενάριο 1

Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται η αποτελεσματικότητα χρήσης της παρακάτω βαθμίδα (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Βασική βαθμίδα

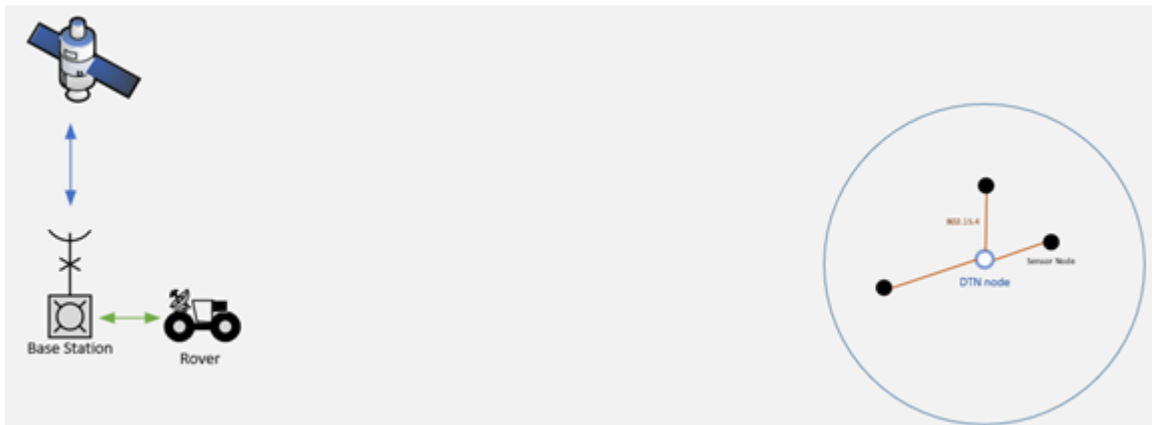
Συγκεκριμένα, η βαθμίδα αποτελείται από 2 ειδών κόμβους:

1. **Κόμβοι αισθητήρων (Sensor nodes):** Πρόκειται για χαμηλού κόστους, περιορισμένων δυνατοτήτων συσκευές, βασισμένων σε μικροελεγκτές χαμηλής υπολογιστικής ισχύος και μειωμένων πόρων, όπως χωρητικότητα μνήμης και αποθηκευτικού χώρου. Το κυριότερο πλεονέκτημα τους είναι το μικρό μέγεθος και οι εξαιρετικά χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις τους. Οι συγκεκριμένοι κόμβοι συλλέγουν μετρήσεις (σεισμικές, θερμοκρασίας, χημικές,

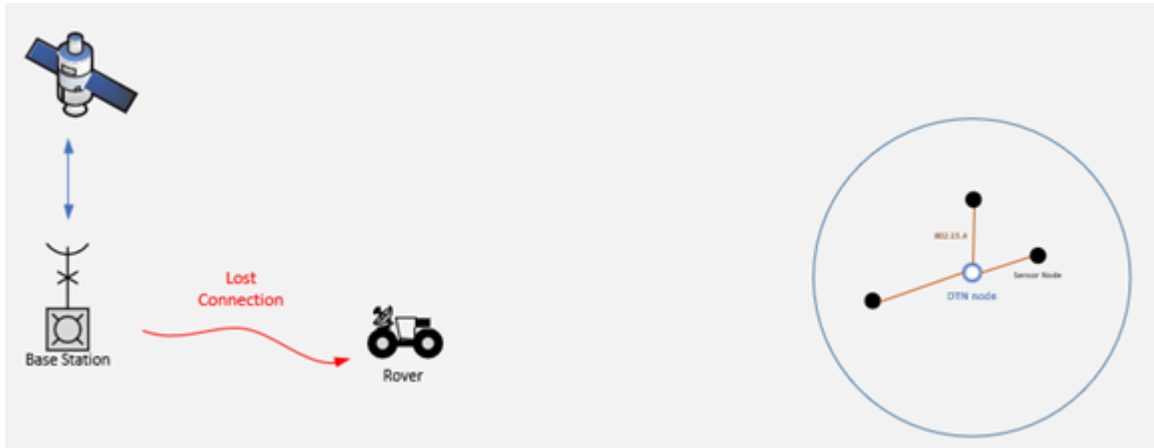
κλπ.) και τις προωθούν ασύρματα στον συλλέκτη. Θεωρούμε ότι οι συγκεκριμένοι κόμβοι, λόγω των περιορισμένων πόρων τους δεν μπορούν να υποστηρίξουν πλήρως τεχνολογίες DTN και αρκούνται σε άμεση αποστολή των δεδομένων τους.

- 2. Συλλέκτη δεδομένων- DTN κόμβος (Concentrator-DTN node):** Πρόκειται για μια συσκευή με επαρκείς επιδόσεις και πόρους για την υποστήριξη μιας πλατφόρμας DTN λογισμικού. Ο συλλέκτης είναι επιφορτισμένος με το να λαμβάνει τις μετρήσεις από τους κόμβους αισθητήρων και να τις αποθηκεύει ως bundles. Παράλληλα είναι υπεύθυνος για την δημιουργία ad hoc δικτύου με οποιοδήποτε DTN κόμβο βρεθεί εντός της εμβέλειας του (μπλε κύκλος Εικόνα 2), μέσω του οποίου τα ανωτέρω bundles δεδομένων θα προωθηθούν στους αποδέκτες τους.

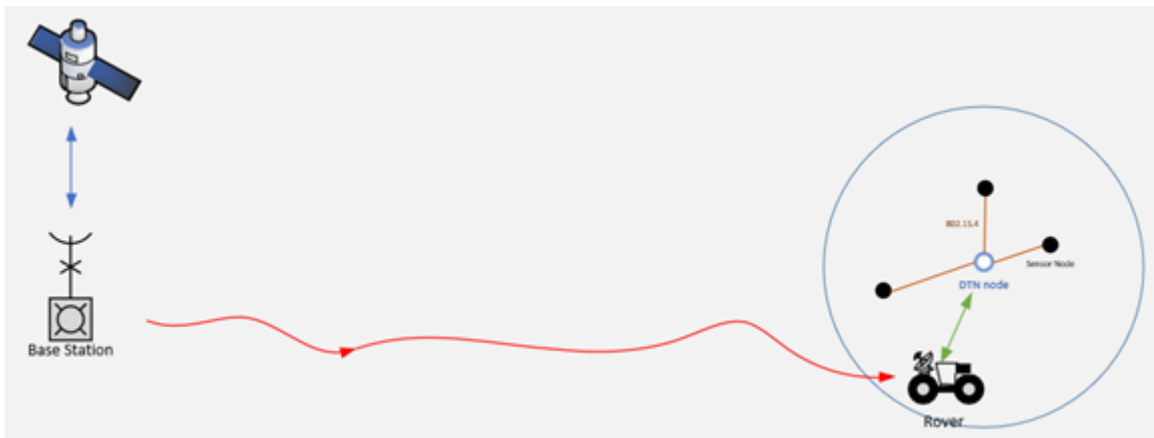
Το συγκεκριμένο σενάριο εξελίσσεται ως εξής. Αρχικά, το ρομποτικό όχημα βρίσκεται εντός εμβέλειας του σταθμού βάσης (Εικόνα 2). Καθώς το ρομποτικό όχημα μετακινείται προς το απομακρυσμένο δίκτυο αισθητήρων, βγαίνει εκτός ραδιοφωνικής εμβέλειας της βάσης (Εικόνα 3). Έπειτα φτάνει σε τοποθεσία εντός εμβέλειας του συλλέκτη δεδομένων-DTN κόμβου και συλλέγει τις μετρήσεις όλων των αισθητήρων (Εικόνα 4). Ακολούθως, επιστρέφει πίσω στο σταθμό βάσης προκειμένου να προωθηθούν τα δεδομένα σε αυτόν και ακολούθως στον τηλεπικοινωνιακό δορυφόρο (Εικόνα 5). Τέλος, μέσω του διαπλανητικού διαδικτύου τα δεδομένα θα αποσταλούν στους τελικούς αποδέκτες τους.



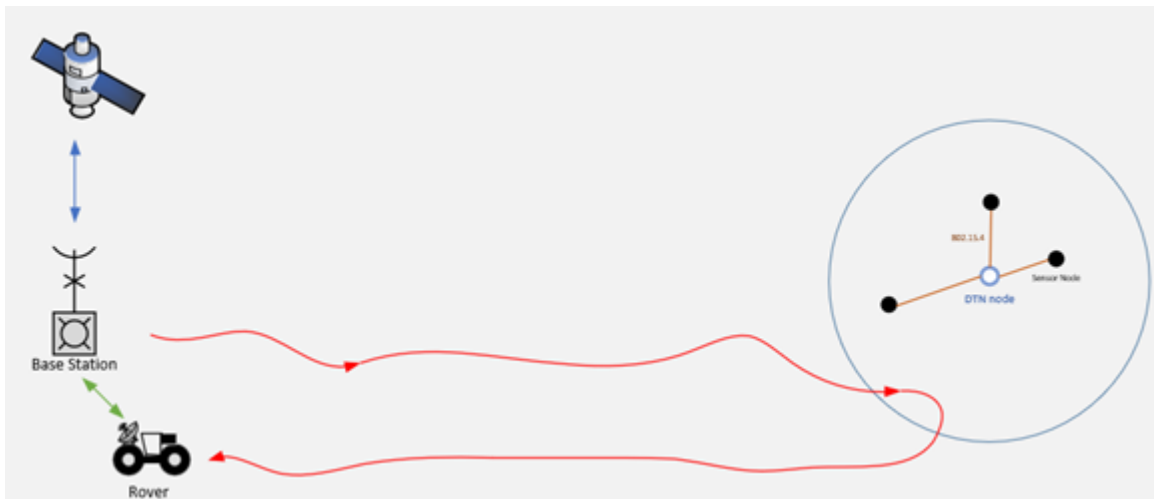
Εικόνα 2.



Εικόνα 3.



Εικόνα 4.



Εικόνα 5.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτού του σεναρίου είναι το χαμηλό κόστος, μέγεθος και ενεργειακές απαιτήσεις των κόμβων αισθητήριων, που καθιστούν δυνατή την μαζική τοποθέτησή τους. Επιπρόσθετα, όλοι οι κόμβοι αισθητήριων μπορούν να τίθενται σε κατάσταση βαθύς ύπνου (deep sleep mode) κατά την περίοδο που είναι ανενεργοί, μειώνοντας περαιτέρω τον ενεργειακό φόρτο τους, σε αντίθεση με τον συλλέκτη που υποχρεούται να μένει σε λειτουργία για την δημιουργία ευκαιριακών ad hoc συνδέσεων. Το κυριότερο μειονέκτημα αποτελεί η εξάρτηση τόσο στην συλλογή δεδομένων, όσο και στην αποθήκευση και αποστολή τους, από την ομαλή λειτουργία του συλλέκτη.

Για την υλοποίηση και περαιτέρω μελέτη ενός τέτοιου σεναρίου στο εργαστήριο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως κόμβους αισθητήριων τα ήδη υπάρχοντα SAMR-21-XPRO, σαν Συλλέκτη και ρομποτικό όχημα τα Raspberry Pi 2B και σαν σταθμό βάσης ένα οποιοδήποτε PC, μέσω του οποίου το πείραμα μπορεί να επεκταθεί με την χρήση του SPICE Testbed [11].

Το SAMR-21-XPRO βασίζεται σε έναν 32-bit ARM Cortex-M0+ επεξεργαστή, χρονισμένο στα 48MHz, με 32KB SRAM, αποθηκευτικό χώρο 256KB flash memory και ένα πλήρως συμβατό με το πρότυπο ασύρματης δικτύωσης IEEE 802.15.4 πομποδέκτη. Η συσκευή μπορεί να τρέχει μια απλή εφαρμογή συλλογής δεδομένων από αισθητήρες, πάνω από ένα ελαφρύ λειτουργικό σύστημα όπως το RIOT [12] και να κάνει άμεση αποστολή δεδομένων προς τον συλλέκτη μέσω του υποστηριζόμενου πρωτοκόλλου 6lowpan [13]. Θεωρητικά αυτός ο συνδυασμός συσκευής-λειτουργικού συστήματος, θα μπορούσε να υποστηρίξει μια ελαφριά πλατφόρμα DTN όπως το μDTN [14] ή το miniDTN [15], αλλά θα πρέπει να εξεταστεί η συμβατότητα τους σε επίπεδο BP με το IBR-DTN και κυρίως το ION.

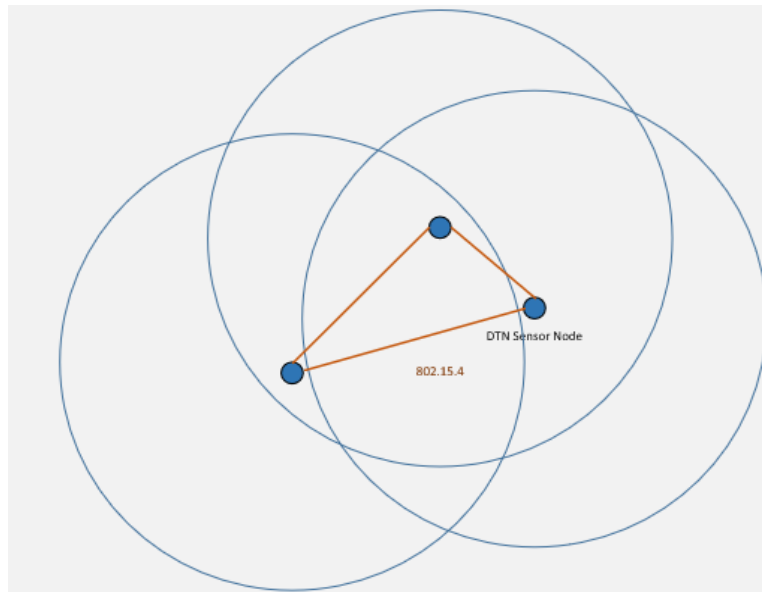
Το Raspberry Pi 2B βασίζεται σε έναν τετραπύρηνο ARM Cortex-A7 CPU στα 900MHz, παρέχει 1GB μνήμης RAM και χρησιμοποιεί μια αφαιρούμενη SD κάρτα ως αποθηκευτικό μέσο. Μπορεί να τρέξει την πλήρη έκδοση του IBR-DTN, πάνω από τον κλώνο του linux Raspbian [16]. Η συνδεσιμότητα του προς τους κόμβους αισθητήριων εξασφαλίζεται με τον πλήρως υποστηριζόμενο, συμβατό με IEEE 802.15.4 πομποδέκτη MRF24J40MA, ενώ για την δημιουργία των ad hoc συνδέσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κλασσικό wi-fi, με τυπικά wi-fi usb dongles.

Η προσομοίωση της κίνησης του ρομποτικού οχήματος στο εργαστήριο, μπορεί να πραγματοποιηθεί με την δημιουργία δυο ανεξάρτητων ad hoc wi-fi δικτύων σε διαφορετικά κανάλια εκπομπής, ένα για την εξομοίωση του δικτύου του σταθμού βάσης και ένα για αυτό του συλλέκτη. Το Raspberry Pi που θα προσομοιώνει το ρομποτικό όχημα θα μπορεί να συνδέεται εναλλακτικά στο ένα δίκτυο ή στο άλλο (ή και σε κανένα από τα δύο), μεταβάλλοντας έτσι την εικονική του τοποθεσία.

## 4.2 Σενάριο 2

Σε αυτό το σενάριο διερευνώνται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αντικατάστασης των κόμβων αισθητήριων του Σεναρίου 1 με ισχυρότερους, ικανούς να υποστηρίξουν την δικιά τους πλατφόρμα DTN και την κατάργηση του συλλέκτη. Σε αυτή την περίπτωση, κάθε DTN κόμβος αισθητήριων είναι υπεύθυνος για την λήψη μετρήσεων, την μετατροπή των μετρήσεων σε bundles και την μεταφορά των bundles στο ρομποτικό όχημα.

Η κύρια διαφορά αυτού του σεναρίου με το προηγούμενο, είναι ότι από την στιγμή που οι DTN κόμβοι βρίσκονται εντός ραδιοφωνικής εμβέλειας μεταξύ τους, θα δημιουργήσουν ένα ad hoc δίκτυο μέσω του οποίου θα προσπαθήσουν να δρομολογήσουν τα δεδομένα τους. Αν γίνει χρήση ενός mesh routing πρωτοκόλλου τύπου “πλημμύρας” (flood) [17] για παράδειγμα, θα έχει ως αποτέλεσμα κάθε DTN κόμβος αυτού του ad hoc δικτύου, να αποκτήσει και να αποθηκεύσει από ένα αντίτυπο όλων των μετρήσεων και των υπόλοιπων DTN κόμβων.



Εικόνα 6.

Άρα, παρόμοια με το προηγούμενο σενάριο, αρχικά το ρομποτικό όχημα βρίσκεται εντός εμβέλειας του σταθμού βάσης (Εικόνα 7). Καθώς το ρομποτικό όχημα μετακινείται προς το απομακρυσμένο δίκτυο αισθητήρων, βγαίνει εκτός ραδιοφωνικής εμβέλειας της βάσης (Εικόνα 8). Έπειτα φτάνει σε τοποθεσία εντός εμβέλειας ενός DTN κόμβου και συλλέγει τις μετρήσεις όλων των αισθητήρων (Εικόνα 9). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ο DTN κόμβος που θα παραδώσει τα bundles όλου του δικτύου, είναι αυτός που θα βρεθεί πρώτος εντός ραδιοφωνικής εμβέλειας του ρομποτικού οχήματος. Αυτό, ανάλογα με την χωρική τοποθέτηση των DTN κόμβων, μπορεί να καταστεί χρήσιμο κατά την χρήση εναλλακτικών διαδρομών από το ρομποτικό όχημα. Τέλος, το ρομποτικό όχημα επιστρέφει πίσω στο σταθμό βάσης προκειμένου να προωθηθούν τα δεδομένα σε αυτόν και ακολούθως μέσω του διαπλανητικού διαδικτύου τα δεδομένα θα αποσταλούν στους αποδέκτες τους.





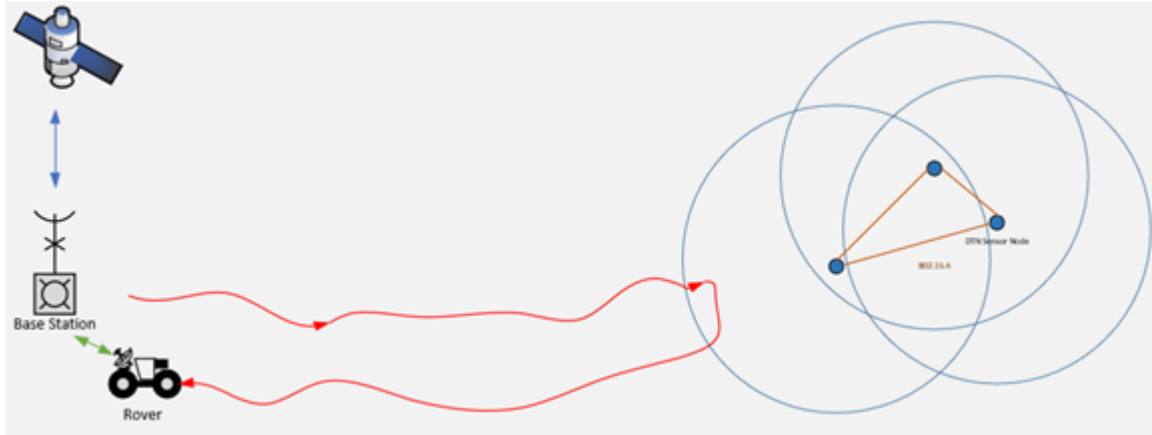
Εικόνα 7.



Εικόνα 8.



Εικόνα 9.



Εικόνα 10.

Στο σενάριο αυτό, παρέχεται μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή της διαδρομής του ρομποτικού οχήματος, με ενδεχόμενη συνέπεια την μείωση της απόστασης που θα έχει να διανύσει. Επίσης, η παράλληλη αποθήκευση όλων των δεδομένων σε όλους τους DTN κόμβους, διασφαλίζει την βιωσιμότητα των δεδομένων ακόμα και σε περίπτωση αστοχίας ενός ή και περισσότερων κόμβων. Παράλληλα, δίνεται η δυνατότητα σε κάθε κόμβο να δρομολογήσει απευθείας ομάδες μετρήσεων προς διαφορετικούς τελικούς αποδέκτες. Το σημαντικότερο μειονέκτημα, σε σχέση με το σενάριο 1, είναι ότι οι DTN κόμβοι απαιτούν την ύπαρξη ισχυρότερης μονάδας επεξεργασίας, περισσότερη μνήμη RAM και αρκετό χώρο αποθήκευσης, με αποτέλεσμα αυξημένο κόστος, μέγεθος και ενεργειακές απαιτήσεις. Οι ενεργειακές απαιτήσεις μάλιστα αυξάνονται ακόμα περισσότερο από την ανάγκη αδιάλειπτης λειτουργίας του κάθε κόμβου και τις συνεχείς ανταλλαγές μηνυμάτων με όλους τους γείτονές του.

Η υλοποίηση και η μελέτη αυτού του σεναρίου στο εργαστήριο, μπορεί να γίνει με χρήση των συσκευών Arietta G25 ως κόμβους αισθητήρων.

Η Arietta G25 βασίζεται στον AT91SAM9G25 της Microchip, χρονισμένο στα 400MHz, διαθέτει 128 MB μνήμης RAM και χρησιμοποιεί μια αφαιρούμενη SD κάρτα ως αποθηκευτικό μέσο. Η συνδεσιμότητα της με το ρομποτικό όχημα εξασφαλίζεται από την υποστήριξη τόσο ενός IEEE 802.15.4 (MRF24J40MA), όσο και ενός συμβατού με wi-fi (WM1030WU) πομποδέκτη. Τρέχει μια ελαφριά, προσαρμοσμένη έκδοση του linux, ειδικά φτιαγμένη για την Arietta με το εργαλείο buildroot [18], και υποστηρίζει πλήρως το IBR-DTN.

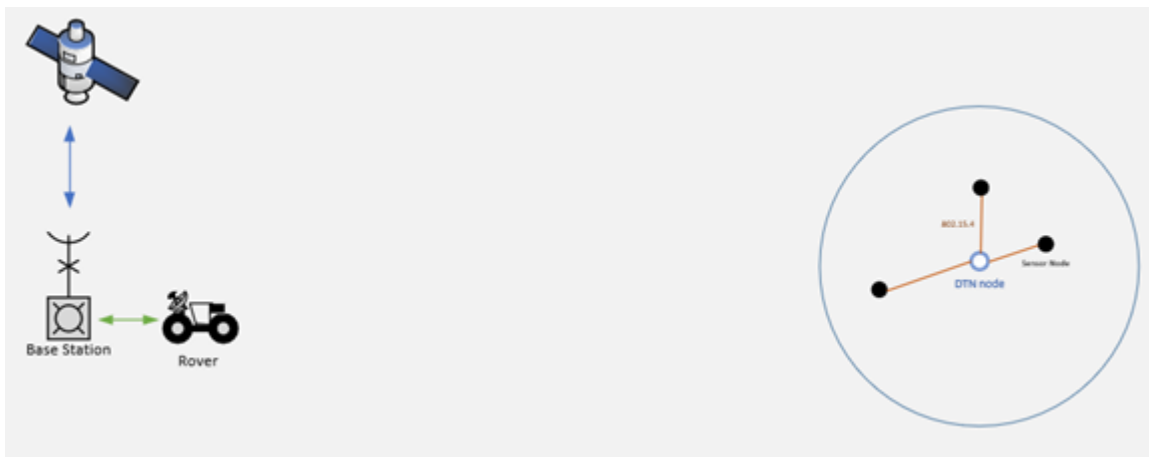
Η προσομοίωση της κίνησης του ρομποτικού οχήματος στο εργαστήριο, μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλή ενεργοποίηση και απενεργοποίηση είτε του IEEE 802.15.4 interface (επικοινωνία με κόμβους), είτε του wi-fi interface (επικοινωνία με βάση).

### 4.3 Σενάριο 3

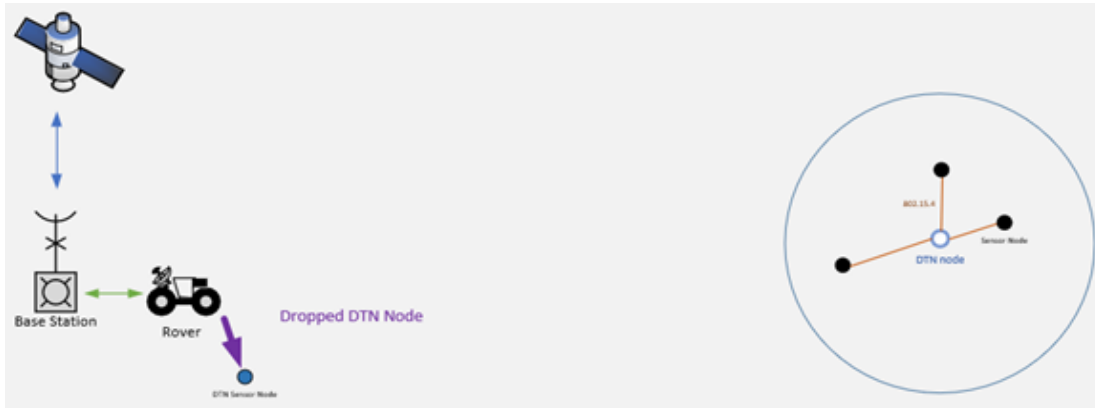
Σε αυτό το σενάριο διερευνώνται ο συνδυασμός των τοπολογιών των Σεναρίων 1 και 2, έτσι ώστε να υπάρχουν ενδιάμεσοι DTN κόμβοι (οι οποίοι μπορούν να έχουν αισθητήρες) στη διαδρομή του

ρομποτικού οχήματος προς την ομάδα συλλέκτη/κόμβων αισθητήρων. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου αποσκοπεί αφενός στην αποδοτικότερη και ασφαλέστερη μεταφορά των δεδομένων καθώς και στον περιορισμό της απόστασης που χρειάζεται να διασχίσει ένα ρομποτικό όχημα προκειμένου να μεταφέρει τα δεδομένα των μετρήσεων στο σταθμό βάσης. Έτσι μειώνεται και ο κίνδυνος απώλειας δεδομένων λόγω μη λειτουργίας ή καταστροφής κάποιου κόμβου ή ρομποτικού οχήματος. Ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος της κατασκευής ασύρματου δικτύου αισθητήρων (σε σχέση με το σενάριο 2) ενώ οι ενδιάμεσοι DTN κόμβοι λειτουργούν και ως μηχανισμοί εφεδρείας. Ενδεχομένως να μπορεί το ίδιο το ρομποτικό όχημα να αφήνει DTN κόμβους στη διαδρομή του, δημιουργώντας μονοπάτια επικοινωνίας τόσο με τον σταθμό βάσης όσο και με όποιο άλλο απομακρυσμένο δίκτυο. Ωστόσο ο μηχανισμός λειτουργίας του ρομποτικού οχήματος δεν αποτελεί αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης, για αυτό και δεν αναλύεται στην παρούσα αναφορά.

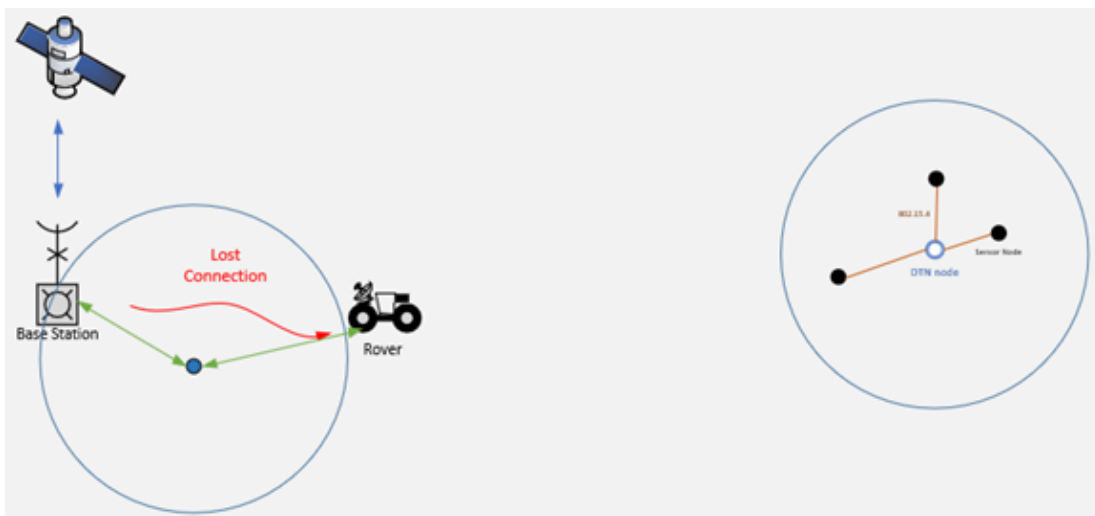
Αρχικά, το ρομποτικό όχημα βρίσκεται εντός εμβέλειας του σταθμού βάσης (Εικόνα 11). Πριν το ρομποτικό όχημα βγει εκτός ραδιοφωνικής εμβέλειας της βάσης, αφήνει ένα κόμβο DTN (Εικόνες 12 και 13). Ο συγκεκριμένος κόμβος βρίσκεται σε συνεχή επαφή με την βάση και μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί και ως αναμεταδότης. Ακολούθως το ρομποτικό όχημα φτάνει σε τοποθεσία εντός εμβέλειας του συλλέκτη δεδομένων-DTN κόμβου και συλλέγει τις μετρήσεις όλων των αισθητήρων (Εικόνα 14). Τέλος, απομακρυνόμενος από το δίκτυο αισθητήρων και πριν βρεθεί εντός εμβέλειας του σταθμού βάσης, έρχεται πρώτα σε επικοινωνία με τον DTN κόμβο που νωρίτερα είχε αφήσει (Εικόνα 15). Μέσω του DTN κόμβου, τα δεδομένα επιστρέφουν στον σταθμό βάσης, χωρίς την ανάγκη περαιτέρω μετακίνησης του ρομποτικού οχήματος εντός εμβέλειας του σταθμού βάσης.



Εικόνα 11.



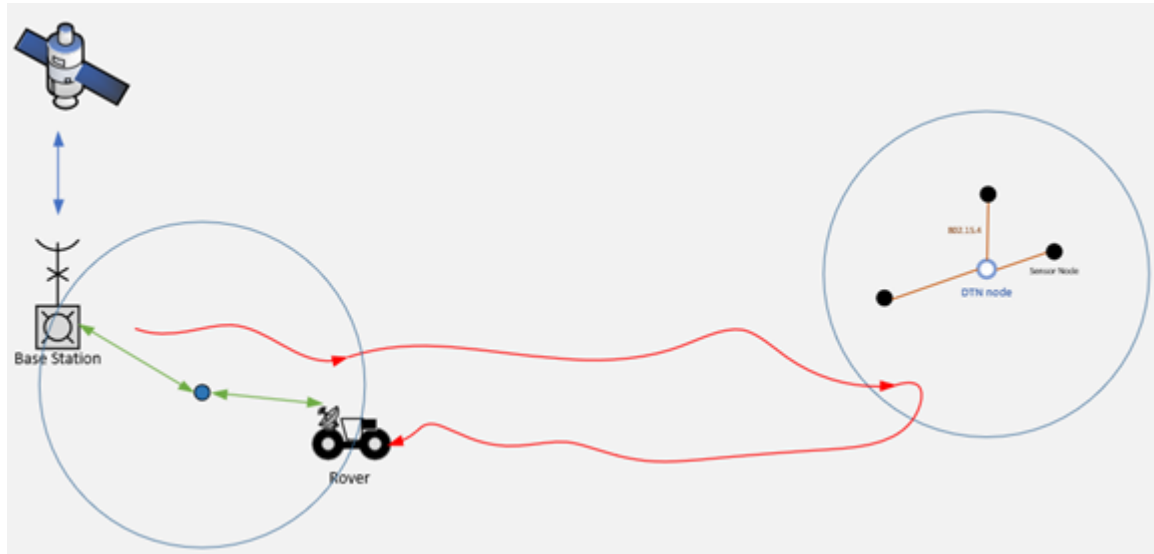
Εικόνα 12.



Εικόνα 13.



Εικόνα 14.



Εικόνα 15.

Στο σενάριο αυτό, δημιουργείται μια σημαντικά μεγαλύτερη εμβέλεια επικοινωνίας με το ρομποτικό όχημα που συνεπάγεται μείωση της απόστασης που έχει να διανύσει το ρομποτικό όχημα για να επικοινωνήσει με τον σταθμό βάσης. Επίσης, η χρήση DTN κόμβων οδηγεί στην ασφαλέστερη αποθήκευση και μεταφορά των δεδομένων τόσο στην ίδια την βαθμίδα από όπου πηγάζουν τα δεδομένα, όσο και στη διαδρομή που διανύει το ρομποτικό όχημα, μεγιστοποιώντας την πιθανότητα ανάκτησης σημαντικού μέρους των δεδομένων της αποστολής ακόμη και σε περίπτωση βλάβης του ρομποτικού οχήματος. Ακόμη, η ύπαρξη ενδιάμεσων DTN κόμβων μπορεί να επεκτείνει και την τοπολογία της βαθμίδας, καθώς μπορεί να βρίσκεται εντός της εμβέλειας κάποιου κόμβου της και με αυτόν τον τρόπο να ενισχύσει την υπολογιστική της ισχύ. Επιπροσθέτως, οι DTN κόμβοι μπορούν να φιλοξενήσουν περισσότερες από μία τεχνολογίες επικοινωνίας, λειτουργώντας ως ενδιάμεσοι σε διαφορετικές βαθμίδες συλλογής δεδομένων.

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι το κόστος των χρησιμοποιούμενων συσκευών καθώς και η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας (συγκριτικά με το σενάριο 1). Ωστόσο, ανάμεσα στους κόμβους του σεναρίου 3, υπάρχουν και κόμβοι αισθητήρων, οι οποίοι μειώνουν το συνολικό κόστος και την κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με το σενάριο 2.

Η εργαστηριακή υλοποίηση του σεναρίου μπορεί να γίνει με τις συσκευές των σεναρίων 1 και 2 ενώ η προσομοίωση της κίνησης του ρομποτικού οχήματος μπορεί να επιτευχθεί ως εξής. Εν αρχή, δημιουργία των δυο ad hoc wi-fi δικτύων του σεναρίου 1. Το wi-fi interface του DTN κόμβου συνδέεται μόνιμα στο δίκτυο της βάσης, ενώ το IEEE 802.15.4 interface του παραμένει επίσης ανοικτό αλλά σε διαφορετικό κανάλι από αυτό που χρησιμοποιούν οι απλοί κόμβοι αισθητήρων με τον συλλέκτη. Το ρομποτικό όχημα λοιπόν ξεκινά συνδεδεμένο με το δίκτυο βάσης, ακολουθώντας συνδέεται με το δίκτυο του συλλέκτη και τέλος αφού αποσυνδεθεί από τα δυο wi-fi δίκτυα, ενεργοποιεί το IEEE 802.15.4 interface του, στο ίδιο κανάλι με το DTN κόμβο, μέσω του οποίου γίνεται η τελική μεταφορά δεδομένων προς την βάση.

## 5. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Η εφαρμογή DTN δικτύων σε αποστολές εξερευνήσεων πλανητικών σωμάτων, μπορεί να θεωρηθεί ως μια ελκυστική λύση για την ασφαλή και αποδοτική μεταφορά δεδομένων. Η αποθήκευση των δεδομένων σε πολλαπλά σημεία του βασικού δικτύου, σε συνδυασμό με την δυνατότητα δημιουργίας μονοπατιών μεταφοράς δεδομένων μέσω χρήσης DTN κόμβων, μπορεί να δώσει λύση σε αρκετά προβλήματα που τυχόν προκύψουν κατά τον σχεδιασμό μιας αποστολής. Ενώ η πραγματική τοπολογία δικτύου εξαρτάται από την φύση της εκάστοτε αποστολής, τα παραπάνω εξεταζόμενα σενάρια μπορούν να αποτελέσουν βάση για εξειδικευμένα εργαστηριακά πειράματα πχ μετρήσεις αποδοτικότητας, συγκρίσεις ενεργειακών απαιτήσεων μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών σύνδεσης[19], ακόμα και την εξέταση λειτουργίας σε περιβάλλον έντονων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Η εργαστηριακή χρήση συσκευών διαφορετικών δυνατοτήτων προσομοιώνει τα προβλήματα των πραγματικών αποστολών στο να βρουν την βέλτιστη λύση μεταξύ όγκου/μάζας, υπολογιστικής ισχύος, διαθέσιμων πόρων, ενεργειακής επάρκειας και κόστους. Αντίστοιχα η χρήση των προτύπων IEEE 802.15.4 και wi-fi μπορεί να μην αντιστοιχεί στα πραγματικά πρότυπα που θα χρησιμοποιηθούν σε κάποια αποστολή, αλλά εξομοιώνουν τις δυνατότητες αλλά και τους περιορισμούς πιθανών τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης, για παράδειγμα την σύγκριση χρήσης μιας αργής αλλά ενεργειακά ελκυστικής λύσης, έναντι μιας γρήγορης αλλά ενεργοβόρας.

Για την περαιτέρω εμβάθυνση και εμπλουτισμό των πειραμάτων μπορεί να εξεταστεί και η προσθήκη νέων συσκευών διαφορετικών δυνατοτήτων και πόρων, όπως και η χρήση ενός ειδικά προσαρμοσμένου drone, ως ρομποτικού οχήματος. Στον τομέα του software, πέραν των ήδη χρησιμοποιούμενων Linux και RIOT, μπορεί να γίνει μια διερεύνηση χρήσης λειτουργικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε πραγματικές αποστολές, όπως το VxWorks. Αντίστοιχα πέρα της συνδεσιμότητας μεταξύ των IBR-DTN και ION, καλό θα ήταν να εξεταστούν και άλλες πλατφόρμες DTN όπως οι miniDTN και μDTN. Παράλληλα προτείνεται μια πιο ενδελεχής μελέτη της δυνατότητας λειτουργίας του ION σε περιβάλλοντα ad hoc δικτύωσης με χρήση τεχνικών mesh routing, και υποστήριξη τους ακόμα και με την ανάπτυξη ειδικού λογισμικού, αν χρειαστεί. Τέλος, μπορεί να διερευνηθεί η χρησιμότητα συνδυασμού των παραπάνω σεναρίων με τεχνολογίες Πληροφοριοκεντρικής Δικτύωσης (ICN) [20, 21] και εξερεύνηση των πλεονεκτημάτων που μπορεί να προσφέρει η χρήση τους στον τύπο των αποστολών που εξετάζουμε.

## Αναφορές/βιβλιογραφία

- [1] Vassilis Tsaoussidis, Ibrahim Matta, "Open issues on TCP for mobile Computing", Wireless Communications and Mobile Computing, John Wiley & Sons, vol.2 no 1, 2002, p 3-20.
- [2] Giorgos Papastergiou, Christos V. Samaras and Vassilis Tsaoussidis, "Where Does Transport Layer Fit into Space DTN Architecture?", 5th Advance Satellite Multimedia Systems Conference and 11th Signal Processing for Space Communications Workshop, ASMS-SPSC 2010, 13-15 September 2010, Cagliari, Italy
- [3] V. Cerf et al., "Delay-Tolerant Networking Architecture", RFC 4838, 2007. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc4838>. [Accessed: Nov- 2019].
- [4] K. Scott and S. Burleigh, "Bundle Protocol Specification", RFC 5050, November 2007. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc5050>. [Accessed: Nov- 2019].
- [5] T. Berners-Lee, R. Fielding and L. Masinter, RFC 3986, "Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax", January 2005. [Online]. Available: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3986.txt>. [Accessed: Nov- 2019].
- [6] Interplanetary Overlay Network (ION). Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. CA., [Online]. Available: <http://sourceforge.net/projects/ion-dtn/files/> [Accessed: Nov- 2019].
- [7] N. Bezirgiannidis, F. Tsapeli, S. Diamantopoulos, and V. Tsaoussidis, "Towards Flexibility and Accuracy in Space DTN Communications", in 8th ACM MobiCom Workshop on Challenged Networks, (CHANTS'13), Miami, Florida, USA, September 30, 2013.
- [8] M. Doering et al., "IBR-DTN: an efficient implementation for embedded systems", Third ACM workshop on Challenged networks, pp. 117-120, September 2008.
- [9] "802.15.4-2011 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)".
- [10] S. Symingtongro et al., "Bundle Security Protocol Specification", RFC 6257, May 2011. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc6257>. [Accessed: Nov- 2019].
- [11] I. Komnios, I. Alexiadis, N. Bezirgiannidis, S. Diamantopoulos, S.-A. Lenas, G. Papastergiou and V. Tsaoussidis, "SPICE Testbed: A DTN Testbed for Satellite and Space Communications", 9th International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TRIDENTCOM 2014), Guangzhou, China, May 5-7, 2014.
- [12] RIOT: The friendly Operating System for the Internet of Things, [Online]. Available: <https://www.riot-os.org/> .[Accessed: Nov- 2019].

- [13] G. Montenegro et al., "Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks", RFC 4944, September 2007. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4944.txt>. [Accessed: Nov- 2019].
- [14] G. Von Zengen et al. "An Overview of  $\mu$ DTN: Unifying DTNs and WSNs", 11th GI/ITG KuVS Fachgespräch " Drahtlose Sensornetze", 2012.
- [15] S. Rottmann, A. Willecke, J. Küberich, G. von Zengen, and L. Wolf "miniDTN: A DTN Stack for 5€-WiFi-Nodes", 16th GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze (FGSN 2017), September 2017, pp. 1-4 [Online]. Available: [edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2017/4102/pdf/fgsn2017\\_reportV3.pdf](http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2017/4102/pdf/fgsn2017_reportV3.pdf) [Accessed: Nov-2019]
- [16] "Raspbian", [Online] <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>. [Accessed: Nov-2019]
- [17] Flooding (computer networking), [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Flooding\\_\(computer\\_networking\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Flooding_(computer_networking)). [Accessed: Nov- 2019].
- [18] "Buildroot", [Online]. Available: <https://github.com/buildroot/buildroot>, [Accessed: Nov- 2019].
- [19] D. Vardalis and V. Tsaoussidis, "Energy-efficient Internetworking with DTN", Journal of Internet Engineering, Klidarithmos Press, Volume 5, Number 1, 2012.
- [20] G. Xylomenos et al., "A Survey of Information-Centric Networking Research," IEEE Commun. Surveys & Tutorials vol.16, no. 2, 2014.
- [21] Christos-Alexandros Sarros, Sotiris Diamantopoulos, Sergi Rene, Ioannis Psaras, Adisorn Lertsinsrubtavee, Carlos Molina-Jimenez, Paulo Mendes, Rute C Sofia, Arjuna Sathiseelan, George Pavlou, Jon Crowcroft, Vassilis Tsaoussidis, "[Connecting the Edges: A Universal, Mobile-Centric, and Opportunistic Communications Architecture](#)", IEEE Communications Magazine, Feb 2018