



## Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Ψηφιακός Πολιτισμός, Έξυπνες Πόλεις, IoT και Προηγμένες Ψηφιακές  
Τεχνολογίες»

### Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	<b>Ομαδική κάθετη διαπομπή με συσταδοποίηση σε οχηματικά δίκτυα ειδικού σκοπού, Group Vertical Handover using clustering in VANETs</b>
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	<b>Ιωάννης Κοσμόπουλος</b>
Πατρώνυμο	<b>Απόστολος</b>
Αριθμός Μητρώου	<b>ΨΠΟΛ19025</b>
Επιβλέπων	<b>Εμμανουήλ Σκόνδρας</b>

Ημερομηνία Παράδοσης **Ιούνιος 2021**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

(υπογραφή)

Δρ. Εμμανουήλ Σκόνδρας  
Διδάσκων ΠΜΣ

(υπογραφή)

Δημήτριος Βέργαδος  
Καθηγητής

(υπογραφή)

Άγγελος Μιχάλας  
Καθηγητής

## Περίληψη

Η εξέλιξη των οχηματικών δικτύων είναι πλέον πραγματικότητα μέσω της πληθώρας των πόρων και υπηρεσιών που προσφέρουν τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Πλέον, υπάρχει η δυνατότητα το εκάστοτε όχημα να εξυπηρετεί επιβάτες με διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η παραπάνω διαδικασία αποτελείται από οχήματα εξοπλισμένα με On Board Units και τον εξοπλισμό του χρήστη. Ως αποτέλεσμα, παρέχεται η δυνατότητα στα οχήματα να επικοινωνούν μεταξύ τους και με τις υπόλοιπες οντότητες του δικτύου με ελάχιστη καθυστέρηση. Η εγκαθίδρυση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής προϋποθέτει την ύπαρξη των πυκνού δικτύου κεραιών (Ultra Dense Networks ή UDN). Το UDN περιγράφει ένα σύνολο από κυψέλες με μικρή ακτίνα κάλυψης που αυξάνουν την χωρητικότητα του δικτύου πρόσβασης. Σε αυτό το περιβάλλον συνυπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες που παρέχουν υπηρεσίες φωνής και πολυμεσικό περιεχόμενο όπως το 3GPP Long Term Evolution Advanced (LTE-A), το IEEE 802.16 Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) και το πρότυπο IEEE 80.11p Wireless Access for Vehicular Environment (WAVE) RSUs. Τα δίκτυα πρόσβασης συνήθως κατασκευάζουν μια υποδομή Fog, η οποία αλληλεπιδρά με το Cloud για την παροχή υπηρεσιών στους χρήστες με αυστηρά κριτήρια ποιότητας των υπηρεσιών. Όμως, η ταυτόχρονη ανάπτυξη διαφορετικών τεχνολογιών στον ίδιο χώρο απαιτεί αξιόπιστους μηχανισμούς για τη διαχείριση της κινητικότητας των οχημάτων. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιούνται διαφορετικές εκδόσεις του πρωτοκόλλου Mobile IP (MIP) με την τελευταία Fast Proxy Mobile IPv6 (FPMIPv6) να εμφανίζεται συχνά στη βιβλιογραφία για τη διαχείριση της διαπομπής. Λόγω της έλλειψης συμβάντων αρχικοποίησης και επιλογής επόμενου δικτύου το πρωτόκολλο FPMIPv6 χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με το πρωτόκολλο Media Independent Handover (MIH) που παρέχει λύσεις στα παραπάνω προβλήματα. Όμως, η χρήση των προαναφερθέντων αλγορίθμων αυξάνει το φορτίο στο δίκτυο κορμού ειδικά όταν εφαρμόζονται σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον που αποτελείται από μικρές κυψέλες και οχήματα υψηλής κινητικότητας. Καταληκτικά, αλγόριθμοι συσταδοποίησης χωρίζουν την κυψέλη σε μικρότερες συστάδες και εκλέγουν κόμβους (Cluster Head ή CH) που είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση της κινητικότητας των μελών της συστάδας (Cluster Members ή CMs). Στην συγκεκριμένη περίπτωση, αξιοποιούνται οι αρχές του πρωτοκόλλου Group Handover (GHO) για τη μετάβαση μιας ομάδας χρηστών με κριτήριο την ίδια συστάδα σε ένα νέο δίκτυο. Ο συνδυασμός των συγκεκριμένων τεχνολογιών επιτρέπει την ομαλή λειτουργία ενός μηχανισμού εξαγωγής συστάδων από την εκάστοτε κυψέλη όπου ένα όχημα που πληροί προϋποθέσεις ταχύτητας, επικοινωνίας με υπόλοιπα οχήματα, κατεύθυνσης, ποιότητα λήψης σήματος αποφασίζει για διαδικασίες διαπομπής.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>6</b>
<b>Κατάλογος Ακρωνυμίων .....</b>	<b>7</b>
<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>9</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>10</b>
<b>Κεφάλαιο 1.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Εξέλιξη Ασύρματων Επικοινωνιών.....</b>	<b>11</b>
<b>Κεφάλαιο 2.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς (5G) .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.2 Αρχιτεκτονική.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.3 Χαρακτηριστικά.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.4 Αξιοποίηση Φάσματος.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.5 Multiple Input Multiple Output (MIMO).....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.6 Διαχείριση Παρεμβολών.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.7 Διαμοιρασμός Φάσματος.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.8 Ultra-Dense Networking (UDN).....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Οχηματικά Δίκτυα Ειδικού Σκοπού.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.1 Γενικά.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2 Συσταδοποίηση (Clustering).....</b>	<b>24</b>
<b>Κεφάλαιο 3.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Εισαγωγή στη Διαπομπή .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 Πρωτόκολλα Διαπομπής.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.1 Mobile IPv4.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2 Mobile IPv6.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.3 Fast Mobile IPv6.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.4 Proxy Mobile IPv6.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.5 Fast Proxy Mobile IPv6.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.6 Media Independent Handover (MIH).....</b>	<b>32</b>

<b>3.2.7</b>	<b>Group Handover (GHO)</b> .....	35
<b>Κεφάλαιο 4</b> .....		<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Αλγόριθμοι Κάθετης Διαπομπής</b> .....	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Αλγόριθμοι Κάθετης Διαπομπής σε Οχηματικά Δίκτυα</b> .....	<b>37</b>
<b>4.3</b>	<b>Αλγόριθμοι Συσταδοποίησης σε Οχηματικά Δίκτυα</b> .....	<b>39</b>
<b>Κεφάλαιο 5</b> .....		<b>40</b>
<b>5.1</b>	<b>Προτεινόμενος Αλγόριθμος Συσταδοποίησης</b> .....	<b>40</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Δημιουργία Συστάδων</b> .....	41
<b>5.1.2</b>	<b>Επιλογή Cluster Head</b> .....	41
<b>5.2</b>	<b>Προτεινόμενος Αλγόριθμος Κάθετης Διαπομπής</b> .....	<b>43</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Αρχικοποίηση Διαπομπής</b> .....	43
<b>5.2.2</b>	<b>Απόφαση Διαπομπής</b> .....	44
<b>5.2.3</b>	<b>Εκτέλεση Διαπομπής</b> .....	44
<b>Κεφάλαιο 6</b> .....		<b>47</b>
<b>6.1</b>	<b>Προσομοίωση Σεναρίου Συσταδοποίησης και Διαπομπής</b> .....	<b>47</b>
<b>6.2</b>	<b>Αποτελέσματα Προσομοίωσης</b> .....	<b>57</b>
<b>Κεφάλαιο 7</b> .....		<b>61</b>
<b>7.1</b>	<b>Συμπεράσματα</b> .....	<b>61</b>
<b>Βιβλιογραφία</b> .....		<b>63</b>
<b>Παράρτημα Α</b> .....		<b>66</b>

## **Κατάλογος Εικόνων**

Εικόνα 1. Σηματοδοσία Διαπομπής

Εικόνα 2. Τοπολογία Προσομοίωσης

Εικόνα 3. Εύρεση ελάχιστων αποστάσεων α'

Εικόνα 4. Εύρεση ελάχιστων αποστάσεων β'

Εικόνα 5. Εύρεση ελάχιστων αποστάσεων γ'

Εικόνα 6. Εύρεση ελάχιστων αποστάσεων δ'

Εικόνα 7. Στιγμιότυπο Συσταδοποίησης

Εικόνα 8. Μέλη Συστάδων

Εικόνα 9. Πιθανοί Cluster Heads

Εικόνα 10. Επιλογή Cluster Head

Εικόνα 11. Εκτέλεση Διαπομπής

Εικόνα 12. Διάγραμμα Κόστους Σηματοδοσίας

Εικόνα 13. Διάγραμμα Εκλογής Κεφαλής

Εικόνα 14. Διάγραμμα Μέσης Διάρκειας Κεφαλής

**Κατάλογος Ακρωνυμίων**

IoT	Internet of Things
LTE	Long Term Evolution
PTN	Personal Telecommunication Number
SIM	Subscriber Identity Module
MN	Mobile Node
HA	Home Agent
FA	Foreign Agent
CN	Correspondent Node
CoA	Care of Address
MIH	Media Independent Handover
MIHF	Media Independent Handover Function
MIES	Media Independent Event Service
MIIS	Media Independent Information Service
MICS	Media Independent Command Service
SAP	Service Access Point
PoA	Point of Attachment
PoS	Point of Service
AP	Access Point
QoS	Quality of Service
RSS	Received Signal Strength
MME	Mobility Management Entity
SGW	Serving Gateway
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
MIMO	Multiple Input Multiple Output
FD-MIMO	Full Dimension MIMO
LOS	Line of Sight
CSI	Channel State Information
UDN	Ultra Dense Networking
FDD	Frequency Division Duplex
TDD	Time Division Duplex
MAG	Mobile Acces Gateway
LMA	Local Mobility Anchor
PBU	Proxy Binding Update

PBA	Proxy Binding Acknowledgement
FBU	Fast Binding Update
AR	Acces Router
UNA	Unsolicited Neighbor Advertisement
HI	Handover Initiate
HACK	Handover Acknowledgement
MIP	Mobile IP
PMIPv6	Proxy Mobile IP version 6
FMIPv6	Fast Handovers Mobile IP version 6
FPMIPv6	Fast Handovers for Proxy Mobile IP version 6
LAN	Local Area Network
W-LAN	Wireless Local Area Network
BCE	Binding Cache Entry



## Εισαγωγή

Η σταδιακή εγκαθίδρυση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς αναβαθμίζει το ρόλο και τη χρήση των οχηματικών δικτύων. Ένα περιβάλλον υψηλής κινητικότητας, πολλαπλών απαιτήσεων και πληθώρας συσκευών, καλείται να ενστερνίζεται τα υπάρχοντα μοντέλα διαχείρισης της κινητικότητας. Οχήματα με υψηλή κινητικότητα καλούνται να είναι πάντα συνδεδεμένα στο δίκτυο που ικανοποιεί τις υπηρεσίες τους με το βέλτιστο τρόπο. Όμως, αυτή η ανάγκη αυξάνεται ραγδαία, επιβαρύνοντας το δίκτυο με τη διαχείριση της σηματοδότησης και τη συνεχόμενη παρακολούθηση των οχημάτων κατά τη διαπομπή τους. Κατά συνέπεια, κρίνεται απαραίτητη η σχεδίαση ενός μηχανισμού διαπομπής για τα οχηματικά δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς μαζί με τη χρήση αλγόριθμων συσταδοποίησης για την ομαδοποίηση τους. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας αλγόριθμος συσταδοποίησης και εκλογής της κεφαλής της συστάδας μαζί με ένα αποδοτικό σχήμα κάθετης ομαδικής διαπομπής (Group Vertical Handover, GVHO) για την πλήρη εφαρμογή του. Το εκάστοτε σημείο πρόσβασης ομαδοποιεί σε συστάδες την ακτίνα κάλυψής του, όπου η κεφαλή αυτής, πληρώντας όλα τα απαραίτητα κριτήρια, είναι υπεύθυνη για διαδικασίες αρχικοποίησης, επιλογής επόμενου δικτύου και ολοκλήρωσης της διαπομπής. Τα μέλη της συστάδας ενημερώνονται για την επικείμενη διαπομπή από την κεφαλή αλλά και μεταξύ τους με αποτέλεσμα να εγκαθιδρύουν το νέο κανάλι επικοινωνίας για την ανταλλαγή πακέτων άνω και κάτω ζεύξης. Το προτεινόμενο σχήμα εφαρμόζεται σε μια αρχιτεκτονική οχηματικού δικτύου επόμενης γενιάς αποτελούμενο από δίκτυα Long Term Evolution Advanced (LTE-A) , IEEE 802.16 Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) macro και femto κυψέλες καθώς και IEEE 802.11p Wireless Access for Vehicular Environment (WAVE) Road Side Units (RSUs). Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν πως η προτεινόμενη μέθοδος υπερισχύει των υπαρχόντων σχημάτων διαπομπής.

**Abstract**

The gradual establishment of 5th generation networks upgrades the role and use of vehicle networks. An environment of high mobility, multiple requirements, and a variety of devices, is called to embrace the existing models of mobility management. Vehicles with high mobility are required to always be connected to the network that satisfies their services in the best way. However, this need is growing rapidly, burdening the network with the management of signaling and the continuous monitoring of vehicles during their transmission. Therefore, it is necessary to design a transmission mechanism for the 5th generation vehicle networks together with the use of clustering algorithms for their grouping. In the present work, a clustering and selection algorithm of the cluster head is proposed together with an efficient Group Vertical Handover (GVHO) scheme for its full implementation. The respective access point groups its coverage radius into clusters, where its head, fulfilling all the necessary criteria, is responsible for initialization, next network selection and transmission completion processes. The members of the cluster are informed about the impending handover from the cluster head but also among themselves. As a result, they establish the new communication channel for the exchange of up and down link packets. The proposed scheme applies to a next-generation vehicle network architecture consisting of Long Term Evolution Advanced (LTE-A), IEEE 802.16 Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) macro and femto cells, and IEEE 802.11p Wireless Access for Vehicular Environment (WAVE) Road Side Units (RSUs). Experimental results show that the proposed method outperforms existing handover schemes.

## Κεφάλαιο 1

### 1.1 Εξέλιξη Ασύρματων Επικοινωνιών

Ο πρώτος σταθμός για την καθιέρωση των ασύρματων επικοινωνιών ήταν η μετάδοση του αγγλικού γράμματος “S” σε μια απόσταση 3 χιλιομέτρων με τη μορφή τριών κουκίδων χρησιμοποιώντας τον κώδικα Morse και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μετά από αυτή τη σπουδαία ανακάλυψη, η ασύρματη επικοινωνία αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. Όσο οι ασύρματες επικοινωνίες εξελίσσονται τόσο επιτυγχάνονται ικανοποιητικότεροι ρυθμοί μετάδοσης, κινητικότητα, κάλυψη και χρήση του φάσματος. Από τα πρώτα δίκτυα 1G και 2G που χρησιμοποίησαν μεταγωγή κυκλώματος, στα 2.5G και 3G που αξιοποίησαν τόσο μεταγωγή κυκλώματος όσο και μεταγωγή πακέτων, καταλήγουμε στις τεχνολογίες 3.5G μέχρι και 5G που χρησιμοποιούν αποκλειστικά μεταγωγή πακέτων. Παράλληλα, το φάσμα συχνοτήτων που καθιστά επιτυχημένη την επικοινωνία χωρίζεται σε αδειοδοτημένο και σε μη αδειοδοτημένο. Όλες οι προαναφερθέντες τεχνολογίες βασίζονται στην πρώτη κατηγορία ενώ τεχνολογίες όπως το WiFi, το WiMAX και το Bluetooth χρησιμοποιούν την δεύτερη κατηγορία φάσματος [1].

Τα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G) ανακοινώθηκαν επίσημα μέσα στο 1980. Προσφέρουν ρυθμό δεδομένων μέχρι και 2.4kbps. Οι κύριοι συνδρομητές του δικτύου ήταν το Advanced Mobile System (AMPS), το Nordic Mobile Telephone (NMT) και το Total Access Communication System (TACS). Παρουσιάζει πληθώρα μειονεκτημάτων όπως μειωμένη χωρητικότητα, άσκοπες διαπομπές, μη ικανοποιητικές φωνητικές κλήσεις και μηδενική ασφάλεια διότι οι φωνητικές κλήσεις πραγματοποιούνταν από πύργους συχνοτήτων των οποίων το φαινόμενο υποκλοπής κλήσεων από κακόβουλους χρήστες ήταν συχνό φαινόμενο. Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) ήρθαν στην επιφάνεια στα τέλη του 1990. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή τεχνολογία με την εγκαθίδρυση της τεχνολογίας Global Systems for Mobile Communications (GSM). Το GSM χρησιμοποιείται κυρίως για υπηρεσίες φωνής και παρέχει ρυθμό δεδομένων ίσο με 64kbps. Παράλληλα, η μπαταρία των τερματικών με διαπαφή για 2G διαρκούσε για μεγάλο χρονικό διάστημα εξαιτίας της χρήσης σημάτων χαμηλής ισχύος. Ένα από νέα χαρακτηριστικά που προσέφεραν ήταν τα γραπτά μηνύματα (SMS) και η αποστολή emails. Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το GSM, η τεχνολογία πρόσβασης στο μέσο με χρήση κώδικα (Code Division Multiple Access ή CDMA). Μετέπειτα, εμφανίζεται μια παραλλαγή των δικτύων δεύτερης γενιάς, το 2.5G, που χρησιμοποιεί το πλαίσιο του 2G σε συνδυασμό με την τεχνολογία General Packet Radio Services (GPRS). Η κύρια διαφορά του με την προγενέστερη έκδοση είναι η χρήση μεταγωγής πακέτων και κυκλώματος, επιτυγχάνοντας ρυθμό δεδομένων της τάξης των 144kbps. Οι κύριες τεχνολογίες που κυριαρχούν είναι το GPRS, το Enhanced Data Rate for GSM Evolution (EDGE) και το CDMA 2000 [1]. Η επόμενη γενιά ασύρματων επικοινωνιών εμφανίζεται στα τέλη του 2000 και είναι το 3G. Κύριο χαρακτηριστικό του είναι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που φθάνει τα 2Mbps ενώ οι υπηρεσίες που παρέχει έχουν ως κεντρικό άξονα το πρωτόκολλο IP. Εκτός από την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, πραγματοποιήθηκε σημαντική βελτίωση στην Ποιότητα Υπηρεσία (Quality of Service ή QoS). Επιπρόσθετα, ήταν πλέον δυνατή η παγκόσμια περιαγωγή δεδομένων και η βελτιωμένη ποιότητα στα δεδομένα φωνής. Παρ’ όλα αυτά, απαιτείται πολύ μεγαλύτερη ισχύς σε σχέση με αυτό που καταναλώνεται στα προηγούμενα πρότυπα δημιουργώντας μειονεκτήματα στις 3G συσκευές. Δεδομένου ότι το 3G εισήγαγε τις τεχνολογίες Wideband Code Division Multiple Access (CDMA) 2000, οι αναπτυσσόμενες τεχνολογίες High Speed Uplink/ Downlink Packet Access (HSUPA, HSDPA) και Evolution Data Optimized (EVDO) έφεραν στην επιφάνεια μια γενιά ανάμεσα στην 3<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> γενιά με τον τίτλο 3.5G. Το 3.5G είναι δυνατό να παρέχει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από 5-30Mbps [1]. Η επόμενη γενιά πριν τα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς, ονομάζεται 3.75G, και εισάγει σταδιακά τις τεχνολογίες των Long Term Evolution (LTE) και Fixed Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX). Θεωρείται δυνατό να ενισχύσουν την χωρητικότητα του δικτύου, να υποστηρίξουν περισσότερους χρήστες και να παρέχουν υπηρεσίες όπως βίντεο κατ’ απαίτηση, peer to peer

διαμοιρασμό αρχείων και σύνθετες διαδικτυακές εφαρμογές. Μαζί με τα παραπάνω, είναι προσβάσιμο ένα συμπληρωματικό φάσμα το οποίο διαπιστώνει ότι οι φορείς εκμετάλλευσης διαχειρίζονται το δίκτυό τους με μεγαλύτερη συμμόρφωση ενώ παράλληλα προσφέρει καλύτερη κάλυψη με βελτιωμένη απόδοση με μικρότερο κόστος [1]. Τέλος, τα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς ή αλλιώς 4G θεωρούνται ο επικρατέστερος απόγονος των προηγούμενων τεχνολογιών που αναφέρθηκαν. Το 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP) έχει εισάγει τις τεχνολογίες Long Term Evolution Advanced (LTE-A) σε συνδυασμό με το WiMaX. Ένα σύστημα 4G βελτιώνει τα δίκτυα επικοινωνίας προσφέροντας μια ολοκληρωμένη και αξιόπιστη λύση βασισμένη επίσης σε IP. Παροχές όπως η φωνή, τα δεδομένα και τα πολυμέσα μεταβιβάζονται στους συνδρομητές κάθε χρονική στιγμή και σε οποιαδήποτε γεωγραφική θέση και με πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές. Οι εφαρμογές που προσφέρονται για χρήση στα πλαίσια ενός 4G δικτύου είναι η υπηρεσία μηνυμάτων πολυμέσων (MMS), η ψηφιακή μετάδοση βίντεο (DVB) και η συνομιλία μέσω βίντεο, το περιεχόμενο τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας και η κινητή τηλεόραση. Δηλαδή, παρέχονται υπηρεσίες που μέχρι πρότινος ήταν αδιανόητες ή προσφέρονταν με πολύ χαμηλή ποιότητα, καθυστέρηση και απώλειες πακέτων [1].

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς (5G)

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Η εκθετική αύξηση της ζήτησης των χρηστών, ωθεί στην αντικατάσταση του 4G με 5G με μια προηγμένη τεχνολογία πρόσβασης που ονομάζεται Beam Division Multiple Access (BDMA) και Non-orthogonal ή Filter Bank multi carrier (FBMC) πολλαπλή πρόσβαση στο μέσο. Η ιδέα πίσω από την τεχνική BDMA εξηγείται εξετάζοντας την περίπτωση του σταθμού βάσης που επικοινωνεί με τους κινητούς σταθμούς. Σε αυτήν την επικοινωνία, μια ορθογώνια δέσμη εκχωρείται σε κάθε κινητό σταθμό και η τεχνική BDMA θα διαιρέσει αυτή τη δέσμη κεραίας σύμφωνα με τις τοποθεσίες των κινητών σταθμών για την παροχή πολλαπλών προσβάσεων στους κινητούς σταθμούς, οι οποίες αυξάνουν αντίστοιχα την χωρητικότητα του συστήματος. Μια ιδέα για την οριστική στροφή προς το 5G βασίζεται σε τρέχουσες κινήσεις, θεωρείται συνήθως ότι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G πρέπει να αντιμετωπίσουν έξι προκλήσεις που δεν αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά από το 4G, δηλαδή υψηλότερη χωρητικότητα, υψηλότερος ρυθμός δεδομένων, χαμηλότερη καθυστέρηση από άκρο σε τέλος, μαζική συνδεσιμότητα συσκευών, μειωμένο κόστος και συνεπή παροχή ποιότητας εμπειρίας. Τα πρότυπα IEEE 802.11ac, 802.11ad και 802.11af που παρουσιάστηκαν πρόσφατα είναι πολύ χρήσιμα και λειτουργούν ως δομικά στοιχεία στο δρόμο προς το 5G [1].

#### 2.1.2 Αρχιτεκτονική

Η εγκαθίδρυση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς προϋποθέτει την ύπαρξη των κατάλληλων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης στο μέσο. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες όπως το OFDMA είναι δυνατό να βρίσκει εφαρμογή για τα επόμενα 50 χρόνια. Ταυτόχρονα, δεν προκύπτει ανάγκη εγκατάστασης ή αλλαγής του ασύρματου εξοπλισμού όπως είχε προκύψει από τα δίκτυα 1<sup>ης</sup> έως και 4<sup>ης</sup> γενιάς. Μια χρήσιμη αλλαγή μπορεί να αποδειχτεί η προσθήκη μιας εφαρμογής ή μιας βελτίωσης στο βασικό δίκτυο κορμού ώστε να ικανοποιείται η πληθώρα αναγκών του εκάστοτε χρήστη. Γενικά, υπάρχει η πεποίθηση τους χρήστες να μεταπηδήσουν ομαλά σε αυτό το δίκτυο επόμενης γενιάς [1][7].

Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς καλούνται να δώσουν λύσεις στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών για ρυθμό δεδομένων, καθυστέρηση και κάλυψη. Η δραστική αλλαγή που απαιτείται σχετίζεται με την αλλαγή στη στρατηγική σχεδιασμού της ασύρματης κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής

που υφίσταται μέχρι και σήμερα. Έρευνες έχουν δείξει ότι το μεγαλύτερο πλήθος ασύρματων χρηστών παραμένουν στο εσωτερικό της κυψέλης τους για περίπου 80% του χρόνου και έξω από αυτή στο 20% του χρόνου. Στην υπάρχουσα αρχιτεκτονική, ένας χρήστης που κινείται μέσα ή έξω, πάντα εξυπηρετείται από έναν εξωτερικό σταθμό στο μέσο του κελιού που συμβάλλει στη διατήρηση της σύνδεσης και κατά συνέπεια της επικοινωνίας. Όμως, για να καταφέρουν οι εσωτερικοί χρήστες να επικοινωνήσουν με τον εξωτερικό σταθμό βάσης, το σήμα καλείται να ταξιδεύσει μέσα από τα τοιχώματα εσωτερικών χώρων ενεργοποιώντας φαινόμενα ασύρματης διάδοσης με αποτέλεσμα την υψηλή απώλεια λόγω της διείσδυσης αυτής. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται μειωμένη φασματική απόδοση, ρυθμός δεδομένων καθώς και ενεργειακή απόδοση στις ασύρματες επικοινωνίες. Η συγκεκριμένη πρόκληση αντιμετωπίζεται από τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, προτείνοντας ένα σχεδιασμό αρχιτεκτονικής που διακρίνει τους εξωτερικούς από τους εσωτερικούς κανόνες [1]. Με αυτό τον τρόπο η απώλεια διάδοσης, λόγω των αντικειμένων που συναντά στην εκάστοτε διαδρομή του σήμα, μειώνεται ελαφρώς. Η παραπάνω ιδέα υποστηρίζεται από την τεχνολογία MIMO (Multiple Input Multiple Output), η οποία περιγράφει την ανάπτυξη γεωγραφικά διασκορπισμένων σειρών με σταθμούς βάσης που έχουν δεκάδες ή ακόμα και εκατοντάδες κεραιές. Σήμερα, τα κεραιο-συστήματα MIMO χρησιμοποιούν από δύο έως και τέσσερις κεραιές. Όμως, το MIMO δημιουργεί την ανάγκη αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι μεγάλες συστοιχίες κεραιών για την ραγδαία αύξηση της χωρητικότητας. Επιπρόσθετα, η κατασκευή ενός μεγάλου τεράστιου δικτύου MIMO θεωρεί πρώτα πως οι εξωτερικοί σταθμοί βάσης θα είναι εξοπλισμένοι με μεγάλες συστοιχίες κεραιών και μεταξύ αυτών, κάποιοι διασκορπίζονται γύρω από την κυψέλη που εξυπηρετούν και συνδέονται με τον σταθμό βάσης μέσω καλωδίων οπτικών ινών που θεωρούνται κλειδί στην εγκατάσταση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Οι χρήστες με κινητικότητα που βρίσκονται εξωτερικά, είναι συνήθως εξοπλισμένοι με έναν συγκεκριμένο αριθμό μονάδων κεραιάς, αλλά με την άμεση συνεργασία τους δύναται να κατασκευαστεί μια μεγάλη συστοιχία εικονικών κεραιών, οι οποίες μαζί με τις συστοιχίες κεραιών του σταθμού βάσης σχηματίζουν εικονικούς μαζικούς συνδέσμους MIMO [7]. Ακόμα, κάθε κτίριο θα εξοπλιστεί με μεγάλες συστοιχίες κεραιών από έξω, για επικοινωνία με εξωτερικούς σταθμούς βάσης με τη βοήθεια εξαρτημάτων οπτικής επαφής (Line of Sight - LOS) [1]. Τελικά, τα ασύρματα σημεία πρόσβασης στο κτίριο συνδέονται με τις μεγάλες συστοιχίες κεραιών μέσω καλωδίων για επικοινωνία με εσωτερικούς χρήστες. Πρακτικά, αυτό θα βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση, τη μέση απόδοση κυψελών, τον ρυθμό δεδομένων και τη φασματική απόδοση του κυψελοειδούς συστήματος αλλά σε βάρος του αυξημένου κόστους υποδομής. Με την εισαγωγή μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής, οι εσωτερικοί χρήστες θα πρέπει να συνδεθούν ή να επικοινωνήσουν μόνο με εσωτερικά ασύρματα σημεία πρόσβασης, ενώ μεγαλύτερες συστοιχίες κεραιών παρέμειναν εγκατεστημένες έξω από τα κτίρια. Για επικοινωνία εσωτερικού χώρου, ορισμένες τεχνολογίες όπως WiFi, μικροκυψελικές εφαρμογές, περιαγωγή, επικοινωνίες κυμάτων χιλιοστών και επικοινωνίες ορατού φωτός θεωρούνται χρήσιμες για επικοινωνίες μικρής ακτίνας που μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων. Όμως, τεχνολογίες όπως τα κύματα χιλιοστόμετρου και οι επικοινωνίες ορατού φωτός χρησιμοποιούν υψηλές συχνότητες οι οποίες δεν εμφανίζονται συχνά στα κυψελωτά κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Θεωρείται αποδεκτό πως αυτές οι υψηλές συχνότητες δεν χρησιμοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους και σε εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων διότι δεν θα διεισδύσουν αποτελεσματικά από πυκνά υλικά ενώ παράλληλα θα διασκορπιστούν από σταγονίδια της βροχής, αέρια και τη χλωρίδα. Παρ' όλα αυτά, τα κύματα χιλιοστόμετρου και οι τεχνολογίες επικοινωνιών ορατού φωτός δύναται να βελτιώσουν το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για εσωτερικούς χώρους, επειδή παρέχουν μεγάλο εύρος ζώνης. Μαζί με την εισαγωγή νέου φάσματος, το οποίο δεν χρησιμοποιείται συμβατικά για ασύρματη επικοινωνία, υπάρχει μια ακόμη μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος της έλλειψης φάσματος, βελτιώνοντας τη χρήση του, μέσω των γνωστικών δικτύων ραδιοσυχνότητας (Cognitive Radio ή CR) [1][7].

Δεδομένου ότι η κυψελωτή αρχιτεκτονική του 5G είναι ετερογενής, καλείται να περιλαμβάνει macro-κυψέλες, micro-κυψέλες, μικρές κυψέλες και femto-κυψέλες. Η έννοια των κινητών κυψελών τηλεφωνίας αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του ασύρματου κυψελοειδούς δικτύου 5G και εν μέρει περιλαμβάνει τις έννοιες macro, micro, femto και pico . Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία χρηστών υψηλής κινητικότητας, οι οποίοι βρίσκονται μέσα στα αυτοκίνητα και τα τρένα υψηλής ταχύτητας. Τα κινητά μικρά κελιά τοποθετούνται μέσα στα κινούμενα αυτοκίνητα για να επικοινωνούν με τους χρήστες μέσα στο αυτοκίνητο, ενώ η τεράστια μονάδα MIMO που αποτελείται από μεγάλες συστοιχίες κεραιών τοποθετείται έξω από το αυτοκίνητο για να

επικοινωνεί με τον εξωτερικό σταθμό βάσης. Σύμφωνα με τη γνώμη του χρήστη, ένα κινητό μικρό κελί υλοποιείται ως κανονικός σταθμός βάσης και όλοι οι συναφείς χρήστες του παρατηρούνται ως μία μόνο μονάδα στο σταθμό βάσης, που αποδεικνύει την παραπάνω ιδέα του διαχωρισμού εσωτερικών και εξωτερικών εγκαταστάσεων. Οι χρήστες κινητών μικροκυττάρων έχουν υψηλό ρυθμό δεδομένων για υπηρεσίες με σημαντικά μειωμένη επιβάρυνση σηματοδότησης. Καθώς η αρχιτεκτονική του ασύρματου δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5G αποτελείται από δύο μόνο λογικά επίπεδα: ένα ραδιοφωνικό δίκτυο και ένα σύννεφο δικτύου. Διαφορετικοί τύποι εξαρτημάτων που εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες αποτελούν το ραδιοφωνικό δίκτυο. Το σύννεφο εικονικής λειτουργίας συνάρτησης δικτύου (NFV) αποτελείται από την οντότητα επιπέδου χρήστη (UPE) και την οντότητα επιπέδου ελέγχου (CPE) που εκτελεί λειτουργίες υψηλότερου επιπέδου καθώς σχετίζονται με τον χρήστη και επίπεδο ελέγχου, αντίστοιχα. Η ειδική λειτουργικότητα δικτύου ως υπηρεσία (XaaS) καλείται να παρέχει υπηρεσία ανάλογα με τις ανάγκες, τη συγκέντρωση πόρων είναι ένα από τα πιο κλασικά φαινόμενα [1][7]. Το XaaS είναι η σύνδεση μεταξύ ενός ραδιοφωνικού δικτύου και ενός δικτύου cloud. Η αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου 5G έχει ίση σημασία όσον αφορά το δίκτυο front-end και backhaul αντίστοιχα. Περιγράφει τη διασύνδεση μεταξύ των διαφόρων αναδυόμενων τεχνολογιών όπως το δίκτυο Massive MIMO, το δίκτυο γνωστικών ραδιοφώνων, τα κινητά και στατικά δίκτυα μικρών κυψελών. Αυτή η προτεινόμενη αρχιτεκτονική εξηγεί επίσης το ρόλο του cloud virtualization λειτουργίας δικτύου (NFV) στην αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου 5G. Η ιδέα της επικοινωνίας συσκευής σε συσκευή (D2D), μικρών σημείων πρόσβασης κυττάρων και Internet of things (IoT) έχει επίσης ενσωματωθεί σε αυτήν την προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου κυψελών 5G. Γενικά, αυτή η προτεινόμενη αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου 5G μπορεί να προσφέρει μια καλή πλατφόρμα για μελλοντικό δίκτυο τυποποίησης 5G. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να υλοποιηθεί η αρχιτεκτονική του ασύρματου δικτύου, και γενικά τα δίκτυα 5G [1].

### 2.1.3 Χαρακτηριστικά

Θεωρείται αρκετά πιθανό η κινητή και η ασύρματη κίνηση που δημιουργείται να αυξηθεί κατά χίλιες φορές μέσα στην επόμενη δεκαετία. Ως αποτέλεσμα, θα δημιουργηθούν περισσότερες από πενήντα εκατομμύρια συσκευές με την ανάγκη σύνδεσης στο υπολογιστικό νέφος (cloud) με την ανάγκη πρόσβασης και διαμοιρασμό δεδομένων σε οποιαδήποτε θέση και οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Τελικά, δημιουργούνται ανάγκες όπου τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς καλούνται να αντιμετωπίσουν με τα εξατομικευμένα τους χαρακτηριστικά, παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα, μικρότερη καταπόνηση ενέργειας και πόρων, μειωμένο κόστος και καλύτερη διαχείριση του φάσματος. Οι συγκεκριμένες ανάγκες δύναται να καλυφθούν με την κατασκευή ενός δικτύου επόμενης γενιάς που θα υποστηρίζει 1000 φορές περισσότερα δεδομένα ανά περιοχή, 10 με 100 φορές περισσότερες συνδεδεμένες συσκευές, 10 με 100 φορές μεγαλύτερη κατανάλωση δεδομένων από τον εκάστοτε τυπικό χρήστη, 10 φορές αποτελεσματικότερη διαχείριση της μπαταρίας για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας καθώς και 5 φορές μειωμένη καθυστέρηση από το άκρο σε άκρο (End to End Latency ή E2E). Πράγματι, το 5G δίκτυο υπόσχεται ρυθμούς δεδομένων μέχρι και 10Gbps ή αλλιώς 10 με 100 φορές βελτίωση της ταχύτητας από τα 4G και 4.5G δίκτυα [7]. Επίσης, επιτυγχάνεται 1ms καθυστέρηση και 1000 φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης ανά περιοχή. Παράλληλα, η κάλυψη μέχρι και 100 φορές περισσότερες συνδεδεμένες συσκευές ανά περιοχή είναι πλέον πραγματικότητα με 100% κάλυψη των γεωγραφικών περιοχών. Στο κομμάτι της ενέργειας επιτυγχάνεται 90% μείωση της κατανάλωσης άρα και καλύτερη διαχείριση. Τέλος, οι συσκευές χαμηλής ενέργειας αποκτούν προσδόκιμο ζωής μέχρι και 10 χρόνια [1].

Η παροχή όλων των παραπάνω εφαρμογών και απαιτήσεων παρέχεται από μια ενιαία πλατφόρμα με κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αρχικά, οι ραδιοσυχνότητες περιλαμβάνουν την ανάπτυξη νέων κυματομορφών μετάδοσης και νέες προσεγγίσεις σχετικά με τον έλεγχο πολλαπλής πρόσβασης στο μέσο και διαχείρισης πόρων. Κατά συνέπεια, οδηγούμαστε στις μεταδόσεις από πολλαπλούς κόμβους με πολλαπλές κεραιές. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό περιλαμβάνει το σχεδιασμό τεχνολογιών για τη μεταφορά και τη λήψη με πολλαπλές κεραιές μέσα από τεράστιες διαμορφώσεις κεραιών και την ανάπτυξη προηγμένων λογισμικών συντονισμού μεταξύ κόμβων και hop. Επιπρόσθετα, εμφανίζεται ο όρος της διάστασης του δικτύου (network

dimension) που σχετίζεται με τη ζήτηση, τη διαχείριση της διαδικτυακής κίνησης και κινητικότητας των χρηστών με την προσέγγιση νέων τεχνικών για αποτελεσματικότερη ακύρωση και διαχείριση των παρεμβολών. Οι παρεμβολές έχουν εξίσου σημασία στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς καθώς συντίθενται από ετερογενείς τοπολογίες και εφαρμογές. Τέλος, το κομμάτι χρήσης του φάσματος περιλαμβάνει την εξέταση των ζωνών λειτουργίας του πέρασ από τα συνηθισμένα και σε πολύ υψηλότερα μήκη κύματος. Μάλιστα, η εναπόθεση συγκεκριμένων περιοχών του φάσματος σε πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που προσφέρουν είναι σπουδαίας σημασίας λόγω των ιδιοτήτων της εκάστοτε εφαρμογής [1][7].

Το δίκτυο 5G χαρακτηρίζεται από την επεκτασιμότητα του και το σύνολο των υπηρεσιών που παρέχει. Τα προαναφερθέντα στοιχεία παρέχουν λύση στους στόχους που καλείται να φέρει εις πέρας το δίκτυο επόμενης γενιάς. Αρχικά, εμφανίζονται οι επικοινωνίες από συσκευή προς συσκευή (Device to Device communications ή D2D). Η παρούσα τεχνολογία επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ συσκευών επιτρέποντας την τοπική ανταλλαγή των δεδομένων χωρίς την ανάμιξη της δομής του δικτύου. Ακόμα, εμφανίζεται ο όρος του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things ή IoT). Η εγκαθίδρυση των Massive Machine Communications (MMC) θεωρείται η βάση του IoT, καταλήγοντας στην αυτοματοποίηση της βιομηχανίας, την δημόσια ασφάλεια, καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης και βελτιστοποίηση στον τομέα της υγείας. Ο ολοένα αυξανόμενος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών ωθεί στη δημιουργία των κινούμενων δικτύων (Moving Networks ή MN). Τα MN ενισχύουν και επεκτείνουν τη σύνδεση μεταξύ δυνητικά μεγάλων πληθυσμών από συσκευές που κουνούνται μέσα σε ένα κοινό χώρο. Οι στόχοι που αναφέρθηκαν προηγουμένως σχετικά με τη χωρητικότητα, τον αυξανόμενο ρυθμό δεδομένων και αποδοτικότητα των ζεύξεων πραγματοποιούνται με την εγκατάσταση δικτύων πυκνών κεραιών ή αλλιώς Ultra-Dense Networking. Τέλος, η χρήση αξιόπιστων δικτύων (Ultra-Reliable Networks) θα επιτρέψει υψηλούς βαθμούς διαθεσιμότητας [1].

#### 2.1.4 Αξιοποίηση Φάσματος

Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς είναι τα πρώτα που θα αξιοποιήσουν φάσμα μεταξύ των 400 MHz και 90 GHz. Αυτές οι φασματικές επιλογές παρέχουν τον καλύτερο συνδυασμό υψηλής χωρητικότητας, υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, κάλυψη σε οποιαδήποτε γεωγραφική θέση και εξαιρετική αξιοπιστία.

Οι μπάντες συχνοτήτων κάτω των 6 GHz καλύπτουν ανάγκες κάλυψης ευρείας περιοχής με ρυθμούς δεδομένων μέχρι και μερικά Gbps. Η αξιόπιστη κάλυψη είναι σημαντική για την παροχή συνδεσιμότητας σε συσκευές IoT (Internet of Things). Οι κύριες επιλογές φάσματος για χρήση στα δίκτυα της επόμενης γενιάς είναι γύρω στα 3,5 GHz και 4,5 GHz και σε κύματα του χιλιοστόμετρου στα 24-28 GHz και 39 GHz με την χρήση διπλεξίας χρόνου (time duplex division). Η αρχική φάση περιλαμβάνει την χρήση των ήδη υπαρχόντων σταθμών βάσης για 3,5 GHz και 4,5 GHz για την απλούστερη μετάβαση στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Στα 3,5 GHz με την χρήση MIMO και κατευθυντικών κεραιών παρέχεται ίδια κάλυψη με τα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς χρησιμοποιώντας την ζώνη των 2 GHz. Μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων μέχρι και 2 Gbps μπορούν να επιτευχθούν με τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, χρησιμοποιώντας 100 MHz εύρους ζώνης, παρέχοντας χωρητικότητα έως και 10 φορές μεγαλύτερη από τα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς. Το φάσμα των χιλιοστόμετρων κυμάτων παρέχει έως και 1 GHz ανά χρήστη για να επιτρέψει ταχύτητες μέχρι και 20 Gbps. Επιπρόσθετα, τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς μπορούν να χρησιμοποιήσουν συχνότητες κάτω του 1 GHz με την χρήση διπλεξίας συχνότητας για την παροχή κάλυψης σε ευρεία περιοχή, συμπεριλαμβανομένης της βαθιάς διείσδυσης σε εσωτερικούς χώρους. Αυτό το φάσμα χαμηλής συχνότητας δύναται να επωφεληθεί από την κατανομή των 700 MHz στην Ευρώπη ή την κατανομή των 600 MHz στις ΗΠΑ, καθώς και την απελευθέρωση των 850-900 MHz από τα δίκτυα 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> γενιάς [1].

Το φάσμα είναι ένα βασικό στοιχείο για έναν πάροχο υπηρεσιών επικοινωνιών. Αναλυτικότερα, το διαθέσιμο φάσμα έχει σημαντικό αντίκτυπο στον τρόπο καθορισμού της μέγιστης χωρητικότητας και κάλυψης του δικτύου. Το κύριο φάσμα στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς θα είναι στα 3,5 GHz με διαθέσιμα έως και 400 MHz από τα 3,4 έως 3,8 GHz, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών 42 και 43 του 3GPP. Αντίστοιχα, στην Κίνα θα χρησιμοποιηθεί 3,3 έως 3,4 GHz και στην Ιαπωνία 4,4 έως 4,9 GHz. Οι συχνότητες γύρω από τα 3,5 GHz είναι ελκυστικές για τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς επειδή είναι διαθέσιμες παγκοσμίως και είναι πιθανό να προσφέρει περισσότερο από 100 MHz συνεχόμενου φάσματος ανά πάροχο υπηρεσιών επικοινωνιών [13]. Όμως, με το φάσμα των 3,5

GHz, η εμβέλεια των κυψελών είναι περιορισμένη επειδή η διάδοση του σήματος μειώνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα. Άρα, τα 3,5 GHz θα παρέχουν μικρότερη κάλυψη από τα 2 GHz που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς. Όμως, η ανάπτυξη και η σταδιακή εγκαθίδρυση του MIMO και του massive MIMO θα επιτρέψει την πλήρη αστική κάλυψη με δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Επίσης γίνεται να χρησιμοποιηθεί το διαθέσιμο φάσμα κάτω από το 1 GHz όπου παρέχει βαθιά εσωτερική κάλυψη, αξιόπιστη ζεύξη ανόδου και μεγαλύτερη κάλυψη. Άρα, είναι κατάλληλο για συσκευές πάνω στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Ο χαμηλός ρυθμός δεδομένων που αξιοποιεί το IoT μπορεί να υποστηριχθεί με αποτελεσματικό τρόπο. Οι χαμηλές μπάντες θα μπορούσαν να βασιστούν στα 700 MHz όπου σύντομα θα είναι διαθέσιμα. Άλλη επιλογή είναι τα 900 MHz που αξιοποιούνται από τα δίκτυα 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> γενιάς. Οι περισσότεροι πάροχοι θα κρατήσουν τα προγενέστερα δίκτυα μέχρι και το 2020, αλλά θα ελαχιστοποιηθεί η κατανομή του φάσματος, για την δημιουργία επιπλέον χώρου λειτουργίας στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς [1].

### 2.1.5 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Το MIMO είναι μια καινοτόμα τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων επικοινωνιών. Είναι βασικό στοιχείο πολλών προτύπων ασύρματης τεχνολογίας και επικοινωνίας όπως το IEEE 802.11n, το 4G, το LTE, το 3GPP και το WiMAX. Λόγω του έντονου φαινομένου της πολυδυσίας, συχνά το σήμα φτάνει εξασθενημένο στον δέκτη με αποτέλεσμα το κανάλι να θεωρείται αναξιόπιστο και να μειώνεται η χωρητικότητα του.

Η τεχνολογία αυτή, με τον μεγάλο αριθμό κεραιών που απαιτεί, παρέχει υψηλό ρυθμό δεδομένων σε συνδυασμό με την αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος. Για αυτό τον λόγο τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη χρησιμοποιείται τουλάχιστον μία κεραία που επιλέγει ξεχωριστή διαδρομή για να μεταφέρει τα δεδομένα. Η κεραίες αυτές, καλούνται να έχουν απόσταση μεταξύ τους ίση με  $\lambda/2$  όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος του σήματος έτσι ώστε να μην υπάρχει καμία συσχέτιση μεταξύ των κεραιών. Μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται MIMO συστήματα που αποτελούνται από δύο, τέσσερις, ή οχτώ κεραιές. Όταν ο αριθμός των κεραιών γίνεται μεγαλύτερος από δέκα ή εκατό τότε είναι δόκιμο να χρησιμοποιείται ο όρος Massive MIMO. Η βασική ιδέα είναι η αξιοποίηση του φαινομένου της πολυδυσίας των επιβατικών ακτινών προς δικό μας όφελος. Ένα κανάλι ενδέχεται να επηρεαστεί από διαλείψεις και το ωφέλιμο σήμα προς τον θόρυβο (Signal to Noise ratio) θα υποβαθμιστεί. Η αρχή του διαφορισμού ορίζει την μετάδοση πολλαπλών εκφάνσεων του ίδιου σήματος στον δέκτη [14][15]. Συνεπώς, συμβάλλει στην σταθεροποίηση του καναλιού και στην μείωση των σφαλμάτων. Υπάρχουν τρία είδη διαφορισμού που θα αναλυθούν: ως προς τον χρόνο (time diversity), ως προς την συχνότητα (frequency diversity) και ως προς τον χώρο (space diversity). Στην πρώτη περίπτωση, το ίδιο μήνυμα μεταδίδεται σε διαφορετικές χρονοθυρίδες από τον πομπό στον δέκτη. Στην δεύτερη περίπτωση, το ίδιο μήνυμα μεταδίδεται σε περισσότερες από μια φέρουσες συχνότητες. Τέλος, στον διαφορισμό χώρου, περισσότερες από μια κεραιές είναι τοποθετημένες στον πομπό και στον δέκτη. Σε αυτή την περίπτωση, οι κεραιές εκμεταλλεύονται τους διαφορετικούς ραδιοδρόμους που ακολουθεί το σήμα. Οι διαφορετικοί ραδιοδρόμοι προκύπτουν από αντικείμενα που βρίσκονται σε αστικά ή μη περιβάλλοντα. Όσες περισσότερες κεραιές υπάρχουν, τόσοι περισσότεροι ραδιοδρόμοι δημιουργούνται. Με βάση τα παραπάνω, στον χωρικό διαφορισμό βασίζεται το MIMO. Το κέρδος του διαφορισμού (diversity gain) προκύπτει ως το γινόμενο των κεραιών που υπάρχουν στον πομπό και τον δέκτη ( $No. Of Tx Antenna * No. Of Rx Antenna$ ).[2]

Με βάση το θεώρημα του Shannon,  $Capacity = Bandwidth * \log_2(1 + S/N)$ , υπάρχει ένα άνω όριο για την χωρητικότητα ενός καναλιού λόγω δεδομένου εύρους ζώνης και ωφέλιμου σήματος προς θόρυβο (S/N). Με την χρησιμοποίηση υψηλότερης διαμόρφωσης πετυχαίνουμε μεγαλύτερη χωρητικότητα αλλά παράλληλα πρέπει να έχουμε υψηλό S/N. Η παραπάνω κίνηση θα ήταν χρονοβόρα και δύσκολη στην υλοποίηση της. Χρησιμοποιώντας την χωρική πολυπλεξία γίνεται αποδοτικότερη η χωρητικότητα του καναλιού και του φάσματος. Αυτή η τεχνική βασίζεται στο MIMO, δηλαδή στις πολλαπλές κεραιές του πομπού και του δέκτη. Σε κάθε χωρικό κανάλι ανατίθενται διαφορετικά, ανεξάρτητα δεδομένα προς μετάδοση, αυξάνοντας τον ρυθμό μετάδοσης του συστήματος. Κατά συνέπεια, αν υπάρχει πολυμορφία στον χώρο μετάδοσης, πολλαπλά ανεξάρτητα υπό-κανάλια δημιουργούνται στο ίδιο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Με αυτό τον τρόπο δεν σπαταλώ επιπλέον εύρος ζώνης ή κόστος.



Η εγκαθίδρυση του MIMO έχει οδηγήσει στην δημιουργία προσαρμοστικών συστημάτων που αξίζει να αναφερθούν όπως το «Beam-forming». Αυτή η τεχνική υλοποιείται με δύο τρόπους : σταδιακή συστοιχία και προσαρμοστική συστοιχία. Στην πρώτη μορφή συστοιχίας υπάρχει ένας αριθμός προκαθορισμένων μοτίβων. Το απαιτούμενο μοτίβο, κάθε φορά αλλάζει, ανάλογα με την κατεύθυνση που απαιτείται. Στην δεύτερη μορφή συστοιχίας υπάρχει ένας απεριόριστος αριθμός μοτίβων που προσαρμόζονται ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες σε πραγματικό χρόνο. Πρακτικά, οι συστοιχίες που αναφέρθηκαν, επιτρέπουν στην κεραία να εστιάσει σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό θα μειώσει την παρεμβολή και θα αυξήσει την χωρητικότητα, καθώς το τερματικό θα βρίσκεται εντός μιας δομής που θα σχηματίζεται προς την κατεύθυνση του. Με λίγα λόγια η κεραία «αφοσιώνεται» στον χρήστη [1][2].

Το Massive MIMO είναι μια εξελισσόμενη τεχνολογία που έχει αναβαθμιστεί από την τρέχουσα τεχνολογία MIMO. Το σύστημα Massive MIMO χρησιμοποιεί συστοιχίες κεραιάς που περιέχουν μερικές εκατοντάδες κεραιές, στις οποίες ταυτόχρονα σε ένα χρόνο, η υποδοχή συχνότητας εξυπηρετεί πολλές δεκάδες τερματικά χρήστη. Ο κύριος στόχος της τεχνολογίας Massive MIMO είναι να εξαγάγει όλα τα οφέλη του MIMO αλλά σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα. Σε γενικές γραμμές, το Massive MIMO είναι μια εξελισσόμενη τεχνολογία δικτύων επόμενης γενιάς, η οποία είναι ενεργειακά αποδοτική, στιβαρή, ασφαλής και αποτελεσματική στη διαχείριση του φάσματος [2]. Το Massive MIMO εξαρτάται από τη χωρική πολυπλεξία, η οποία επιπλέον εξαρτάται από το σταθμό βάσης για να έχει πληροφορίες κατάστασης του εκάστοτε καναλιού, τόσο στην άνω ζεύξη όσο και στην κάτω ζεύξη. Σε περίπτωση κάτω ζεύξης, δεν είναι εύκολο, αλλά στην περίπτωση άνω ζεύξης, είναι εύκολο, καθώς τα τερματικά στέλνουν πιλότους. Με βάση τους πιλότους, εκτιμάται η απόκριση καναλιού του εκάστοτε τερματικού χρήστη. Στα συμβατικά συστήματα MIMO, ο σταθμός βάσης στέλνει τις πιλοτικές κυματομορφές στα τερματικά και με βάση αυτά, το τερματικό εκτιμά το κανάλι, το κβαντοποιεί και τα ανατροφοδοτεί στο σταθμό βάσης. Αυτή η διαδικασία δεν είναι βιώσιμη για μαζικά συστήματα MIMO, ειδικά σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας λόγω δύο λόγων. Πρώτον, οι πιλότοι κατερχόμενης ζεύξης από το σταθμό βάσης πρέπει να είναι ορθογώνιοι μεταξύ των κεραιών, λόγω του οποίου η απαίτηση του χρόνου, οι χρόνοι συχνότητας για τους πιλότους κατερχόμενης ζεύξης αυξάνονται με την αύξηση του αριθμού των κεραιών. Έτσι, τα συστήματα Massive MIMO θα απαιτούσαν τώρα μεγάλο αριθμό παρόμοιων θέσεων σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα MIMO. Δεύτερον, καθώς ο αριθμός των κεραιών σταθμού βάσης αυξάνεται ραγδαία, ο αριθμός των εκτιμήσεων καναλιού αυξάνεται επίσης για κάθε τερματικό, το οποίο με τη σειρά του χρειάζεται εκατοντάδες περισσότερες υποδοχές άνω ζεύξης για να ανατροφοδοτήσει τις αποκρίσεις καναλιού στο σταθμό βάσης που το εξυπηρετεί. Μια γενική λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η λειτουργία Time Division Duplexing (TDD) και η εξάρτηση από την αμοιβαιότητα μεταξύ των καναλιών άνω και κάτω ζεύξης [2].

Η τεχνολογία Massive MIMO εξαρτάται από συνεκτικά σήματα φάσης από όλες τις κεραιές στο σταθμό βάσης, αλλά η υπολογιστική επεξεργασία αυτών των σημάτων είναι απλή. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα πλεονεκτήματα ενός μαζικού συστήματος MIMO:

Το θετικό της αύξησης της χωρητικότητας οφείλεται στην τεχνική χωρικής πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται σε συστήματα Massive MIMO. Όσον αφορά τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, λόγω της αύξησης του αριθμού των κεραιών, η ενέργεια μπορεί τώρα να συγκεντρωθεί σε μικρές περιοχές του χώρου. Αναλυτικότερα, βασίζεται στην αρχή της συνεκτικής υπέρθεσης των μετωπικών κυμάτων. Μετά τη μετάδοση των διαμορφωμένων σημάτων από τις κεραιές, ο σταθμός βάσης δεν έχει κανένα ρόλο στην επιβεβαίωση ότι όλα τα μέτωπα κύματος που έχουν, εκπέμπονται από τις κεραιές. Τελικά, αυτές θα προσθέσουν εποικοδομητικά στις θέσεις του προορισμού του τερματικού και αρνητικά αλλού. Η μηδενική πίεση χρησιμοποιείται για την καταστολή της εναπομένουσας παρεμβολής μεταξύ των ακροδεκτών, αλλά εις βάρος της αυξημένης μεταδιδόμενης ισχύος [2]. Η χρήση του συνδυασμού μέγιστης αναλογίας (MRC) σχετίζεται περισσότερο με τη δύναμη μηδέν (ZF) λόγω της ευκολίας του ανταγωνισμού. Δηλαδή, τα λαμβανόμενα σήματα πολλαπλασιάζονται με τις αποκρίσεις του συζευγμένου καναλιού τους και λόγω ότι εκτελείται σε κατάσταση διασποράς αυτόνομα σε κάθε στοιχείο κεραιάς. Αν και το ZF λειτουργεί επίσης εξίσου καλά για ένα σύστημα MIMO το οποίο συνήθως δεν το κάνει MRC. Ο κύριος λόγος πίσω από την αποτελεσματική χρήση του MRC με Massive MIMO που περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό κεραιών σταθμών βάσης, οι αποκρίσεις καναλιών που συνδέονται με διαφορετικά τερματικά τείνουν να είναι σχεδόν ορθογώνιες. Με τη χρήση του δέκτη MRC, λειτουργούμε σε ένα σύστημα περιορισμένου θορύβου. Το MRC στο σύστημα Massive MIMO θα

μειώσει την ισχύ στο μέτρο του δυνατού, στερώντας πραγματικά τη διαταραχή της συνολικής φασματικής απόδοσης και των πολλαπλών παρεμβολών, αλλά τα αποτελέσματα των ελλείψεων υλικού είναι πιθανό να ξεπεραστούν από τον θερμικό θόρυβο. Όμως, η πρόθεση πίσω από τη συνολική 10 φορές υψηλότερη φασματική απόδοση σε σύγκριση με το συμβατικό MIMO είναι επειδή 10 φορές περισσότεροι τερματικοί εξυπηρετούνται ταυτόχρονα στον ίδιο πόρο συχνότητας χρόνου [26].

Το 3GPP έχει υλοποιήσει σε δοκιμαστικό στάδιο την τεχνολογία και τις απαιτήσεις του massive MIMO με το όνομα Full-Dimension MIMO. Η ενσωμάτωση του έχει γίνει στα τρέχοντα δίκτυα 4G και LTE. Δεδομένου το κόστος και την πολυπλοκότητα υλοποίησης υπάρχει ως στόχος, η χρησιμοποίηση έως και 64 κεραιών στην πλευρά του πομπού. Οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι και σήμερα γίνονται γύρω από ιδανικά σενάρια μετάδοσης, με στόχο την παρατήρηση της λειτουργίας των συστοιχιών από κεραιές σε δύο διαστάσεις. Θα αναλυθούν ρεαλιστικά ζητήματα για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας όπως οι αρχιτεκτονικές TXRU, beamformed CSI-RS, 3D beamforming και CSI [3].

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του FD-MIMO είναι οι ενεργές κεραιές στοιχισμένες έτσι ώστε να δημιουργούν ένα δυσδιάστατο πλάνο. Σε μία τέτοια δομή η μετάδοση είναι δυνατό να γίνεται και σε οριζόντια και σε κάθετη διεύθυνση. Έτσι, πετυχαίνουμε μετάδοση σε χώρο τριών διαστάσεων. Αυτή η συστοιχία κεραιών επιτρέπει την εξοικονόμηση χώρου φιλοξενώντας ένα μεγάλο αριθμό από κεραιές σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Δεν θα ήταν δυνατό ούτε εύχρηστο να τοποθετηθεί ένα σύστημα μήκους τριών ή τεσσάρων μέτρων στην κορυφή ενός κτηρίου. Αυτό έχει ως συνέπεια, την κατάργηση των πρώιμων massive MIMO που μετέδιδαν ηλεκτρομαγνητικά κύματα μόνο προς την οριζόντια διεύθυνση. Τα χαρακτηριστικά από τα οποία θα καθορίζεται ένα τέτοιο μοντέλο διάδοσης είναι αρχικά η συσχέτιση της ζεύξης οπτικής επαφής (Line of Sight LOS) με την απόσταση και το ύψος [4]. Η πιθανότητα για αυτή την ζεύξη αυξάνεται με την αύξηση του ύψους του τερματικού (UE) και με την μείωση της απόστασης του σταθμού βάσης (eNB) με το τερματικό (UE). Ακόμα, οι απώλειες ραδιοδρόμου (path loss) εξαρτώνται από το ύψος. Το τερματικό (UE) χαρακτηρίζεται από λιγότερες απώλειες ραδιοδρόμου όταν βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το έδαφος. Τελευταίο χαρακτηριστικό που καθορίζει ένα τέτοιο περιβάλλον, είναι η εξάρτηση της διάδοσης των επιβατικών ακτινών από την απόσταση και το ύψος. Όταν η θέση του σταθμού βάσης (eNB) είναι ψηλότερη από αυτή του τερματικού (UE), η διάδοση των επιβατικών ακτινών μειώνεται ανάλογα το ύψος του τερματικού. Επίσης, η διάδοση των επιβατικών ακτινών επηρεάζεται αρνητικά από την απομάκρυνση των δύο μερών της επικοινωνίας [1][3].

Επιπλέον ένα από νέα χαρακτηριστικά του FD-MIMO είναι η χρησιμοποίηση του beamformed RS ή αλλιώς beamformed CSI-RS για την εγκαθίδρυση και επίβλεψη της κατάστασης του καναλιού (CSI). Σύμφωνα με αυτό παράγονται διάφορα μοτίβα που επιτρέπουν στην κεραία να εστιάσει σε διάφορες περιοχές (σταδιακή συστοιχία και προσαρμοστική συστοιχία). Για κάθε μοτίβο παράγεται ένα βάρος που το καθορίζει. Το τερματικό στην συνέχεια, καταλαβαίνει από ποιο μοτίβο λαμβάνει την βέλτιστη απόδοση και ανατροφοδοτεί τον σταθμό βάσης με τον δείκτη του. Η χρήση αυτής της τεχνικής έχει ως αποτελέσματα την μείωση του overhead της άνω ζεύξης λόγω ανατροφοδότησης διότι το τερματικό επιστρέφει στον σταθμό βάσης μόνο τον δείκτη του βέλτιστου beamformed CSI-RS. Στην κάτω ζεύξη, μειώνεται το overhead λόγω των πιλοτικών σημάτων, διότι πλέον το σήμα που στέλνεται δεν εξαρτάται από τον αριθμό των κεραιών ή την αύξηση αυτών. Τέλος, στα συμβατικά συστήματα MIMO αν η ισχύς της μετάδοσης είναι  $X$  watt τότε είναι αναγκαίο να μεταδοθούν  $X/\text{Αριθμός Κεραιών}$  watt ενώ στο FD-MIMO είναι  $X/\text{beamformed CSI-RS}$  watt. Όμως, για να υποστηριχθεί το μοντέλο του beamformed CSI-RS είναι αναγκαία η επινόηση μιας καινοτόμας αρχιτεκτονικής για μετάδοση που ονομάζεται TXRU. Αυτή η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει μια σύνδεση υλικού ανάμεσα στο μονοπάτι του σήματος βάσης και των στοιχείων της συστοιχίας κεραιών. Το beamforming γίνεται πιο εύκολο με τον έλεγχο της φάσης και του κέρδους (gain) τόσο για τον αναλογικό όσο και για τον ψηφιακό τομέα. Ακόμα, αλλάζει ο τρόπος που μετράται το CSI όποτε δύναται να σχεδιαστεί ένας νέος μηχανισμός για την ανατροφοδότηση του σταθμού βάσης μέσω του τερματικού. Το TXRU αποτελείται από την συστοιχία TXRU, την συστοιχία των κεραιών και το RDN. Ο ρόλος του RDN είναι να στέλνει το σήμα που είναι προς μετάδοση στον ενισχυτή ισχύος (PA) και το εισερχόμενο σήμα στον ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA). Κάθε TXRU διαθέτει το δικό του PA και LNA ώστε ο σταθμός βάσης να ελέγχει μεμονωμένα κάθε κεραία. Ανάλογα με την ανατροφοδότηση από το

beamformed CSI-RS, οι συστοιχίες κεραιών μπορούν να μετασχηματιστούν σε διαίρεση συστοιχίας και σε συνδεδεμένη συστοιχία. Στην αρχιτεκτονική διαίρεσης συστοιχίας, οι κεραιές χωρίζονται σε ομάδες όπου ένα TXRU ανατίθεται σε κάθε ομάδα ενώ στην συνδεδεμένη συστοιχία τα σήματα πολλαπλών TXRU να παραδίδονται σε μια κεραία [3][4].

Συμπερασματικά, για την εγκαθίδρυση του FD-MIMO είναι απαραίτητο να υλοποιηθούν οι τεχνολογίες που αναφέρθηκαν με σκοπό την βελτίωση της φασματικής απόδοσης, της ενεργειακής απόδοσης και της πολυπλοκότητας των κυψελοειδών συστημάτων της πέμπτης γενιάς.

## 2.1.6 Διαχείριση Παρεμβολών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι πόροι τουλάχιστον στα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς είναι περιορισμένοι. Μια γνωστή τεχνική για την αποτελεσματικότερη διαχείριση τους είναι η επαναχρησιμοποίηση. Η επαναχρησιμοποίηση χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στις περισσότερες αρχιτεκτονικές με κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Παράλληλα, όπως υπόσχονται τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, η αυξημένη χωρητικότητα και ο ρυθμός δεδομένων για τον εκάστοτε χρήστη είναι πλέον πραγματικότητα και ένα κύριο χαρακτηριστικό τους. Έτσι, με την εισαγωγή της έννοιας της επαναχρησιμοποίησης και της πυκνότητας, θα υπάρξει μια επιπλέον βελτίωση όσον αφορά την αποτελεσματική κατανομή φορτίου μεταξύ μακροκυψελών και τοπικών δικτύων πρόσβασης. Όμως, όλα αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν προκύψει με το πρόβλημα ότι η πυκνότητα και το φορτίο του δικτύου έχουν αυξηθεί σημαντικά και αντίστοιχα τα τερματικά στο δίκτυο υποφέρουν από αυξημένη ομοδιαυλική παρεμβολή, κυρίως στα όρια των κυψελών. Έτσι, η παρεμβολή αποτελεί απειλή η οποία αναστέλλει την περαιτέρω βελτίωση των κυψελωτών συστημάτων 4G. Εξ ου και η ανάγκη για αποτελεσματικά συστήματα διαχείρισης παρεμβολών, είναι ζωτικής σημασίας για την ομαλή μετάβαση στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Ακολουθούν οι δύο τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών: Σε ένα σύγχρονο και αυξανόμενο κυψελωτό σύστημα, οι παρεμβολές αυξάνονται και θεωρούνται ως μια μεγάλη απειλή, οπότε για τον μετριασμό ή τη διαχείριση των παρεμβολών, μια κατάλληλη τεχνική διαχείρισης παρεμβολών είναι η ανάγκη που καλείται να επιλυθεί. Η προηγμένη διαχείριση παρεμβολών στον δέκτη ή ένας προηγμένος δέκτης είναι η τεχνική που θα βοηθήσει αισθητά στη διαχείριση των παρεμβολών που προκαλούνται όταν για παράδειγμα ο τερματικός χρήστης είναι στα όρια της κυψέλης. Θα ανιχνεύσει και θα προσπαθήσει ακόμη και να αποκωδικοποιήσει τα σύμβολα του σήματος παρεμβολής στην διαμόρφωση, το σχήμα κωδικοποίησης, το κανάλι και την κατανομή των πόρων. Στη συνέχεια, με βάση την έξοδο του ανιχνευτή, τα σήματα παρεμβολής μπορούν να ανακατασκευαστούν και να ακυρωθούν από το λαμβανόμενο σήμα έτσι ώστε να βελτιωθεί η αναμενόμενη απόδοση αποκωδικοποίησης σήματος χωρίς να προκύπτει θόρυβος. Οι προηγμένοι δέκτες όχι μόνο περιορίζουν τις παρεμβολές μεταξύ των κυψελών στα όρια των κυψελών, αλλά και τις παρεμβολές εντός των κυψελών, όπως στην περίπτωση του MMIMO. Σύμφωνα με το LTE-Advanced Release 10, κάθε πομπός σταθμού βάσης διαθέτει έως και οκτώ κεραιές που θα απαιτούν παρεμβολές εντός των κυψελών, καθώς ο αριθμός των κεραιών αυξάνεται πλέον στις 8 [1].

Στο πρότυπο LTE, έκδοση 8 και 9, η τυχαιοποίηση παρεμβολών μέσω ανακατασκευής σημάτων μετάδοσης είναι η μόνη στρατηγική διαχείρισης παρεμβολών που εξετάστηκε και δεν προέκυψαν προηγμένες στρατηγικές διαχείρισης ομοδιαυλικών παρεμβολών. Αλλά στο 3GPP LTE-Advanced, έκδοση 10 και 11, μέσω αναγνώσεων πιθανότητας, συνειδητοποιήθηκε ότι υπήρχε χώρος για επιπλέον βελτίωση της απόδοσης στις άκρες των κυψελών με τη βοήθεια συγχρονισμένης μετάδοσης μεταξύ πολλαπλών πομπών διασκορπισμένων σε διαφορετικές τοποθεσίες της εκάστοτε κυψέλης. Για τη βαθμονόμηση της ανάπτυξης, συνήθως αποδόθηκαν ορισμένα τυπικά συντονισμένα σχήματα πολλαπλών σημείων, όπως ο συντονισμός του προγραμματισμού, η διαμόρφωση συντονισμένης δέσμης, η επιλογή δυναμικών σημείων και η μετάδοση αρθρώσεων. Στο άρθρο [1], ο κοινός προγραμματισμός χρησιμοποιείται ευρέως για αναφορά προηγμένης διαχείρισης παρεμβολών κυψελοειδών συστημάτων και παραλλαγών συνδέσεων από την πλευρά του δικτύου. Όμως, στα συντονισμένα σχήματα πολλαπλών σημείων, οι ρυθμοί μετάδοσης και τα σχήματα πολλαπλών κυψελών δεν καθορίζονται αυτόνομα. Στην περίπτωση της γρήγορης διανομής δικτύου και της δια-λειτουργικότητας, προηγμένα συστήματα διαχείρισης παρεμβολών από κοινού προγραμματισμό από την πλευρά του δικτύου καλείται να αναφέρεται λεπτομερώς στα συστήματα 5G, χωρίς να το διαχωρίζει εξ ολοκλήρου ως

ζήτημα απασχόλησης. Για τον προσδιορισμό του μέγιστου συντονισμού, ο εξοπλισμός του χρήστη και η πλευρά του δικτύου, δύναται να εξεταστεί αμέσως η προηγμένη διαχείριση παρεμβολών [1].

### 2.1.7 Διαμοιρασμός Φάσματος

Η κάλυψη των χαρακτηριστικών στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς όπως αυτά προβλέπονται, απαιτούν περισσότερο φάσμα και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Τα υπάρχοντα συστήματα 4<sup>ης</sup> γενιάς δεν δύναται να συγκριθούν με τα νέα δίκτυα γενιάς λόγω των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που προσφέρουν και τελικά το φάσμα που αξιοποιούν για να τα πραγματοποιήσουν. Τελικά, για να αντιμετωπιστούν φαινόμενα μη ανταπόκρισης στα χαρακτηριστικά που δύναται να εφαρμοστούν χρησιμοποιούνται οριζόντιοι και κάθετοι μηχανισμοί διαμοιρασμού του φάσματος. Η σημασία της κοινής χρήσης φάσματος θα αυξηθεί, οι περιοχές του αδειοδοτημένου φάσματος θα παραμείνει η βασική προσέγγιση για ευρυζωνικές συνδέσεις λόγω της αξιοπιστίας και της οικονομικής βεβαιότητας που παρέχεται. Αντίστοιχα, οι οντότητες του δικτύου που χρησιμοποιούν κοινό φάσμα καλούνται να διαδραματίσουν ρόλο εξισορρόπησης.

Σήμερα, συναντώνται δύο τεχνικές κατανομής του φάσματος που επιτρέπουν στα κινητά ευρυζωνικά συστήματα να μοιράζονται το φάσμα. Η πρώτη τεχνική χαρακτηρίζεται ως κατανεμημένη λύση όπου τα συστήματα συντονίζονται μεταξύ τους σε ίση βάση, ενώ στη δεύτερη τεχνική, την κεντρική λύση, το εκάστοτε σύστημα συντονίζεται απομονωμένα με μια κεντρική μονάδα υποστήριξης ενώ παράλληλα δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Οι κατανεμημένες τεχνικές κατανομής φάσματος είναι πιο αποτελεσματικές, καθώς δύναται να πραγματοποιηθούν σε ένα τοπικό πλαίσιο. Η αρχή του, είναι να διαχειρίζεται μόνο τις εκπομπές που δημιουργούν πραγματικές παρεμβολές μέσα σε συστήματα. Ο κατανεμημένος συντονισμός μπορεί να συμπεριληφθεί εξ ολοκλήρου σε πρότυπα και κατά συνέπεια καλείται να λειτουργήσει χωρίς την ανάγκη εμπορικών συμβάσεων μεταξύ φορέων [1]. Η διαχείριση της οριζόντιας κατανομής φάσματος συμβαίνει μέσω της σαφούς ανταλλαγής μηνυμάτων συνεχώς μεταξύ των συστημάτων κοινής χρήσης μέσω μιας διακριτής διεπαφής σε ένα πρωτόκολλο συνύπαρξης peer to peer. Αυτό το πρωτόκολλο, περιγράφει την απόδοση των κόμβων κατά τη λήψη συγκεκριμένων μηνυμάτων ή τη λήψη συγκεκριμένων συμβάντων αντίστοιχα. Τα συστήματα που μελετώνται μεταδίδουν συχνά σήματα που εμφανίζουν παρουσία, συντελεστή δραστηριότητας και τη στιγμή που μεταδίδουν λύσεις συνύπαρξης με βάση το beacon. Οι πληροφορίες που διατίθενται ανοιχτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα άλλα συστήματα για να προσαρμόσουν την απόδοση πρόσβασης στο φάσμα τους για την παροχή δίκαιης κατανομής φάσματος. Τα σήματα συνύπαρξης είναι πιθανώς η λύση τόσο για οριζόντιες όσο και για κάθετες ρυθμίσεις κοινής χρήσης. Ένα παράδειγμα εφαρμογής του είναι το πρότυπο 802.22.1 [1]. Τα σχήματα που βασίζονται στο μηχανισμό MAC χρησιμοποιούν ένα πρωτόκολλο MAC που έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει την οριζόντια κοινή χρήση φάσματος. Το Bluetooth που χρησιμοποιεί συστήματα μεταπήδησης της συχνότητας και το WLAN που χρησιμοποιεί τη λειτουργία αποστολής και εκκαθάρισης για αποστολή, είναι μερικά από τα παραδείγματα που εμφανίζονται σήμερα. Για ομοίμορφη οριζόντια συνύπαρξη με συστήματα Wi-Fi, προσαρμόζεται μια λειτουργία συνύπαρξης Wi-Fi. Το πρωτόκολλο MAC δύναται να επιτρέψει αθόρυβες περιόδους για να λειτουργούν τα συστήματα Wi-Fi και χρησιμοποιούν μια μέθοδο ακρόασης πριν από την επικοινωνία που επιτρέπει στα συστήματα Wi-Fi να αποκτήσουν πρόσβαση στο κανάλι. Επιπρόσθετα, στην ανίχνευση φάσματος και στην επιλογή δυναμικής συχνότητας, το εύρος λειτουργικών συχνοτήτων επιλέγεται δυναμικά βάσει των αποτελεσμάτων μέτρησης όπως η ανίχνευση ενέργειας ή η ανίχνευση χαρακτηριστικών. Για την ανίχνευση των προαναφερθέντων φάρων συνύπαρξης, η ανίχνευση χαρακτηριστικών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Λόγω του προβλήματος του κρυφού κόμβου, αυτή η μέθοδος δεν θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη [1].

Η κεντρική τεχνική διαμοιρασμού φάσματος είναι χρήσιμη για τα συστήματα που έχουν ευκρίνεια της κοινής χρήσης φάσματος σε υψηλότερο επίπεδο από την πραγματική ευκρίνεια κατανομής πόρων. Αυτή η τεχνική έχει ορισμένους περιορισμούς, καθώς είναι συντηρητική και ενδεχομένως χωρίζει τους χρήστες στους αντίστοιχους ορθογώνιους πόρους που τους εκχωρούνται χωρίς πλήρεις πληροφορίες σχετικά με το αν θα επέμβουν στην πραγματικότητα ή όχι. Τα οφέλη που προσκομίζονται αφορούν την αξιοπιστία, τη βεβαιότητα και τον έλεγχο. Η μέθοδος βάσης δεδομένων γεωγραφικής θέσης είναι ένα παράδειγμα μιας κεντρικής τεχνικής

κοινής χρήσης που περιλαμβάνει την αναζήτηση μιας βάσης δεδομένων για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με τους διαθέσιμους πόρους σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία για ένα συγκεκριμένο χρήστη. Αυτή είναι η απαιτούμενη κλασική κάθετη λύση κοινής χρήσης για πρόσβαση στις τοπικά αχρησιμοποίητες τηλεοπτικές ζώνες. Η προσέγγιση του broker φάσματος είναι ένα από τα παραδείγματα μιας κεντρικής τεχνικής κοινής χρήσης, στην οποία τα συστήματα οριζόντιας ανταλλαγής διαπραγματεύονται με μια κεντρική μονάδα διαχείρισης πόρων για τη λήψη βραχυπρόθεσμων αναφορών για χρήση πόρων φάσματος σε περιορισμένη βάση. Τόσο η βάση δεδομένων γεωγραφικής θέσης όσο και η προσέγγιση του broker ραδιοφάσματος μπορούν επιπλέον να υποστηρίξουν την οριζόντια κοινή χρήση μεταξύ συστημάτων χωρίς τη χρήση κάποιας άδειας. Ωστόσο, μαζί με τις δύο παραπάνω τεχνικές κατανομής φάσματος, έχουν διατεθεί και οι πιο εύχρηστες ζώνες φάσματος, αλλά διάφορες μελέτες παραθέτουν ότι αυτές οι ζώνες δεν αξιοποιούνται σημαντικά. Αυτές οι ανησυχίες ώθησαν τους ερευνητές να καινοτομήσουν μια νέα τεχνολογία η οποία θα αντιμετωπίσει τις επερχόμενες απαιτήσεις των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς τόσο όσον αφορά την αποδοτικότητα του φάσματος όσο και την απόδοση ορισμένων εφαρμογών που προσφέρει. Για να αντιμετωπίσει τη ζήτηση του μέλλοντος, μια τεχνολογική επανάσταση που θα ενδυναμώσει τον μελλοντικό ασύρματο κόσμο είναι το γνωστικό ραδιοφάσμα (Cognitive Radio). Το γνωστικό ραδιοφάσμα είναι πλήρως προγραμματιζόμενες ασύρματες συσκευές που διαθέτουν εκτεταμένη ιδιότητα προσαρμογής για την επίτευξη καλύτερης απόδοσης δικτύου και εφαρμογών. Δύναται να ανιχνεύσει το περιβάλλον και να εκτελεί δυναμική προσαρμογή στα πρωτόκολλα δικτύωσης, στις μεθόδους χρησιμοποίησης φάσματος, στις μεθόδους πρόσβασης καναλιών και στην κυματομορφή της εκάστοτε μετάδοσης που χρησιμοποιείται. Αναμένεται ότι η γνωστική ραδιο-τεχνολογία θα προκύψει σύντομα ως προγραμματιζόμενο ραδιοφάσμα γενικού σκοπού. Παρόμοια με το ρόλο των μικροεπεξεργαστών στον υπολογιστή, το γνωστικό ραδιοφάσμα θα χρησιμεύσει επίσης ως παγκόσμια πλατφόρμα για την επέκταση του υπάρχοντος ασύρματου συστήματος. Παρ' όλα αυτά το έργο της επιτυχούς κατασκευής και μεγάλης κλίμακας ανάπτυξης γνωστικών ραδιο-δικτύων για τη δυναμική βελτίωση της χρήσης του φάσματος είναι ένα περίπλοκο έργο που απαιτεί πόρους και χρόνο [1].

### 2.1.8 Ultra-Dense Networking (UDN)

Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών για δεδομένα και υψηλότερες ταχύτητες φτάνει στα όρια του το ήδη υπάρχον 4G δίκτυο. Είναι λογικό ότι το 5G θα αναβαθμίσει τον προκάτοχο του και θα δώσει λύση σε προβλήματα χωρητικότητας, ενεργειακής απόδοσης και καθυστέρησης. Η πραγματοποίηση αυτών των στόχων θα βασιστεί στο UDN , ένα πυκνό δίκτυο κεραιών, που θα επιτρέψει ταχύτητες στον χρήστη της τάξεως των Gbps , συνεχή και αδιάκοπη κάλυψη και επικοινωνίες φιλικές προς το περιβάλλον [5].

Στο UDN, οι σταθμοί βάσης της μακροκυψέλης με μεγάλη κάλυψη, ελέγχουν τον χρονοπρογραμματισμό των χρηστών, την ορθή κατανομή των πόρων και υποστηρίζουν χρήστες υψηλής κινητικότητας ενώ οι σταθμοί βάσης της μικροκυψέλης με πολύ μικρότερη κάλυψη παρέχουν υψηλό ρυθμό δεδομένων στον χρήστη και είναι κατάλληλο για χρήστες χαμηλής κινητικότητας. Εξαιτίας των μικροκυψελών και των σταθμών βάσης που αντιστοιχούν σε αυτές, μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και η ενεργειακή απόδοση είναι δυνατό να βελτιωθεί λόγω των μειωμένων απωλειών διαδρομής στις μικρότερες κυψέλες. Για την υποστήριξη του UDN, απαιτείται μια ραχοκοκαλιά του δικτύου με αποδοτικό εύρος ζώνης της τάξης των GigaHertz που να συνδέει τον σταθμό βάσης της macro κυψέλης με τους σταθμούς βάσης των μικροκυψελών. Έχει αποδειχθεί ότι το απαραίτητο εύρος ζώνης είναι μεταξύ του 1 GHz και 10 GHz για την ορθή υποστήριξη του UDN. Οι συμβατικές οπτικές ίνες έχουν το κατάλληλο εύρος ζώνης και την αξιοπιστία αλλά η εφαρμογή τους στην ραχοκοκαλιά του δικτύου δεν είναι η βέλτιστη οικονομική επιλογή. Κατά συνέπεια, η ασύρματη ραχοκοκαλιά του χιλιοστόμετρου κύματος (mmWave) είναι ελκυστικότερη και ξεπερνά τους γεωγραφικούς περιορισμούς. Το πρώτο πλεονέκτημα του χιλιοστόμετρου κύματος της ραχοκοκαλιάς είναι μια μεγάλη ποσότητα αχρησιμοποίητου εύρους ζώνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προς μετάδοση πληροφορία. Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι ένα μεγάλος αριθμός κεραιών (massive MIMO) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις επικοινωνίες της τάξεως του χιλιοστόμετρου λόγω του μικρού μήκους κύματος, το οποίο είναι δυνατό να βελτιώσει την κατευθυντικότητα του σήματος, να μειώσει την ομοδιαυλική παρεμβολή και να ενισχύσει την αξιοπιστία της ζεύξης [5].

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στο UDN οι μικροκυψέλες δημιουργούνται σε σημεία που απαρτίζονται από πολλούς χρήστες έντονης «κινητικότητας» που απαιτούν υψηλό ρυθμό δεδομένων όπως είναι τα εμπορικά κέντρα, τα κτίρια γραφείων και τα διαμερίσματα. Όπως είναι φανερό η πλειοψηφία της ζήτησης προκύπτει από τέτοιους χώρους (hotspots). Επομένως η ραχοκοκαλιά μεταξύ των σταθμών βάσης διαφορετικών κυψελών θα πρέπει να παρέχει μεγάλο εύρος ζώνης με αξιόπιστη μετάδοση. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος εγκατάστασης τέτοιων small-σταθμών βάσης [5].

Μέχρι τώρα, κύματα χιλιοστόμετρου δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στα υπάρχοντα κινητά δίκτυα λόγω της έντονης εξασθένησης και των ακριβών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Όμως είναι κατάλληλο για τους παρακάτω λόγους. Αρχικά, οι αχρησιμοποίητες συχνότητες των 57-67 GHz, 71-76 GHz και 81-86 GHz μπορούν να παρέχουν το κατάλληλο εύρος ζώνης για μετάδοση. Επιπλέον, αξιοποιούν κατάλληλα τις εξασθενίσεις και τις παρεμβολές. Η απόσταση μετάδοσης για την μπάντα E φτάνει μέχρι και μερικά χιλιόμετρα ενώ για την μπάντα V μέχρι και 500-700 μέτρα εξαιτίας είτε της βροχής είτε της ατμόσφαιρας. Άρα, με τέτοια υψηλή εξασθένηση είναι ιδανικές για χρήση σε small-κυψέλες. Τέλος, το μικρό μήκος κύματος του mmWave υποδηλώνει ότι οι συστοιχίες κεραιών μπορούν να τοποθετηθούν τόσο σε macro όσο και σε small σταθμούς βάσης για την βελτίωση της κατευθυντικότητας και την αντιστάθμιση των απωλειών διαδρομής. Άρα, ο εξοπλισμός για το mmWave μπορεί να τοποθετηθεί και σε χώρους χαμηλού κόστους όπως σε ένα απλό κτήριο, σε ένα μεταφορικό μέσο ή ακόμα και σε λάμπες φωτός [5].

Στο UDN είναι ορατό της πρόβλημα διαχείρισης της κινητικότητας του χρήστη εξαιτίας της διαπομπής. Η χρήση μεγάλου αριθμού μικρών κυψελών αυξάνει τον αριθμό των διαπομπών και πιο συγκεκριμένα, δυσκολεύει την ορθή αντιμετώπιση τους. Η κατάσταση αυτή είναι πιθανό να οδηγήσει σε αχρείαστες διαπομπές και το φαινόμενο του «ring rong» όπου το τερματικό αλλάζει συνέχεια σημείο πρόσβασης ανάμεσα στον τωρινό σταθμό βάσης και τον υποψήφιο σταθμό βάσης. Επιπλέον, το δίκτυο επιβαρύνεται με την αύξηση των μηνυμάτων σηματοδότησης στην επικοινωνία τερματικού και σταθμού βάσης, τωρινού και επόμενου σταθμού βάσης καθώς και του σταθμού βάσης με την ραχοκοκαλιά του εκάστοτε δικτύου [6]. Έτσι, οι πόροι του δικτύου καταναλώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία της διαπομπής και ο χρήστης να βρεθεί εκτός δικτύου. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων προτείνονται διάφοροι αλγόριθμοι διαχείρισης κινητικότητας. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν αλγόριθμοι με τροποποιημένη διαδικασία σηματοδότησης για την επίλυση των αχρείαστων διαπομπών ενώ άλλοι βασίζονται σε ιδανικές διαδικασίες απόφασης παράδοσης του ελέγχου σε νέο σταθμό βάσης για την μείωση του ποσοστού αποτυχίας και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των μικροκυψελών. Άλλοι αλγόριθμοι, προτείνουν την συνεργασία των μικροκυψελών με στόχο την μείωση των συχνών μεταβιβάσεων σε πυκνά δίκτυα κεραιών. Τέλος, υπάρχουν αλγόριθμοι που βασίζονται στην ύπαρξη σχέσης ανάμεσα στην αποτυχία της διαπομπής και το φαινόμενο «ring rong» κατά την διαδικασία παράδοσης του ελέγχου. Όμως, οι αλγόριθμοι που αναφέρθηκαν δεν ανταποκρίνονται πλήρως στις ανάγκες του UDN και δεν εφαρμόζονται με επιτυχία. Επίσης παρατηρούνται σημαντικές καθυστερήσεις κατά την παράδοση του ελέγχου στον υποψήφιο σταθμό βάσης [6].

## 2.2 Οχηματικά Δίκτυα Ειδικού Σκοπού

### 2.2.1 Γενικά

Τα οχηματικά δίκτυα ειδικού σκοπού (Vehicular ad hoc networks VANETs) χρησιμοποιούν επικοινωνίες μικρής ακτίνας κάλυψης και ασύρματη πρόσβαση σε ένα περιβάλλον που αποτελείται από οχήματα. Ένα VANET περιλαμβάνει αυτόνομη οργάνωση και διαχείριση με σκοπό να εγκατασταθεί σε οποιαδήποτε υποδομή. Στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική όλα τα οχήματα επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας μηνύματα ενώ παράλληλα λειτουργούν είτε ως κόμβοι είτε ως ασύρματα σημεία πρόσβασης [8][9].

Ένα VANET αποτελείται από οχηματικούς κόμβους με υψηλή και μεταβλητή κινητική κατάσταση καθώς και από κόμβους που είναι εγκατεστημένοι σε σταθερά σημεία κατά μήκος των δρόμων. Η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων και των οχημάτων με τα σταθερά σημεία του δρόμου επιτυγχάνεται μέσα από την τεχνολογία Ασύρματης Πρόσβασης σε Οχηματικά Δίκτυα Ομαδική κάθετη διαπομπή με συσταδοποίηση σε οχηματικά δίκτυα ειδικού σκοπού

(Wireless Access in the Vehicular Environment, WAVE). Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας παρέχει μια πληθώρα χρησιμών πληροφοριών για τους οδηγούς και τους πεζούς εξασφαλίζοντας ένα ασφαλές περιβάλλον συνύπαρξης. Στα VANETs, το εκάστοτε όχημα είναι εξοπλισμένο με τεχνολογίες που του επιτρέπουν να ανταλλάσσει μηνύματα ύπαρξης κίνησης, πληροφορίες ασφάλειας κατά την λειτουργία του. Οι κύριοι οντότητες που συναντιούνται σε αυτό το περιβάλλον είναι το On Board Unit (OBU), Road Side Unit (RSU) και Application Unit (AU). Αρχικά, το OBU είναι ένας ηλεκτρονικός εξοπλισμός, που εγκαθίσταται συνήθως στα οχήματα, και ανταλλάσσει μηνύματα μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα μηνύματα παράγονται από τους σένσορες που είναι τοποθετημένοι στο όχημα όπως ο μετρητής ταχύτητας, επιτάχυνσης, γεωγραφικής θέσης και η κατάσταση των φρένων [10]. Ακόμα τοποθετείται ένα Resource Command Processor (RCP) που λειτουργεί ως μια μνήμη που γράφει και διαβάζει περιεχόμενο που σχετίζεται άμεσα με τα υπόλοιπα οχήματα του δικτύου. Αντίστοιχα, το RSU είναι μια σταθερή συσκευή που βρίσκεται τοποθετημένοι κατά μήκος του δρόμου ή σε πολυσύχναστα σημεία όπως οι χώροι στάθμευσης ή οι διασταυρώσεις. Στο RSU τοποθετείται μια συσκευή δικτύου για επικοινωνίες μικρής κλίμακας σύμφωνα με το πρωτόκολλο IEEE 802.11p, το οποίο υπάρχει και στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Αυτές οι μονάδες συλλέγουν πληροφορίες όπως οι χρονισμοί των φαναριών, οι καιρικές συνθήκες και η κατάσταση του δρόμου στην εκάστοτε περιοχή. Όλα τα παραπάνω μηνύματα είναι χρήσιμα όταν αποστέλλονται στα οχήματα για να κρατούν ενήμερο τον οδηγό για την κατάσταση της οδήγησής του. Τέλος, το AU είναι μια συσκευή που βρίσκεται στην πλευρά του οδηγού όπου αξιοποιεί τις εφαρμογές που δίνει ο πάροχος στον εκάστοτε χρήστη. Δύναται να θεωρηθεί ως μια συσκευή για αφοσιωμένες εργασίες όπως είναι ένας προσωπικός βοηθός ο οποίος έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο. Αξίζει να αναφερθεί πως συνδέεται με το OBU, που βρίσκεται επίσης μέσα στο όχημα, είτε με ασύρματο είτε με ενσύρματο τρόπο. Η διασυνδεσιμότητα μεταξύ των οχημάτων ονομάζεται Όχημα προς Όχημα επικοινωνία (Vehicle to Vehicle, V2V), ενώ η επικοινωνία του οχήματος με τα RSUs ονομάζεται Όχημα προς RSU (Vehicle to RSU, V2R). Επιπρόσθετα, το όχημα δύναται να επικοινωνήσει με σταθμούς βάσης του δικτύου και κατά συνέπεια με την υπόλοιπη υποδομή προσφέροντας την επικοινωνία Όχημα προς Υποδομή (Vehicle to Infrastructure, V2I) [8][9].

Τα οφέλη της χρήσης των VANETs ποικίλλουν. Αρχικά, δύναται να υποστηρίξουν οχήματα υψηλής κινητικότητας προσφέροντας υπηρεσίες τόσο στο όχημα με τη χρήση του AU όσο και με την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των οχημάτων μέτριας ή και χαμηλής κινητικότητας. Παράλληλα, τα συγκεκριμένα δίκτυα καλούνται να προβλέπουν με συνέπεια τη μελλοντική θέση των οχημάτων λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα, την επιτάχυνση και την κατεύθυνση του οχήματος ώστε να είναι βελτιστοποιημένη η επικοινωνία με τις υπόλοιπες οντότητες. Επιπλέον, η τοπολογία δεν παραμένει σταθερή όσο τα οχήματα κινούνται, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς με στόχο να ικανοποιήσει την βέλτιστη κατανομή των πόρων ανά όχημα. Ταυτόχρονα, λαμβάνει χώρα και η βελτιστοποιημένη Ποιότητα Υπηρεσιών που εκχωρείται στο εκάστοτε όχημα ανάλογα με το σύμβολο του χρήστη παρέχοντας πολυμεσικό περιεχόμενο και υπηρεσίες βίντεο. Προφανώς, εσφαλμένα δύναται να θεωρηθεί ότι η χρήση τέτοιων τεχνολογιών απαιτεί τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Όμως, τα RSUs θεωρούνται σένσορες που καταναλώνουν ελάχιστα ποσά ενέργειας για την ομαλή λειτουργία τους ενώ οι συσκευές που βρίσκονται στο όχημα δεν επιβαρύνουν την κατανάλωση ενέργειας του οχήματος. Τέλος, επειδή τα οχήματα καθημερινά αυξάνονται σε πλήθος θεωρείται κρίσιμη η ταυτόχρονη αύξηση των OBUs, RSUs και AUs για την ομαλή κάλυψη ενός πυκνού δικτύου. Παρ' όλα αυτά εμφανίζονται αρκετοί περιορισμοί για την επίτευξη του στόχου των VANETs. Αρχικά, εμφανίζονται περιορισμοί στο εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται στο εκάστοτε δυναμικό δίκτυο που δημιουργείται με αποτέλεσμα την μη παράδοση ικανοποιητικών υπηρεσιών. Παράλληλα, εμφανίζονται φαινόμενα σύνδεσης και αποσύνδεσης των συσκευών του οχήματος με τα RSUs και με το υπόλοιπο δίκτυο όπως είναι οι σταθμοί βάσης και τα ασύρματα σημεία πρόσβασης. Εκτός από το περιορισμένο εύρος ζώνης, εμφανίζονται προβλήματα εξασθένισης του σήματος καθώς και ομοδιαυλικών παρεμβολών. Τα συγκεκριμένα προβλήματα εμποδίζουν την επικοινωνία των οχημάτων μεταξύ τους και με τα σημεία πρόσβασης καθιστώντας μη επιτρεπτή την ομαλή ανταλλαγή μηνυμάτων γνωστοποίησης οχήματος ή κατάστασης του δρόμου [10][14].

Ο τομέας της ασφάλειας διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στα οχηματικά δίκτυα. Ένα ασφαλές περιβάλλον που περιλαμβάνει οχήματα, φανάρια και τερματικές συσκευές ή σένσορες καλείται να λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει ένα περιβάλλον ακεραιότητας στον οδηγό. Η ακεραιότητα διαβεβαιώνει ότι τα μηνύματα δεν μεταβάλλονται όταν φτάνουν στον παραλήπτη

αλλά παραμένουν σταθερά. Αυτό το χαρακτηριστικό εμποδίζει την δημιουργία μηνυμάτων αγνώστου προέλευσης, την καταστροφή ή την αλλαγή του περιεχομένου των μηνυμάτων. Επιπλέον, η αξιοπιστία κρίνεται απαραίτητη έτσι ώστε το εμφολευμένο μήνυμα να έχει ένα συγκεκριμένο παραλήπτη που μόνο αυτός μπορεί να διαβάσει το περιεχόμενό του. Αντίστοιχα, οι οδηγοί δεν μπορούν να αρνηθούν την επιτυχημένη λήψη ή αποστολή ενός μηνύματος μέσα στα πλαίσια του συγκεκριμένου δικτύου διότι αυτές οι ανταλλαγές καθιστούν επιτυχημένη τη λειτουργία των VANETs. Τέλος, η αυθεντικοποίηση είναι ένα μείζων θέμα στα οχηματικά δίκτυα. Στα VANETs, έχοντας συγκεκριμένες πληροφορίες, όπως το αναγνωριστικό και η θέση του αποστολέα μηνυμάτων, είναι πολύ σπουδαίος ο έλεγχος ταυτότητας όλων των χρηστών και τα μηνύματα που μεταδίδονται μέσω του δικτύου είναι επίσης απαραίτητα. Ο έλεγχος ταυτότητας είναι ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό ασφαλείας λόγω της υποστήριξης ορισμένων χαρακτηριστικών ασφαλείας. Ορισμένα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την ακύρωση κόμβων κακόβουλης συμπεριφοράς είναι η διασφάλιση της σωστής διάγνωσης της ταυτότητας των κόμβων. Εάν ο έλεγχος ταυτότητας έχει εφαρμοστεί σωστά, τότε μειώνονται οι συνέπειες ορισμένων σοβαρών επιθέσεων. Για παράδειγμα, η επίθεση Sybil, στην οποία ένας παράνομος κόμβος αξιώνει πολλαπλές ταυτόχρονες ταυτότητες. Η ικανότητα ανίχνευσης ταυτότητας οχημάτων, αποτελεσματικότητας, απορρήτου, θορύβου, επεκτασιμότητας, διαθεσιμότητας, ελέγχου πρόσβασης κ.λπ. είναι άλλες απαιτήσεις ασφαλείας. Λόγω των παραπάνω απαιτήσεων και ανησυχιών όπως η προστασία, η αξιοπιστία, το απόρρητο και η εμπιστευτικότητα, η ασφάλεια των μηνυμάτων και των ειδοποιήσεων αποτελεί σημαντικό ζήτημα και υπάρχει ανάγκη για ασφαλείς μεθόδους για τη διατήρηση της εμπιστοσύνης. Μια αξιόπιστη επικοινωνία καλείται γενικά να έχει δύο δυνατότητες: Ο αποστολέας του μηνύματος να γίνει τελικά αποδεκτός ως αξιόπιστη πηγή και να μην χειρίζεται το μήνυμα κατά τη μετάδοσή του. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επικύρωση μηνυμάτων και κόμβων είναι μία από τις απαιτήσεις ασφαλείας κατά τη διερεύνηση της αξιοπιστίας μιας επικοινωνίας [8][9][10].

### 2.2.2 Συσταδοποίηση (Clustering)

Η συσταδοποίηση σε οχηματικά δίκτυα ειδικού σκοπού χρησιμοποιείται στην επίλυση προβλημάτων δρομολόγησης, ποιότητας υπηρεσιών κλπ. Οι υπάρχοντες αλγόριθμοι από τα κινητά δίκτυα ειδικού σκοπού (Mobile Ad Hoc Networks. MANET) δεν δύναται να λύσουν τα προβλήματα κινητικότητας που προκύπτουν από τα περίπλοκα και υψηλής ταχύτητας VANETs. Άρα, κρίνεται απαραίτητη η αναβάθμιση των υπάρχοντων αλγορίθμων και υποδομών για την υποστήριξη και την ομαδοποίηση των οχημάτων αντί των κινητών συσκευών. Εξαιτίας της πολύπλοκης φύσης των VANETs, το χρονικό διάστημα δημιουργία και συντήρηση των συστάδων, προστίθεται επιπλέον overhead στο εκάστοτε δίκτυο [10][13].

Μια δομή που αποτελείται από συστάδες περιέχει εικονικές ομάδες που ονομάζονται συστάδες. Τα μέλη της εκάστοτε συστάδας μοιράζονται κάποια κοινά χαρακτηριστικά όπως είναι η ταχύτητα, η κατεύθυνση, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, η ποιότητα υπηρεσιών κλπ. Τα κύρια συστατικά μιας συστάδας είναι ο Cluster Head (CH), το Gateway και το Cluster Member (CM). Γενικά, υπάρχει ένας κόμβος για κάθε συστάδα, ο CH, ο οποίος παρέχει υπηρεσίες διαχείρισης όπως είναι η πρόσβαση στο μέσο, η δρομολόγηση των πακέτων και των μηνυμάτων, εύρεση βέλτιστης διαδρομής για πακέτα μακρινών αποστάσεων, εκχώρηση εύρους ζώνης και μετάδοση πακέτων μέσα στο cluster. Αυτός ο κόμβος συνδέεται απευθείας με τους υπόλοιπους CH κόμβους του δικτύου και με τη χρήση gateways. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να μιλά απευθείας με τους απλούς κόμβους της ίδια συστάδας αντλώντας και παρέχοντας πληροφορίες για αυτή. Ακόμα, η δεύτερη οντότητα μιας συστάδας, το Gateway χρησιμοποιείται ως ένα καταναμεμένο ή κοινό σημείο μεταξύ των δύο CH για την απευθείας επικοινωνίας τους. Τέλος, το CM, είναι το απλό μέλος μιας συστάδας που δεν υλοποιεί ούτε το ρόλο του CH ούτε του Gateway [11][12][14].

## Κεφάλαιο 3



### 3.1 Εισαγωγή στη Διαπομπή

Με τον όρο διαπομπή (handover) ονομάζουμε την διαδικασία με την οποία το τερματικό μεταβαίνει από το τωρινό σημείο εξυπηρέτησης σε ένα καινούριο, χωρίς να διακοπούν οι παρεχόμενες υπηρεσίες. Η διαπομπή εξασφαλίζει την κινητικότητα στον χρήστη ανεξάρτητα από την γεωγραφική θέση και την κινητικότητα του. Μπορούμε να διακρίνουμε δύο είδη διαπομπής: την οριζόντια και την κάθετη. Η οριζόντια διαπομπή περιλαμβάνει την εναλλαγή σταθμών βάσης μεταξύ ίδιου τύπου δικτύων και η κάθετη μεταξύ διαφορετικού τύπου δικτύων. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε την διαπομπή και ανάλογα με το πότε συμβαίνει. Υπάρχει η ήπια διαπομπή (soft ή connect before break) όπου τα κανάλια δεσμεύονται και αποδεσμεύονται με τέτοιο τρόπο ώστε πάντα να διατηρείται τουλάχιστον ένα. Στην ήπια διαπομπή παρατηρούνται λιγότερα φαινόμενα «ring rong» αλλά δεσμεύονται περισσότερα κανάλια. Παράλληλα, η παρεμβολές αυξάνονται διότι πολλοί σταθμοί βάσης μεταδίδουν δεδομένα που χρειάζονται να μεταδοθούν από έναν. Αντίστοιχα στην σκληρή διαπομπή (hard ή break before connect) όλα τα τωρινά κανάλια εγκαταλείπονται από το τερματικό πριν συμβεί η εγκαθίδρυση με το υποψήφιο κανάλι. Σε αυτή την μορφή διαπομπής, κάθε χρονική στιγμή το τερματικό μεταδίδει μόνο σε ένα κανάλι και η κλήση διακόπτεται για ένα απειροελάχιστο χρονικό διάστημα. Στο LTE, ως επί το πλείστον αυτός ο τύπος διαπομπής εφαρμόζεται με επιτυχία. Επιπλέον οι αποφάσεις για την διαπομπή λαμβάνονται με διαφορετικούς τρόπους. Είναι δυνατό το δίκτυο να λαμβάνει μόνο του τις αποφάσεις (network-controlled handoff) ή το τερματικό να συλλέγει μετρήσεις τις οποίες χρησιμοποιεί το δίκτυο για να λάβει την τελική απόφαση (mobile-assisted). Τέλος μπορεί το τερματικό μόνο, να κρίνει εάν είναι απαραίτητη μια διαπομπή (mobile-controlled). Για την ομαλή κινητικότητα του χρήστη μέσα στο κυψελοειδές δίκτυο είναι απαραίτητο το δίκτυο να προβλέπει τις διαπομπές, να εφαρμόζεται γρήγορη και συνεχής διαπομπή και τέλος να μειωθεί το φαινόμενο του ring rong. Στα δίκτυα 4<sup>ης</sup> και τα επερχόμενα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς αξιοποιείται η μικροκυβελική δομή και άλλες υβριδικές δομές για την υποστήριξη της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης για παροχή δεδομένων με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο. Σε τέτοιες δομές παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της γωνίας του δρόμου που έχει άμεση σχέση με την διαδικασία της διαπομπής. Ως αποτέλεσμα, διαπιστώνεται πτώση της ισχύος του σήματος και λαμβάνει χώρα όταν το τερματικό στρίβει στην γωνία του δρόμου και χάνει την οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης που είναι συνδεδεμένο. Η διαπομπή χωρίζεται σε διαπομπή οπτικής επαφής και σε διαπομπή μη οπτικής επαφής. Κατά την διαπομπή μη οπτικής επαφής η λαμβανόμενη ισχύς από το τερματικό εξασθενεί απότομα λόγω της απώλειας της οπτικής επαφής με τον σταθμό βάσης [1][15].

Για να πραγματοποιηθούν με επιτυχία οι παραπάνω στόχοι πρέπει να εφαρμοστούν αλγόριθμοι που λαμβάνουν αποφάσεις με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους και κριτήρια. Η πιο διαδεδομένη παράμετρος που χρησιμοποιείται είναι το RSS (Received signal strength). Μπορεί εύκολα να μετρηθεί από την ζεύξη καθόδου και σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα της υπηρεσίας. Το σήμα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό ώστε να διατηρείται η ποιότητα αυτού από την πλευρά του τερματικού. Το RSS είναι απαραίτητο να βρίσκεται πάντα πάνω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι που ορίζει το δίκτυο. Η πλειοψηφία των αλγόριθμων που θα παρουσιαστούν βασίζονται στο RSS. Άλλη παράμετρος που αξίζει να αναφερθεί είναι ο χρόνος παραμονής στο δίκτυο (network connection time). Αναφέρεται στον χρόνο που ξοδεύει ο χρήστης στο σημείο εξυπηρέτησης. Η μέτρηση αυτού του χρόνου δίνει το έναυσμα για την αρχικοποίηση της διαπομπής στο κατάλληλο χρονικό σημείο. Για παράδειγμα μία διαπομπή με μικρό χρόνο παραμονής, οδηγεί σε σπατάλη των πόρων του δικτύου και πολύ πιθανό σε μια αποτυχημένη διαπομπή. Ακόμα, το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι το μέτρο των διαθέσιμων πόρων επικοινωνίας δεδομένων που εκφράζεται σε bit/s. Είναι ένας δείκτης που αντικατοπτρίζει την κίνηση του δικτύου πρόσβασης και είναι απαραίτητος για εφαρμογές ευαίσθητες σε καθυστέρηση. Το τερματικό δεν έχει απεριόριστη μπαταρία και οι διαδικασίες διαπομπής καταναλώνουν ενέργεια. Ειδικά αν το τερματικό ολοκληρώσει μια αποτυχημένη διαπομπή και μείνει εκτός δικτύου, καταναλώνει περισσότερη ενέργεια για να εκκινήσει την διαδικασία από την αρχή. Επιπλέον διαφορετικοί τύποι δικτύων έχουν διαφορετικές πολιτικές χρέωσης. Σε πολλές περιπτώσεις είναι χρήσιμο ο αλγόριθμος να λάβει υπόψη το κόστος των παρεχόμενων υπηρεσιών. Αξίζει να αναφερθεί και ο τομέας της ασφάλειας. Για πολλές υπηρεσίες και εφαρμογές η ακεραιότητα, η εμπιστευτικότητα και η διαθεσιμότητα των δεδομένων έχουν αξιοσημείωτη σημασία. Άρα, είναι πολύ πιθανό ένας αλγόριθμος να επιλέξει ένα δίκτυο με ισχυρότερα μέτρα για πρόληψη, ανίχνευση και

αποκατάσταση κινδύνων. Επιπρόσθετα, η κατανάλωση ενέργειας είναι μια μετρική που επηρεάζει την διαδικασία της διαπομπής. Η διαδικασία αυτή δύναται να προκαλέσει σημαντική κατανάλωση ενέργειας. Άρα, η μη απρόσκοπτη χρήση ενέργειας από το τερματικό καλείται να ληφθεί υπόψη σε ένα αλγόριθμο κάθετης διαπομπής. Τέλος αφού πραγματευόμαστε την κινητικότητα του χρήστη, η ταχύτητα του μέσα στις κυψέλες ή σε τομείς κυψελών είναι μια θεμελιώδης παράμετρος για οποιοδήποτε αλγόριθμο αρχικοποίησης. Εξαιτίας της αρχιτεκτονικής των ετερογενών δικτύων, η πραγματοποίηση διαπομπής σε ένα δίκτυο με μικρή ακτίνα κάλυψης, έχοντας σημαντική ταχύτητα, αποθαρρύνεται διότι η διαπομπή πίσω στο αρχικό δίκτυο είναι πολύ πιθανό να συμβεί [15].

## 3.2 Πρωτόκολλα Διαπομπής

### 3.2.1 Mobile IPv4

Το πρωτόκολλο Mobile IPv4 (MIPv4) θεωρεί πως η διεύθυνση IP ενός κόμβου που είναι συνδεδεμένος στο διαδίκτυο είναι μοναδική. Άρα, ο κόμβος χρειάζεται να βρίσκει στο δίκτυο που χαρακτηρίζεται από τη συγκεκριμένη διεύθυνση έτσι ώστε να λάβει τα πακέτα που προορίζονται για εκείνον. Σε αντίθετη περίπτωση, τα πακέτα δεν φτάνουν στον προορισμό τους. Η συνεχής λήψη των πακέτων όσο ένας κόμβος αλλάζει το σημείο πρόσβασης στο διαδίκτυο και τελικά βρίσκεται σε ένα νέο δίκτυο, προϋποθέτει ότι είτε ο κόμβος αλλάζει συνέχεια διεύθυνση όταν αλλάζει σημείο πρόσβασης είτε υπάρχουν συγκεκριμένες διαδρομές στο διαδίκτυο που γίνονται γνωστές στον εκάστοτε κόμβο για αποστολή και λήψη πακέτων. Οι τεχνικές που αναφέρθηκαν παρουσιάζουν προβλήματα τόσο στη διατήρηση της επικοινωνίας όσο και στην επεκτασιμότητα τους. Ο μηχανισμός που εξασφαλίζει τη κινητικότητα του τερματικού είναι το MIPv4. Στόχος του πρωτοκόλλου είναι οι κόμβοι να επικοινωνούν μεταξύ τους αφού αλλάξουν το επίπεδο ζεύξης στο σημείο πρόσβασης στο διαδίκτυο χωρίς να εκχωρηθεί διαφορετική IP διεύθυνση. Παράλληλα, εξασφαλίζεται η ποιότητα του καναλιού διατηρώντας τα μηνύματα που ανταλλάσσονται όσο το δυνατό μικρότερα, διότι πολλές φορές το μέσο διάδοσης είναι ο αέρας [16].

Οι οντότητες που καθιστούν λειτουργικό το MIP είναι ο Mobile Node (MN), ο Home Agent (HA), και ο Foreign Agent (FA). Ο MN είναι ένας κόμβος ή ένας δρομολογητής που αλλάζει το σημείο πρόσβασής του από ένα δίκτυο ή υπό-δίκτυο σε ένα άλλο. Ο MN έχει τη δυνατότητα να αλλάξει την τοποθεσία διατηρώντας σταθερή την IP διεύθυνση του ώστε να επικοινωνεί με τους υπόλοιπους κόμβους του διαδικτύου. Ο HA είναι ένας δρομολογητής στο οικείο δίκτυο του τερματικού που του μεταφέρει τα πακέτα μέσω tunneling όταν βρίσκεται μακριά από αυτό. Επιπλέον, καταγράφει την υπάρχουσα θέση του τερματικού την εκάστοτε χρονική στιγμή. Τέλος, ο FA είναι εξίσου ένας δρομολογητής που βρίσκεται τοποθετημένος στο δίκτυο που επισκέπτεται το τερματικό κατά τη μετακίνησή του. Ο FA λαμβάνει τα πακέτα από το tunneling του HA και τα δρομολογεί στο τερματικό. Όταν τα πακέτα στέλνονται από το τερματικό, δηλαδή είναι δεδομένα άνω ζεύξης (uplink), τότε ο FA λειτουργεί ως εξυπηρετητής. Γενικά, ο εκάστοτε κόμβος αποκτά μια μακροπρόθεσμη IP διεύθυνση από το οικείο του δίκτυο για την πλοήγηση στο διαδίκτυο. Όταν το τερματικό βρίσκεται μακριά από το οικείο του δίκτυο, μια διεύθυνση Care of Address ανατίθεται σε αυτό όπου δείχνει τη νέα θέση του τερματικού. Η διεύθυνση αυτή είναι το σημείο τερματισμού του tunneling που δημιουργεί ο HA για την αποστολή των δεδομένων όταν το τερματικό βρίσκεται μακριά από το οικείο του δίκτυο [16].

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο υποστηρίζει τις υπηρεσίες των Agent Discovery, Registration και Silently Discard. Η υπηρεσία Agent Discovery σχετίζεται άμεσα με τους HA και FA. Όταν είναι διαθέσιμοι, το γνωστοποιούν στο δίκτυο για τις δυνατότητες που δύναται να παρέχουν. Ένας νέος κόμβος που καταφθάνει στο εκάστοτε δίκτυο στέλνει ένα μήνυμα (solicitation) στο κανάλι για να ενημερωθεί για τη διαθεσιμότητα των HA και FA και κατά πόσο μπορούν να τον εξυπηρετήσουν. Επιπρόσθετα, η υπηρεσία Registration σχετίζεται με την αντιστοίχιση μιας Care of Address με το HA. Όσον αφορά τη μέθοδο προσάρτησης, ο κόμβος εγγράφεται είτε στον HA είτε μέσω ενός FA που δρομολογεί τα πακέτα απευθείας στον HA. Τέλος, η υπηρεσία Silently Discard σχετίζεται με την καταγραφή των σφαλμάτων που προκύπτουν και την άμεση εγγραφή τους σε αρχείο.

Αναλυτικότερα, εκτελείται ένα σύνολο βημάτων για την παροχή υπηρεσιών και εγκαθίδρυση της κινητικότητας από το πρωτόκολλο MIP. Αρχικά, οι πράκτορες κινητικότητας δηλαδή οι HA και FA, γνωστοποιούν την παρουσία τους μέσω Agent Advertisement μηνυμάτων. Ένας MN

απαντά προαιρετικά με το αντίστοιχο μήνυμα για την επιλογή κάποιων εκ των παραπάνω πρακτόρων. Όταν ο MN λάβει τα μηνύματα Agent Advertisement τότε αποφασίζει αν βρίσκεται στο οικείο του δίκτυο ή σε ένα ξένο δίκτυο. Αν αντιληφθεί πως βρίσκεται στο οικείο του δίκτυο τότε δεν πραγματοποιείται κάποια περαιτέρω ενέργεια. Αντίθετα, αν επιστρέφει στο οικείο του δίκτυο τότε πραγματοποιεί μια διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων διαγράψης με τα Registration Request και Reply αντίστοιχα. Αν ο MN καταλάβει πως έχει μετακινηθεί σε ένα ξένο δίκτυο τότε αυτόματα αποκτά μια διεύθυνση Care of Address σε αυτό. Η συγκεκριμένη διεύθυνση δύναται να προσδιοριστεί από τις γνωστοποιήσεις του FA (foreign Care of Address) είτε από εξωτερικούς μηχανισμούς ανάθεσης όπως το DHCP (co-located care of address). Πλέον, ο MN λειτουργεί μακριά από το οικείο του δίκτυο και συνδέει τη νέα διεύθυνση που του έχει ανατεθεί με το HA μέσω των μηνυμάτων Registration Request και Reply αντίστοιχα. Όμως, αυτή η ανταλλαγή πραγματοποιείται μέσω του FA. Η επικοινωνία καθίσταται δυνατή μέσω των πακέτων που αντί να καταφθάνουν στο οικείο δίκτυο του τερματικού, διακόπτονται από τον HA και γίνεται tunneling αυτών στην Care of Address, λαμβάνονται στο τελικό σημείο και αποστέλλονται στον MN. Αντίστοιχα, τα δεδομένα που αποστέλλει ο MN συχνά φτάνουν στον προορισμό τους χρησιμοποιώντας την κλασική IP δρομολόγηση, χωρίς απαραίτητα τη συμμετοχή του HA [16].

Ένα απλό σενάριο λειτουργίας ξεκινά με έναν ξένο κόμβο του διαδικτύου να στέλνει πακέτα στο οικείο δίκτυο του MN. Αν ο τερματικός κόμβος δεν έχει αλλάξει σημείο πρόσβασης και παραμένει ακίνητος στην ίδια τοποθεσία, τότε επικοινωνεί απευθείας με το ξένο κόμβο του δικτύου. Αν ο κόμβος μετακινηθεί και κάνει προσάρτηση σε ένα νέο σημείο πρόσβασης, τότε ο HA λαμβάνει τα πακέτα και τα προωθεί μέσω tunneling στην διεύθυνση Care of Address. Έπειτα, ο FA λαμβάνει τα πακέτα από το τερματικό σημείο του tunnel και τα παραδίδει τελικά στο MN. Τέλος, ο MN στέλνει τα πακέτα του προς τον ξένο κόμβο μέσω του FA [16].

### 3.2.2 Mobile IPv6

Το πρωτόκολλο Mobile IPv6 θεωρείται μια μεταγενέστερη έκδοση του Mobile IPv4. Παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στις δυνατότητες αποστολής των πακέτων ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζονται ικανοποιητικότεροι μηχανισμοί ασφάλειας. Αρχικά, παρέχονται εκτεταμένες δυνατότητες διευθυνσιοδότησης. Το IPv6 αυξάνει την διεύθυνση IP από 32 σε 128 bits, για την υποστήριξη περισσότερων επιπέδων ιεραρχίας, μεγαλύτερο αριθμό κόμβων και απλούστευση στην διαχείριση των διευθύνσεων από τον ίδιο τον κόμβο. Επιπρόσθετα, η επεκτασιμότητα της δρομολόγησης από πολλούς κόμβους σε πολλούς κόμβους βελτιώνεται αισθητά με την προσθήκη ενός πεδίου με όνομα εύρος σε αυτές τις διευθύνσεις πολλαπλής διανομής. Το νέο αυτό πεδίο εισάγει την έννοια της anycast διεύθυνσης που χρησιμοποιείται για την αποστολή πακέτων σε οποιαδήποτε κόμβο από ένα πολύ συγκεκριμένο σύνολο αυτών. Παράλληλα, παρέχονται αλλαγές στις κεφαλίδες των πακέτων που αποστέλλονται μεταξύ των κόμβων. Πολλά πεδία από το IPv4 είτε έχουν αφαιρεθεί είτε πλέον θεωρούνται προαιρετικά. Κατά συνέπεια, μειώνεται το κόστος αποστολής και επεξεργασίας των πακέτων με την εξοικονόμηση του εύρους ζώνης. Η εξέλιξη του IPv4 σε IPv6 εξασφαλίζει μεγαλύτερη υποστήριξη σε επεκτάσεις και αλλαγές. Ως αποτέλεσμα, επιτρέπονται μεταβολές στον τρόπο κωδικοποίησης της κεφαλίδας που επιτρέπουν την προώθηση, ελαστικότερα όρια στο μήκος των επιλογών της κεφαλίδας IP και μεγαλύτερη ευελιξία για την προσθήκη νέων μελλοντικών επιλογών. Ακόμα, δίνεται η δυνατότητα επισήμανσης της εκάστοτε ροής δεδομένων. Ο αποστολέας έχει πλέον τη δυνατότητα να ζητά την αντιμετώπιση των πακέτων που στέλνει ως μια απλή ροή με την επισήμανση των ακολουθιών των πακέτων. Τέλος, οι οντότητες που λαμβάνουν χώρα στη διαχείριση κινητικότητας δεν εμφανίζουν καμία διαφορά από το πρωτόκολλο IPv4 [17].

Αξίζει να σημειωθεί πως οι διαφορές στην ασφάλεια δηλαδή στην ακεραιότητα, εμπιστευτικότητα και διαθεσιμότητα των δεδομένων σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση είναι σημαντική. Γενικά, εμφανίζονται διάφορα προβλήματα κατά την κίνηση των πακέτων μέσα σε ένα δίκτυο. Αρχικά, εξωτερικά στοιχεία της εκάστοτε διαδρομής έχουν ανά πάσα στιγμή άμεση γνώση για την κεφαλίδα και το περιεχόμενο του πακέτου. Η συγκεκριμένη πληροφορία δίνει τη δυνατότητα σε κακόβουλους χρήστες να εισάγουν νέα πακέτα στην κίνηση των δεδομένων, να διαγράψουν πακέτα ή ακόμα και να μεταβάλλουν το περιεχόμενό τους. Η αντιμετώπιση των παραπάνω ευπαθειών αντιμετωπίζεται από την αρχιτεκτονική ασφάλειας του IP ενώ πρωτόκολλα

υψηλότερων επιπέδων όπως το Transport Layer Security (TLS) ή το Secure Shell (SSH) προστατεύουν το επίπεδο εφαρμογής [17].

### 3.2.3 Fast Mobile IPv6

Το πρωτόκολλο Fast Mobile IPv6 FMIPv6 έχει σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την ανίχνευση κίνησης στο IP στρώμα, την διαμόρφωση του Care of Address (CoA) και του Binding Update (BU) που εμφανίζονται στο MIPv6. Εκμεταλλεύεται διάφορα εναύσματα L2 για να προετοιμάσει ένα νέο CoA στο νέο Access Router (AR) εκ των προτέρων όσο είναι συνδεδεμένο στο παλιό AR. Με την λήψη ενός εναύσματος L2, το πρωτόκολλο αρχίζει να περιμένει ή να προετοιμάζεται για την επικείμενη διαπομπή. Υποθέτει ότι το παλιό AR έχει διαμορφωθεί με ένα πίνακα που αποτελείται από τις δικές του MAC διευθύνσεις και των γειτονικών του Point of Attachments (PoAs) αλλά και από τα αντίστοιχα προθέματα υπό-δικτύου των γειτονικών ARs. Κατά την φάση αναμονής, το παλιό AR συμβάλλει στην δημιουργία του νέου CoA με την επίλυση των προθεμάτων του υπό-δικτύου όπως αναφέρει ο σχετικός πίνακας και του L2 αναγνωριστικού που προέρχεται από το τερματικό. Το FMIPv6 χαρακτηρίζεται από τρία μηνύματα σηματοδότησης που λαμβάνουν χώρα στη φάση της αναμονής: το Router Solicitation for Proxy Advertisement (RtSolPr), το Proxy Router Advertisement (PrRtAdv) και το Fast Binding Update (FBU). Τα μηνύματα που αναφέρθηκαν χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της IP κινητικότητας και της διαμόρφωσης του νέου CoA. Μέσω των μηνυμάτων RtSolPr και PrRtAdv, το τερματικό αποκτά το νέο CoA όταν είναι συνδεδεμένο ακόμα με το παλιό AR. Ως αποτέλεσμα, εξαλείφεται η καθυστέρηση της ανακάλυψης του νέου προθέματος [17]. Το τερματικό θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει αμέσως την υποψήφια διεύθυνση μετά την σύνδεσή του με το νέο AR εφόσον λάβει ένα μήνυμα Fast Binding Acknowledgement (FBack) πριν από την μετακίνησή του στην νέα ζεύξη (Predictive Mode). Έτσι, μειώνεται η μακροχρόνια καθυστέρηση λόγω του BU. Σε περίπτωση που το τερματικό κινείται κατά την παραλαβή του FBack, το νέο CoA θα είναι προσβάσιμο μόνο κατά την αποστολή του μηνύματος Unsolicited Neighbor Advertisement (UNA) και FBU στο παλιό AR από την ζεύξη του νέου AR (Reactive Mode). Σε κάθε περίπτωση, το παλιό AR μέσω σήραγγας αρχίζει να λαμβάνει πακέτα που φτάνουν για από το παλιό CoA στο νέο CoA. Ένα τέτοιο τούνελ καθιερώνεται μέσω των μηνυμάτων Handover Initiate (HI) και Handover Acknowledgment. Επιπρόσθετα, αυτά τα μηνύματα δύναται να χρησιμοποιηθούν για παροχή ελέγχου πρόσβασης, Quality of Service, συμπίεση επικεφαλίδων κλπ [19].

Παρά όλα αυτά, ακόμα και με την χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου, υπάρχει ανάγκη για βελτίωση της καθυστέρησης και της απώλειας πακέτων λόγω της διαπομπής. Το FMIPv6 δεν παρέχει κανέναν μηχανισμό ανίχνευσης δικτύων πρόσβασης. Η ανακάλυψη των διαθέσιμων PoAs μέσω ενεργούς σάρωσης όλων των καναλιών που παρέχονται από τα γειτονικά δίκτυα απαιτεί αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, το οποίο συμβάλλει αισθητά στην συνολική καθυστέρηση της διαπομπής. Επιπλέον, το πρωτόκολλο αυτό χαρακτηρίζεται από κόστος αναμονής. Η L2 διαπομπή ενεργοποιείται λόγω υποβαθμισμένων συνθηκών σύνδεσης. Δεν παρέχεται καμία εγγύηση ότι το τερματικό θα παραμείνει συνδεδεμένο στο παλιό AR τόσο ώστε να λάβει και να στείλει όλα τα μηνύματα του πρωτοκόλλου FMIPv6. Όταν χρησιμοποιείται αναμονή, το τερματικό ενδέχεται να μην έχει αρκετό χρόνο να ενημερώσει το νέο AR μέσω του FBU. Κατά συνέπεια, αν αυτό έχει χάσει την σύνδεση του με το παλιό AR, τότε αναγκάζεται να λειτουργήσει σε reactive mode με την καθυστέρηση της διαπομπής να αυξάνεται [4]. Τέλος, εμφανίζεται το φαινόμενο ping-pong. Ο χρόνος που απαιτείται για την ανταλλαγή των μηνυμάτων RtSolPr, PrRtAdv and FBU είναι αρκετός ώστε να αυξήσει την αβεβαιότητα των κινήσεων του τερματικού. Για παράδειγμα, η διαπομπή μπορεί να λάβει μέρος νωρίτερα από ότι είχε αρχικά προβλεφθεί από το στρώμα σύνδεσης. Το όριο των αλληλοκαλυπτόμενων κυψελών μπορεί να μεταβληθεί δυναμικά λόγω των φυσικών αντικειμένων, που εμποδίζουν τα σήματα μεταξύ του AP και του τερματικού. Λόγω της δυναμικής φύσης των ασύρματων καναλιών, το τερματικό δεν μπορεί να κινηθεί στο αρχικό υποψήφιο PoA. Τελικά, υπάρχει πιθανότητα είτε να κινηθεί εκεί είτε να κινηθεί κάπου αλλού. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι το τερματικό θα πραγματοποιούσε ping pong μεταξύ των κυττάρων [19].

### 3.2.4 Proxy Mobile IPv6

Το πρωτόκολλο Proxy Mobile IPv6 προορίζεται για την παροχή υπηρεσιών διαχείρισης κινητικότητας σε ένα τερματικό, χωρίς να απαιτείται η συμμετοχή του σε οποιαδήποτε σηματοδότηση σχετικά με την κινητικότητα IP. Οι οντότητες κινητικότητας του δικτύου παρακολουθούν τις κινήσεις του τερματικού, ξεκινούν την σηματοδότηση της κινητικότητας και ρυθμίζουν τις απαιτούμενες καταστάσεις δρομολόγησης [18].

Οι κύριες οντότητες της υποδομής του PMIPv6 είναι το Local Mobility Anchor (LMA) και το Mobile Access Gateway (MAG). Το LMA είναι υπεύθυνο για την διατήρηση της προσβασιμότητας του τερματικού και είναι το σημείο αγκύρωσης όσον αφορά το πρόθεμα του οικιακού δικτύου του χρήστη. Το MAG είναι η οντότητα που εκτελεί τις διαδικασίες διαχείρισης κινητικότητας για ένα τερματικό και βρίσκεται στο σημείο πρόσβασης όπου είναι συνδεδεμένο αυτό. Επίσης, είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση των κινήσεων του τερματικού από και προς το σημείο πρόσβασης και για την έναρξη των διαδικασιών binding στο LMA. Δύναται να υπάρχουν πολλαπλά LMAs σε ένα τομέα PMIPv6 όπου ο καθένας εξυπηρετεί μια διαφορετική ομάδα κινητών κόμβων.

Όταν ένα τερματικό εισέρχεται σε ένα τομέα PMIPv6 και συνδέεται σε ένα σημείο πρόσβασης, το MAG αυτής της σύνδεσης, αφού το αναγνωρίσει και αποκτήσει στοιχεία για αυτό, θα αποφασίσει αν ο κινητός κόμβος είναι εξουσιοδοτημένος για την παροχή υπηρεσιών διαχείρισης κινητικότητας. Αν το δίκτυο αποφασίσει ότι ο κόμβος είναι εξουσιοδοτημένος για την υπηρεσία κινητικότητας βάση δικτύου, το δίκτυο θα διασφαλίσει ότι το τερματικό χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από τους μηχανισμούς διαμόρφωσης διευθύνσεων, θα είναι σε θέση να λάβει την διαμόρφωση διευθύνσεων στη συνδεδεμένη διεπαφή και να μετακινηθεί οπουδήποτε σε αυτό τον τομέα [5]. Το τερματικό μπορεί να είναι ένας IPv4 κόμβος, ένας IPv6 κόμβος ή ένας κόμβος διπλής κατεύθυνσης (IPv4, IPv6). Με βάση τις πληροφορίες του προφίλ πολιτικής, ο κινητός κόμβος καλείται να αποκτήσει μια IPv4, IPv6 ή μια διπλή διεύθυνση ώστε να κινείται ελεύθερα μέσα στον τομέα. Όμως, η συγκεκριμένη προδιαγραφή αναφέρεται μόνο σε IPv6 διευθύνσεις. Αν ο κινητός κόμβος συνδεθεί στον PMIPv6 τομέα μέσω πολλαπλών διεπαφών και δικτύων πολλαπλής πρόσβασης, το δίκτυο θα αποδώσει ένα μοναδικό σύνολο από προθέματα οικιακού δικτύου για κάθε μια από τις συνδεδεμένες διεπαφές. Το τερματικό καλείται να διαμορφώσει τις διευθύνσεις σε αυτές τις διεπαφές από το αντίστοιχο πρόθεμα του οικιακού δικτύου [18].

Κατά την διαπομπή, το τερματικό μεταφέρεται από το προηγούμενο MAG σε ένα νέο. Αφού λάβει την αρχική διαμόρφωση των διευθύνσεων στο PMIPv6, αν το τερματικό αλλάξει σημείο προσάρτησης (PoA), το MAG της προηγούμενης ζεύξης θα ανιχνεύσει την αποσύνδεση του από αυτό. Αμέσως, θα σηματοδοτήσει το LMA όπου θα αφαιρέσει την κατάσταση δέσμευσης (binding) και δρομολόγησης για το συγκεκριμένο τερματικό. Το LMA αφού λάβει αυτή την αίτηση, θα προσδιορίσει την αντίστοιχη σύνοδο κινητικότητας, η οποία ζητήθηκε, και δέχεται το αίτημα μετά από το οποίο περιμένει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για να επιτρέψει στο MAG να πραγματοποιήσει αναβάθμιση στο binding. Ωστόσο, αν δεν λάβει κανένα μήνυμα Proxy Binding Update (PBU) εντός του δεδομένου χρονικού διαστήματος, θα διαγράψει το cache της καταχώρησης. Το MAG στη νέα σύνδεση, αφού ανιχνεύσει το τερματικό προσαρτημένο σε δικό σημείο σύνδεσης, θα σηματοδοτήσει το LMA για να ενημερώσει την κατάσταση δέσμευσης. Μετά την ολοκλήρωση της σηματοδότησης, το τερματικό MAG θα αποστείλει ένα μήνυμα Router Advertisements το οποίο περιέχει τα προθέματα του οικιακού δικτύου και θα εξασφαλίσει ότι το τερματικό δεν θα ανιχνεύσει καμία αλλαγή σε σχέση με την προσάρτηση του L3 στο σημείο διεπαφής του [18].

Όμως, στο πρωτόκολλο PMIPv6 εμφανίζονται διάφορα προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπιστούν. Αρχικά, υπάρχουν ευπάθειες και τρωτά σημεία που μπορούν να βλάψουν το τερματικό. Κατά την εκτέλεση του, στο σημείο διεπαφής ανάμεσα στο LMA και το MAG για την εγκαθίδρυση, αναβάθμιση και αποκοπή διαδρομών, για τα δεδομένα των τερματικών, μπορεί να εμφανιστεί μια Man in the middle attack. Ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα δύναται να αλλοιωθούν, να χαθούν ή να δρομολογηθούν σε διαφορετικό προορισμό καθώς ο κακόβουλος χρήστης θα παρουσιαστεί ως το MAG ή το LMA. Επιπρόσθετα, εμφανίζονται προβλήματα στην αυθεντικοποίηση του τερματικού. Έτσι, ένας κακόβουλος χρήστης μπορεί να ξεγελάσει το MAG, υποδύοντας το τερματικό. Γενικά, δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αυθεντικοποιηθεί ένα τερματικό ή να βρεθεί ο AAA εξυπηρετητής του εύκολα. Οποιοσδήποτε κακόβουλος χρήστης μπορεί να παρουσιαστεί στο δίκτυο ως οποιαδήποτε οντότητα λαμβάνει χώρα στις διαδικασίες διαχείρισης κινητικότητας [18].

Ομαδική κάθετη διαπομπή με συσταδοποίηση σε οχηματικά δίκτυα ειδικού σκοπού

### 3.2.5 Fast Proxy Mobile IPv6

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το πρωτόκολλο PMIPv6 προσφέρει κινητικότητα μέσω IP για τους κόμβους που δεν υποστηρίζουν το πρωτόκολλο MIPv6 και τις λειτουργίες του. Γενικά, στο PMIPv6 ένας proxy πράκτορας που ανήκει στο δίκτυο πραγματοποιεί την διαχείριση κινητικότητας εκ μέρους του τερματικού ενώ παράλληλα εξασφαλίζει διαφάνεια για όλους του κόμβους σε ένα PMIPv6 τομέα. Όμως η καθυστέρηση και η απώλεια πακέτων δε διαφοροποιούνται σε κανένα βαθμό από το πρωτόκολλο MIPv6. Λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα δίνεται από το πρωτόκολλο FPMIPv6 που εξομαλύνει την καθυστέρηση λόγω διαπομπής επιτρέποντας στο εκάστοτε κόμβο να στείλει πακέτα όμως μόλις ανιχνευθεί η προσάρτηση του από το νέο σημείο πρόσβασης. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο περιέχει τις οντότητες που εγκαθιδρύονται για πρώτη φορά στο PMIPv6 ενώ παράλληλα συνδυάζει την σηματοδότηση και τα τούνελ ανταλλαγής πακέτων του FPMIPv6 [20].

Οι κύριες λειτουργικές οντότητες που επιτυγχάνουν τη διαχείριση της διαπομπής είναι εκ νέου το Local Mobility Anchor (LMA) και το Mobile Access Gateway (MAG). Το LMA λειτουργεί ως το σημείο αγκύρωσης για τα prefix του οικείου δικτύου του τερματικού ενώ αντίστοιχα το MAG ως το σημείο πρόσβασης (access router ή AR) και ως ο διαχειριστής της κινητικότητας του τερματικού. Επιπλέον, είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση των κινήσεων του τερματικού από και προς το σημείο πρόσβασης διατηρώντας δεσμούς (binding) με το LMA. Αν το MAG αντιληφθεί εγκαίρως την προσάρτηση ή αποσύνδεση του τερματικού από το σημείο πρόσβασης είναι δυνατό να βελτιώσει αισθητά τη διαδικασία της διαπομπής μέσα από τη σηματοδότηση για την εγκατάσταση του νέου καναλιού επικοινωνίας και την συνεννόηση μεταξύ των πρακτόρων. Ένας επιπλέον μηχανισμός που διευκολύνει την διαπομπή και τη διατήρηση της σύνδεσης είναι η εγκαθίδρυση ενός τούνελ διπλής κατεύθυνσης μεταξύ του προηγούμενου (previous MAG ή pMAG) και του νέου MAG (new MAG ή nMAG) του τερματικού για τη δρομολόγηση των πακέτων. Το τούνελ ενεργοποιείται με την αποστολή του μηνύματος Binding Proxy Update από το nMAG προς το LMA για τη δημιουργία ενός δεσμού μεταξύ των pMAG και nMAG, και την εγκαθίδρυση αυτού μέσω των μηνυμάτων Handover Initiate (HI) και Handover Acknowledgement (Hack). Με αυτά τα νέα μηνύματα ανταλλάσσονται πληροφορίες, που είναι ήδη γνωστές από το pMAG προς το nMAG, όπως το αναγνωριστικό πρόσβασης στο διαδίκτυο, η οικεία διεύθυνση IPv4 και το prefix του οικείου δικτύου. Παράλληλα, με την εισαγωγή νέων flags γίνεται επιτρεπτό η ενεργοποίηση ή η απενεργοποίηση του τούνελ. Όμως, αν και υπάρχουν ομοιότητες με προηγούμενα πρωτόκολλα, ο συγκεκριμένος τύπος διαπομπής δεν επιτρέπει στο τερματικό να ασχοληθεί με καμία διαδικασία της IP κινητικότητας που του προσφέρεται. Ως αποτέλεσμα, γνωστά μηνύματα σηματοδότησης όπως το Router Solicitation for Proxy Advertisement (RtSolPr), το Proxy Router Advertisement (PrRtAdv), Fast Binding Update (FBU), Fast Binding Acknowledgement και Unsolicited Neighbor Advertisement (UNA) δεν βρίσκουν καμία εφαρμογή πλέον [20].

Γενικά, υπάρχουν δύο κατηγορίες λειτουργίας του πρωτοκόλλου FPMIPv6. Σχετίζονται άμεσα με τη χρονική στιγμή σύνδεσης και αποσύνδεσης από το εκάστοτε MAG και την εγκαθίδρυση του τούνελ διπλής κατεύθυνσης για τη δρομολόγηση των πακέτων. Στην πρώτη κατηγορία, predictive mode, το τούνελ εγκαθίσταται πριν την προσάρτηση του τερματικού στο nMAG ενώ στη δεύτερη κατηγορία, reactive mode, το τούνελ εγκαθίσταται αφού το τερματικό έχει προσαρτηθεί στο nMAG. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικότερα η απώλεια πακέτων, ειδικότερα στο predictive mode, τα πακέτα της κάτω ζεύξης απαιτείται να γίνονται buffer είτε στο pMAG είτε στο nMAG, αναλόγως και τον τύπο της διαπομπής. Άρα, κρίνεται απαραίτητο όλα τα MAG που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία της διαπομπής να έχουν τον κατάλληλο χώρο για την προσωρινή αποθήκευση των πακέτων προς μετάδοση. Σε αντίθεση με άλλα πρωτόκολλα που το τερματικό εκτελεί διαδικασίες διαχείρισης κινητικότητας από μόνο του, στο FPMIPv6 καλείται να ενημερώνει το MAG μόνο με πληροφορίες χαμηλού επιπέδου. Οι πληροφορίες αυτές είναι ικανές να αρχικοποιήσουν τη διαπομπή [20].

Κατά το predictive mode, το τερματικό αντιλαμβάνεται πως η διαπομπή είναι αναπόφευκτη και ενημερώνει το προηγούμενο σημείο πρόσβασης με το αναγνωριστικό του (MN ID) και το αναγνωριστικό του νέου σημείου πρόσβασης (New AP ID) που είναι πιο πιθανό να επιλέξει. Έπειτα, το προηγούμενο σημείο πρόσβασης, με το οποίο το τερματικό είναι ακόμα συνδεδεμένο, υποδηλώνει τη διαπομπή στο PMAG μεταφέροντας το MN ID και το new AP ID. Όταν το PMAG

λάβει αυτά τα δεδομένα, εξάγει το nMAG στο οποίο ανήκει στο νέο σημείο πρόσβασης. Ως αποτέλεσμα, το rMAG στέλνει ένα μήνυμα Handover Initiate (HI) στο nMAG. Το μήνυμα αυτό περιλαμβάνει το 'P' flag ενεργό καθώς και το MN ID, Home Network Prefix(es) (HNP(s)), και τη διεύθυνση του LMA που εξυπηρετεί τον τερματικό κόμβο. Σε πολλές περιπτώσεις περιλαμβάνεται και το MN Link-local Address Interface Identifier (MN LLA-IID). Ως απάντηση, το nMAG στέλνει πίσω ως απάντηση ένα μήνυμα Handover Acknowledgement (Hack) με το 'P' flag εκ νέου ενεργό. Γενικά, είναι επιθυμητό το buffering ή η δρομολόγηση να πραγματοποιείται μετά την αποστολή του HI μηνύματος, αν και είναι πιθανό το nMAG να απαιτήσει αυτή τη διαδικασία σε αργότερο χρονικό διάστημα θέτοντας το αντίστοιχο flag στο μήνυμα Hack. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχει το 'F' flag, τότε ένα τούνελ διπλής κατεύθυνσης σχηματίζεται μεταξύ του rMAG και του nMAG. Έτσι, τα πακέτα που προορίζονται για το τερματικό, προωθούνται από το rMAG στο nMAG μέσω του τούνελ. Μετά την αποθυλάκωσή τους, δύναται να αποθηκευτούν προσωρινά στο nMAG. Αν ο συσχετισμός μεταξύ του nMAG και του νέου σημείου πρόσβασης έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία, τότε το δεύτερο είναι πλέον υπεύθυνο για τη δρομολόγηση των πακέτων. Όταν η διαπομπή θεωρηθεί έτοιμη από την πλευρά του δικτύου, τότε ξεκινάει η διαδικασία προσάρτησης στο νέο σημείο πρόσβασης. Κατά συνέπεια, το τερματικό αποκτά σύνδεση στο φυσικό επίπεδο με το νέο σημείο πρόσβασης που ωθεί την εγκαθίδρυση μια σύνδεσης στο επίπεδο ζεύξης μεταξύ του nMAG και πάλι του νέου σημείου πρόσβασης. Το nMAG προωθεί τα πακέτα που είχε αποθηκεύσει προσωρινά ενώ τα πακέτα άνω ζεύξης στέλνονται στο nMAG το οποίο τα προωθεί στη συνέχεια στο rMAG. Τελικά, τα πακέτα φτάνουν στο LMA που εξυπηρετεί το συγκεκριμένο τερματικό. Τέλος, το nMAG στέλνει ένα μήνυμα Proxy Binding Update (PBU) στο LMA το οποίο απαντά με ένα μήνυμα Proxy Binding Acknowledgement (PBA). Στο Binding Cache Entry (BCE) κατασκευάζεται ένα πίνακας με εγγραφές το MN-ID, το HNP, το MAG και τα flags, δεδομένα που ήδη έχουν ανταλλαχθεί μεταξύ των οντοτήτων και θεωρούνται πλέον σωστά. Από αυτό το σημείο και έπειτα, το τούνελ διπλής κατεύθυνσης εγκαταλείπεται και τα δεδομένα φτάνουν πλέον στον προορισμό χωρίς τη διαμεσολάβηση του rMAG, αλλά μόνο από το nMAG [20].

Στην περίπτωση του reactive mode, το τερματικό αποσυνδέεται από το προηγούμενο σημείο πρόσβασης και πραγματοποιεί διαπομπή στο νέο. Εφόσον πραγματοποιηθεί η προσάρτηση τότε γίνεται και η συσχέτιση αυτού του νέου σημείου πρόσβασης με το nMAG. Σε αυτό το σημείο το MN ID μεταφέρεται στο nMAG μαζί με το αναγνωριστικό του προηγούμενου σημείου πρόσβασης ώστε να προκύψει και η πληροφορία του rMAG. Ως αποτέλεσμα, το rMAG θεωρείται πλέον γνωστό με το nMAG να του αποστέλλει ένα μήνυμα HI. Μέσα σε αυτό το 'P' flag είναι ενεργό και περιλαμβάνεται το MN-ID. Έπειτα, το rMAG απαντά με ένα μήνυμα Hack πάλι με το 'P' flag ενεργό. Ταυτόχρονα, περιλαμβάνει το HNP(s), το MN LL-ID και το LMA στο οποίο ανήκει το τερματικό. Αν κάποιο από αυτά τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα, τότε το Hack μήνυμα επιστρέφει με την τιμή 131 [20]. Δεδομένου πως το 'F' flag έχει τοποθετηθεί στο HI μήνυμα, τότε εγκαθιδρύεται ένα τούνελ μεταξύ του rMAG και του nMAG για την προώθηση των πακέτων. Τα πακέτα κάτω ζεύξης προωθούνται από το rMAG στο nMAG και τελικά στέλνονται στο τερματικό ενώ τα πακέτα άνω ζεύξης στέλνονται από το nMAG στο rMAG. Τέλος, φτάνουν στο LMA που εξυπηρετεί το συγκεκριμένο τερματικό κόμβο. Τέλος, με την ανταλλαγή των μηνυμάτων PBU και PBA μεταξύ του nMAG και του LMA, ανανεώνεται το BCE σχετικά με το νέο MAG που εξυπηρετεί το τερματικό. Σε αυτό το σημείο το τούνελ διπλής κατεύθυνσης εγκαταλείπεται και τα πακέτα άνω και κάτω ζεύξης φτάνουν στον προορισμό τους χωρίς καμία ενδιάμεση στάση.

Ο τομέας της ασφάλειας εξασφαλίζει κοινούς μηχανισμούς με τα πρωτόκολλα PMIPv6 και FMIPv6. Οι οντότητες των MAG και LMA μοιράζονται μηχανισμούς ασφάλειας σε όλα τα παραπάνω πρωτόκολλα κινητικότητας. Τα μηνύματα HI και Hack που ανταλλάσσονται καλούνται να έχουν από άκρο προς άκρο προστασία προσφέροντας ακεραιότητα και αυθεντικοποίηση σε όλες τις πλευρές. Αντίστοιχα, ένα επίπεδο πάνω, οι οντότητες rMAG και nMAG κρίνεται απαραίτητο να εφαρμόζουν το πρωτόκολλο IPsec για την προστασία των μηνυμάτων που παράγουν. Η ενσωμάτωση του μηχανισμού Encapsulating Security Payload (ESP) σε λειτουργία μεταφοράς είναι υποχρεωτική για την προστασία της ακεραιότητας. Τέλος, αν μεταφέρονται ευαίσθητα προσωπικά δεδομένα τότε καλούνται να αναπτυχθούν μηχανισμοί εμπιστευτικότητας στο περιβάλλον του κινητού κόμβου [20].

Το FPMIPv6 είναι μια λύση που παρέχει ένα περιβάλλον γρήγορης διαπομπής και ορίζει μια σχετική μορφή μηνυμάτων σηματοδότησης για την βελτιστοποίηση της απόδοσης. Εντούτοις, εξακολουθεί και αυτό να παρουσιάζει προβλήματα. Αρχικά, χαρακτηρίζεται από έλλειψη

συμβάντων εκκίνησης της διαπομπής καθώς και από έλλειψη μιας λεπτομερούς διαδικασίας εντοπισμού υποψήφιων δικτύων και επιλογής που μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία της διαπομπής. Ακόμα, δεν εξασφαλίζεται μια σειρά από βήματα παράδοσης του ελέγχου στο νέο δίκτυο και διαδικασίες του επιπέδου ζεύξης. Τέλος, δεν υποστηρίζει ικανοποιητικά την κινητικότητα μεταξύ ετερογενών δικτύων. Ως αποτέλεσμα, αξιοποιείται ένας συνδυασμός του πρωτοκόλλου Media Independent Handover (MIH) με το FPMIPv6 για την επικάλυψη των παραπάνω κενών [21].

### 3.2.6 Media Independent Handover (MIH)

Η εγκαθίδρυση συσκευών που υποστηρίζουν μια πληθώρα ξεχωριστών ασύρματων τεχνολογιών του 3GPP και της οικογένειας των προτύπων 802.11 είναι πλέον πραγματικότητα. Ένα ετερογενές περιβάλλον που υποστηρίζει αυτές τις τεχνολογίες καλείται να υποστηρίξει ένα τρόπο επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης μεταξύ τους σε μια κοινή γλώσσα για όλες τις οντότητες. Παράλληλα, απαιτείται η κατάλληλη διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών σε ένα τέτοιο χώρο, αντιμετωπίζοντας προκλήσεις και περιορισμούς. Η επίλυση τέτοιων εμποδίων επιτυγχάνεται από το πρωτόκολλο IEEE 802.21 ή Media Independent Handover (MIH). Το πρωτόκολλο MIH παρέχει μηχανισμούς βελτίωσης της διαπομπής σε ετερογενή δίκτυα. Γενικά, ορίζει τα εργαλεία που κρίνονται απαραίτητα για την ανταλλαγή πληροφοριών, ενεργοποίησης συμβάντων και εντολές για την αρχικοποίηση και προετοιμασία της διαπομπής [21].

Ένας τρόπος να πραγματοποιηθεί διαπομπή μεταξύ μιας πληθώρας διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών είναι η δημιουργία επεκτάσεων για την κάθε μια. Για παράδειγμα, το δίκτυο x χρειάζεται επεκτασιμότητα για τη δια-λειτουργία με το δίκτυο y αλλά και με το δίκτυο z. Όμως, το δίκτυο y και το δίκτυο z χρειάζονται επεκτασιμότητα για να μιλήσουν μεταξύ τους ενώ ταυτόχρονα καλούνται να επικοινωνήσουν με το x. Με την ίδια λογική, χρειάζονται N x (N - 1) συγκεκριμένες επεκτάσεις για το εκάστοτε δίκτυο με αποτέλεσμα όλα να επικοινωνούν μεταξύ τους. Η περιπλοκότητα αυτού του προβλήματος ανάγεται σε  $N^2$  και δεν εφαρμόζεται ομαλά όσο ο αριθμός των ασύρματων τεχνολογιών αυξάνεται μαζί με τις αντίστοιχες επεκτάσεις τους. Παρ' όλα αυτά λύση στο πρόβλημα αυτό δίνεται από ένα πλαίσιο ανεξάρτητο των μέσων, το MIH μέσου του οποίου επιτυγχάνεται μια αποδοτικότερη και οικονομικότερη μέθοδος αντιμετώπισης των διαπομπών σε ετερογενή τοπολογίες. Αναλυτικότερα, παρέχεται μια κοινή πλατφόρμα που επιτρέπει στο εκάστοτε ασύρματο δίκτυο να απασχολεί μόνο μια επέκταση για την εξασφάλιση μιας κοινής γλώσσας επικοινωνίας με καθολική αποδοχή. Η πολυπλοκότητα του νέου αυτού προβλήματος είναι τάξης του N με κλιμακώνεται αποδοτικότερα σε σχέση με την περιγραφή του προηγούμενου προβλήματος με τάξη  $N^2$ . Το πρωτόκολλο MIH είναι μοναδικό στην οικογένεια των 802.11 προτύπων καθώς επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ IEEE 802.11 συστημάτων και IEEE 802.11 συστημάτων με συστήματα που δεν ανήκουν στην παραπάνω οικογένεια προτύπων όπως είναι τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών [21].

Το πρωτόκολλο MIH αποτελείται από ένα σύνολο οντοτήτων που βελτιώνουν την εμπειρία του χρήστη κατά την εκκίνηση διαπομπών είτε από το τερματικό (mobile- initiated) είτε από το εκάστοτε δίκτυο (network - initiated). Αρχικά, η MIH συνάρτηση (MIHF) παρέχει τρεις τύπους υπηρεσιών: το media independent event service (MIES) που ανιχνεύει αλλαγές στο επίπεδο ζεύξης και ενημερώνει για συμβάντα από τοπικές και απομακρυσμένες διεπαφές, το media independent information service (MIIS) που εξασφαλίζει πληροφορίες για τα γειτονικά δίκτυα και τα χαρακτηριστικά τους όπως τοποθεσία, ιδιότητες και υπηρεσίες, το media independent command service (MICS) παρέχει ένα γενικευμένο σύνολο εντολών για τοπικούς και απομακρυσμένους χρήστες MIH με σκοπό να ελέγχουν την κατάσταση της ζεύξης. Επιπρόσθετα, υπάρχουν τα service access points (SAPs) που περιγράφουν τις ανεξάρτητες και γενικευμένες διεπαφές. Τα SAPs χωρίζονται σε -MIH\_SAP που παρέχει μια ομοιόμορφη διεπαφή για ανώτατα επίπεδα της στοιβάς πρωτοκόλλων ώστε να ελέγχει τις διαφορετικές ζεύξεις που δημιουργούνται ανεξάρτητα από την τεχνολογία ασύρματου δικτύου, σε -MIH\_LINK\_SAP που παρέχει μια διεπαφή για την οντότητα της συνάρτησης MIH για τον έλεγχο συγκεκριμένων ζεύξεων και τέλος το -MIH\_NET\_SAP που υποστηρίζει λειτουργίες κινητικότητας για την ανταλλαγή MIH μηνυμάτων και πληροφοριών μέσω της απομακρυσμένης συνάρτησης MIH. Τέλος, υπάρχουν οι MIH χρήστες που χαρακτηρίζονται ως λειτουργικές οντότητες για τη χρήση υπηρεσιών MIH [21].



Αναλυτικότερα, η συνάρτηση MIH είναι μια λογική οντότητα η οποία παρέχει αφηρημένες υπηρεσίες στα ανώτερα επίπεδα μέσω ανεξάρτητων διεπαφών που λαμβάνουν την πληροφορία από τα κατώτερα επίπεδα. Οι αντίστοιχες υπηρεσίες δύναται να είναι είτε τοπικές είτε απομακρυσμένες, με την τοπική λειτουργία να πραγματοποιείται εντός της στοίβας πρωτοκόλλου και την απομακρυσμένη λειτουργία μεταξύ δύο οντοτήτων MIHF. Για παράδειγμα, μια MIHF ενός τερματικού εξασφαλίζει επικοινωνία με μια MIHF εγκατεστημένη σε ένα σταθμό βάσης. Άρα, ο χρήστης είναι μια αφαίρεση των λειτουργιών που χρησιμοποιούν υπηρεσίες MIH, δηλαδή καταναλωτές της υπηρεσίας. Ένας χρήστης MIH θα μπορούσε να είναι μια εφαρμογή διαχείρισης κινητικότητας για τη βελτιστοποίηση της διαπομπής.

Το 802.21 ορίζει τρεις κύριες υπηρεσίες που εξομαλύνουν την διαπομπή σε ετερογενή δίκτυα: το MIES, MICS και MIIS. Αυτές οι υπηρεσίες διαχειρίζονται από μια επιπλέον οντότητα διαχείρισης και διαμόρφωσης που ονομάζεται υπηρεσία διαχείρισης. Η συγκεκριμένη υπηρεσία απαρτίζεται από την MIH ικανότητα ανακάλυψης, την εγγραφή MIH και τη συνδρομή MIH. Μέσω των παραπάνω, η συνάρτηση MIH τίθεται ικανή στην ανακάλυψη άλλων οντοτήτων που αποτελούνται από τη ίδια συνάρτηση. Τα SAPs και οι επεκτάσεις τους επιτρέπουν στην συνάρτηση MIH να αποκτούν χρήσιμες πληροφορίες για το δίκτυο που μεταδίδονται στους κατάλληλους χρήστες χρησιμοποιώντας τις διεπαφές που προσφέρονται.

Το Media Independent Event Service (MIES) καθορίζει τα γεγονότα που αντιπροσωπεύουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά της εκάστοτε ζεύξης, όπως η κατάσταση και η ποιότητα αυτής. Τα συμβάντα ενδέχεται να υποδηλώνουν αλλαγές στην κατάσταση και τη συμπεριφορά μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο, στο επίπεδο δεδομένων και στο λογικό επίπεδο ή να προβλέπουν κάποιες αλλαγές αυτών των επιπέδων (π.χ. Link\_Up, Link\_Down). Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες συμβάντων: συμβάντα ζεύξης που προέρχονται από τα κατώτερα επίπεδα και διαδίδονται προς τα πάνω και γεγονότα MIH που προέρχονται από το MIHF. Οι χρήστες MIH εγγράφονται μέσω της υπηρεσίας διαχείρισης για να λαμβάνουν ειδοποιήσεις όταν πραγματοποιούνται συμβάντα. Τα συμβάντα μπορούν επίσης να ταξινομηθούν περαιτέρω ως τοπικά ή απομακρυσμένα. Τα τοπικά συμβάντα εγγράφονται στο τοπικό MIHF και περιέχονται σε έναν μόνο κόμβο. Τα απομακρυσμένα συμβάντα εγγράφονται σε έναν απομακρυσμένο κόμβο και παραδίδονται μέσω ενός δικτύου με μηνύματα του πρωτοκόλλου MIH. Οι ειδοποιήσεις συμβάντων μπορούν να σταλούν στο MIHF ή σε οποιαδήποτε ανώτερο στρώμα που μπορεί να εντοπιστεί σε έναν τοπικό ή απομακρυσμένο κόμβο. Για παράδειγμα, ένα συμβάν Link\_Up που δημιουργείται από το επίπεδο σύνδεσης ενός κόμβου προορίζεται για τον χρήστη MIH του ίδιου κόμβου εάν είναι τοπικό συμβάν. Εάν ένας απομακρυσμένος χρήστης MIH εγγράφηκε σε αυτό το συμβάν, το τοπικό συμβάν Link\_Up παραδίδεται μέσω του δικτύου στους ανάλογους απομακρυσμένους χρήστες MIH [21].

Το Media Independent Command Service (MICS) παρέχει εντολές για τον έλεγχο της κατάστασης της ζεύξης. Οι εντολές μπορούν να κληθούν τοπικά ή εξ αποστάσεως από χρήστες MIH ή από το ίδιο το MIHF. Για παράδειγμα, ένας χρήστης MIH δύναται να ελέγξει την αναδιάρθρωση ή την επιλογή ενός κατάλληλου συνδέσμου χωρίς τη χρήση εξωτερικών οντοτήτων (π.χ. Link\_Get\_parameters, Link\_Actions). Ο παραλήπτης μιας εντολής μπορεί να βρισκείται εντός της στοίβας πρωτοκόλλου που κάλεσε την εντολή ή μέσα σε μια απομακρυσμένη οντότητα. Οι τοπικές εντολές διαδίδονται από το MIH που χρησιμοποιεί το MIHF και στη συνέχεια από το MIHF σε κατώτερα επίπεδα. Οι απομακρυσμένες εντολές μεταφέρονται από τα μηνύματα πρωτοκόλλου MIH και ενδέχεται να διαδοθούν από το MIHF στη στοίβα τοπικού πρωτοκόλλου έως το MIHF σε μια στοίβα πρωτοκόλλων peer. Επίσης, οι απομακρυσμένες εντολές μπορούν να μεταβούν σε χαμηλότερα επίπεδα ως εντολές συνδέσμου ή να μεταβούν σε χρήστες MIH ως ενδείξεις MIH. Για παράδειγμα, μια εντολή Link\_Actions, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, που δημιουργείται από έναν χρήστη MIH μεταδίδεται από το MIHF στο επίπεδο ζεύξης του ίδιου κόμβου όταν είναι μια τοπική εντολή και διαδίδεται από τον τοπικό κόμβο MIHF στο επίπεδο ζεύξης του απομακρυσμένου κόμβου μέσω ομότιμου MIHF όταν είναι μια απομακρυσμένη εντολή [21].

Το Media Independent Information Service (MIIS) ορίζει ένα σύνολο από οντότητες που παρέχουν πληροφορίες, τη δομή και την παρουσίαση αυτών μαζί με έναν μηχανισμό που βασίζεται σε ερωτήματα για τη μεταφορά πληροφοριών. Το MIIS παρέχει μια δομή για οντότητες MIH, με σκοπό να ανακαλύψουν πληροφορίες χρήσιμες για τη λήψη αποφάσεων κατά τη διαδικασία της διαπομπής. Για παράδειγμα, το MIIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανακαλύψει συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με δίκτυα σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή ή μια

χρονική στιγμή για να καταστήσει πιο αποτελεσματική τη λήψη αποφάσεων και την εκτέλεση μιας επικείμενης διαπομπής. Το MIIS χρησιμοποιεί τόσο την περιγραφή πόρων (RDF) όσο και την τύπος-μήκος-τιμή (type-length-value ή TLV) για τον καθορισμό ανεξάρτητου μέσου ανταλλαγής πληροφοριών σε διαφορετικές τεχνολογίες. Χρησιμοποιώντας το πλαίσιο RDF, οι πληροφορίες που παρέχονται από το MIIS συμμορφώνονται με μία καθορισμένη δομή και σημασιολογία όπως ορίζονται από το σχήμα RDF. Επειδή το RDF είναι ένα επεκτάσιμο πλαίσιο, το MIIS μπορεί εύκολα να υποστηρίξει τη δημιουργία νέων στοιχείων πληροφοριών. Οι επεκτάσεις Vendor-Specific είναι δυνατές μέσω του χώρου ονομάτων εκτεταμένου σχήματος που ορίζεται στην προδιαγραφή IEEE 802.21. Επιπλέον, το RDF παρέχει υποστήριξη για αποτελεσματική απόκριση σε σύνθετα ερωτήματα. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας το RDF σχήμα, το MIIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό κοντινών γειτονικών δικτύων που πληρούν ένα πολύπλοκο σύνολο καθορισμένων κριτηρίων γρήγορα και αποτελεσματικά. Η εξάρτηση από το TLV για τα ίδια ερωτήματα μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο αριθμό ανταλλαγών μηνυμάτων που απαιτούν περισσότερο εύρος ζώνης και να εισαγάγει μεγαλύτερη καθυστέρηση μετακίνησης. Σε περιπτώσεις όπου οι απαιτούμενες πληροφορίες για αποφάσεις μετακίνησης δεν είναι διαθέσιμες τοπικά, το πρωτόκολλο MIH μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόσβαση σε πηγές απομακρυσμένων πληροφοριών. Το δίκτυο και άλλες πληροφορίες δύναται να αποθηκευτούν σε ένα στοιχείο του δικτύου που αναφέρεται ως διακομιστής πληροφοριών [21].

Τέλος, η συνάρτηση MIH περιλαμβάνει τα ακόλουθα λογικά στοιχεία: Ο διαχειριστής χρήστη MIH διαχειρίζεται τους χρήστες MIH που εξυπηρετούνται από το MIHF, συμπεριλαμβανομένων των προνομίων για την αλλαγή της κατάστασης μιας τοπικής ζεύξης και των αιτημάτων για την επεξεργασία συγκεκριμένων εντολών που λαμβάνονται σε μηνύματα MIH. Όταν λαμβάνεται ένα μήνυμα MIH, ο αντίστοιχος χρήστης διαχειρίζεται τον αντίστοιχο εγγεγραμμένο χρήστη MIH για να επεξεργαστεί ένα μήνυμα αίτησης ή να λάβει ένα μήνυμα απόκρισης / ένδειξης. Επίσης, ενεργοποιεί την ειδοποίηση της ένδειξης στους συνδρομητές όταν συμβαίνει το εγγραφόμενο συμβάν. Παράλληλα, χρησιμοποιείται ως μεταφορικό μέσο μεταξύ οντοτήτων MIHF. Το πρωτόκολλο MIH λαμβάνει και αναλύει τα μηνύματα MIH που αποστέλλονται στην τοπική MIHF και καλεί την κατάλληλη επεξεργασία μηνυμάτων εντός αυτού. Τέλος, ελέγχει την κατάσταση τοπικής σύνδεσης αντιστοιχώντας στις εντολές MIH που επικαλέστηκαν και παρακολουθεί την κατάσταση της τοπικής σύνδεσης με λήψη ειδοποιήσεων από τα κατώτερα επίπεδα που σχετίζονται με συμβάντα ζεύξης συνδρομών. Αυτά τα λογικά στοιχεία αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους για να παρέχουν τα MICS και MIES για τους χρήστες MIH.

Η συνεισφορά του MIH περιλαμβάνει ποίκιλα χαρακτηριστικά. Αρχικά, είναι ένα πλαίσιο που επιτρέπει την απρόσκοπτη διαπομπή μεταξύ ετερογενών τεχνολογιών. Αυτό το πλαίσιο βασίζεται σε μια στοίβα πρωτοκόλλων που στοχεύει να παρέχει τις απαραίτητες συσχετίσεις μεταξύ των συσκευών για την βελτιστοποίηση των ενεργειών διαπομπής. Επιπλέον, ορίζεται ένα σύνολο λειτουργιών διαπομπής που παρέχουν στα ανώτερα στρώματα (για παράδειγμα, πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας Mobile IP), με την απαιτούμενη λειτουργικότητα για την εκτέλεση ενισχυμένων διαπομπών. Αυτές οι λειτουργίες ενεργοποιούν, μέσω του πλαισίου 802.21, τα αντίστοιχα επίπεδα τοπικής ή απομακρυσμένης επιπέδου σύνδεσης. Επιπλέον, το MIH επικεντρώνεται στην ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS). Το πλαίσιο 802.21 παρέχει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες ώστε να πραγματοποιηθούν αποφάσεις διαπομπής, βάσει κριτηρίων QoS. Για παράδειγμα, προτιμάται η διαπομπή σε ένα υποψήφιο δίκτυο που εγγυάται ένα επιθυμητό QoS. Ακόμα, πραγματοποιεί διαπομπή την κατάλληλη χρονική στιγμή για τον χρήστη. Μια φωνητική εφαρμογή μπορεί να αποφασίσει να εκτελέσει μια διαπομπή κατά την διάρκεια μιας περιόδου «σιωπής», με στόχο την ελαχιστοποίηση της διακοπής της υπηρεσίας. Αξίζει να αναφερθεί η βοήθεια για την επιλογή δικτύου. Η επιλογή υποψήφιου δικτύου προς διαπομπή απαιτεί μια διαδικασία απόφασης παράδοσης του ελέγχου με βάση διάφορους παράγοντες (QoS, ρυθμαπόδοση, πολιτική, κόστος κ.ά.). Σύμφωνα με τα παραπάνω, το πρότυπο 802.21 παρέχει μόνο τις απαραίτητες λειτουργίες για την εξασφάλιση της επιλογής δικτύου, αλλά δεν λαμβάνει αποφάσεις παράδοσης, οι οποίες επιλύονται από τα υψηλότερα επίπεδα. Τέλος, η διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να επωφεληθεί από τα δεδομένα που παρέχει το 802.21. Με την χρήση του, η κατανάλωση ελαχιστοποιείται αν ο χρήστης ενημερωθεί κατάλληλα για τους «χάρτες» κάλυψης δικτύου, τις βέλτιστες παραμέτρους σύνδεσης ή τις καταστάσεις αναστολής και αδράνειας [21].

### 3.2.7 Group Handover (GHO)

Τα ετερογενή δίκτυα χαρακτηρίζονται με αυτό τον τρόπο είτε εξαιτίας της πληθώρας διαφορετικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται είτε εξαιτίας των κυψελών με διαφορετικές ακτίνες κάλυψης. Το πυκνό δίκτυο κεραιών των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς υλοποιείται με τη χρήση femto κυψελών. Μέχρι τώρα ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών και το σημείο πρόσβασης με ακτίνα κάλυψης μόλις μερικά μέτρα θεωρείται σταθερό. Όμως, τα οχηματικά δίκτυα που προσφέρουν υπηρεσίες πολυμέσων και φωνής μετατρέπουν την σταθερή κυψέλη σε κινητή. Τα femto σημεία πρόσβασης (femto access points, FAP) είναι σταθμοί βάσης χαμηλής ενέργειας και μικρού μεγέθους που ενισχύουν την λαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσιών των χρηστών. Σε ένα οχηματικό δίκτυο οι χρήστες πλήττονται από χαμηλή ρυθμαπόδοση, χαμηλά επίπεδα SINR μεγαλύτερη πιθανότητα διακοπής της λειτουργίας. Οι femto κυψέλες δύνανται να επιλύσουν τα παραπάνω προβλήματα. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, οι χρήστες συνδέονται στο FAP που είναι τοποθετημένο στο εκάστοτε όχημα αντί να συνδέονται στην macro κυψέλη ή σε δορυφορικά δίκτυα. Άρα, οι χρήστες πλέον λαμβάνουν καλύτερη ποιότητα του σήματος εφόσον η απόσταση μεταξύ αυτών και του σημείου πρόσβασης ελαχιστοποιείται. Όμως εμφανίζονται νέα προβλήματα όπως η διαχείριση των παρεμβολών από το εκάστοτε σημείο πρόσβασης που τοποθετείται στο εκάστοτε όχημα, η διαχείριση των διαπομπών τόσο σε ατομικό όσο και σε συλλογικό επίπεδο μέσα σε ένα όχημα και τέλος η διαχείριση των πόρων [22].

Η ικανότητα της αλλαγής σημείου πρόσβασης σε ένα περιβάλλον που αποτελείται από femto και macro κυψέλες είναι το κλειδί για τη διαχείριση των διαπομπών. Στην περίπτωση των οχηματικών δικτύων, ένα σύνολο από χρήστες δύνανται να πραγματοποιήσει διαπομπή σε ένα νέο σημείο πρόσβασης. Το group handover δύνανται να προκύψει ως αποτέλεσμα της ατομικής κίνησης των χρηστών ή της κίνησης της femto κυψέλης. Σε ένα όχημα που εμπεριέχει το FAP είναι πιθανό να συμβούν δύο διαφορετικά σενάρια διαπομπής. Γενικά, οι χρήστες είναι συνδεδεμένοι στο FAP το οποίο με τη σειρά του επικοινωνεί με ένα σημείο πρόσβασης μιας macro κυψέλης. Εφόσον, το όχημα κινείται και κριθεί απαραίτητη η ανάγκη της διαπομπής τότε ο χρήστης από μόνος δεν μεταφέρεται στο νέο σημείο πρόσβασης. Αντίθετα, το FAP πραγματοποιεί διαπομπή στο νέο σημείο πρόσβασης και κατά συνέπεια οι χρήστες που εξυπηρετούνται από αυτό. Άρα, το πρώτο σενάριο διαπομπής περιγράφει την αλλαγή σημείου πρόσβασης του FAP όταν το όχημα κινείται. Παρ' όλα αυτά, είναι πιθανό κάποιος χρήστης να απομακρυνθεί από το όχημα και το σημείο πρόσβασης που του προσφέρει υπηρεσίες φωνής και πολυμέσων. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης αποσυνδέεται από το FAP όταν η ποιότητα υπηρεσιών που λαμβάνει ή το σήμα είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι και πραγματοποιεί διαπομπή σε ένα νέο δίκτυο. Άρα, στη δεύτερη περίπτωση του group handover ο χρήστης αποσυνδέεται από την κινητή femto κυψέλη του οχήματος και πραγματοποιεί διαπομπή σε ένα νέο δίκτυο με πιθανότητα διαφορετική ακτίνα κάλυψης και τελικά διαφορετική κυψέλη. Αντίθετα, οι υπόλοιποι χρήστες που βρίσκονται ακόμα στην ακτίνα κάλυψης του FAP, δηλαδή βρίσκονται ακόμα μέσα στο όχημα που το προσφέρει, συνεχίζουν να λαμβάνουν υπηρεσίες από αυτό. Το group handover δύνανται να χρησιμοποιηθεί τόσο σε οριζόντια όσο και σε κάθετη διαπομπή ως επόμενο πιθανό σημείο πρόσβασης [22][23].

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του είναι μείωση της σηματοδοσίας που επιβαρύνει το δίκτυο με την παράδοση πολλαπλών συσκευών σε νέο σημείο πρόσβασης από το ίδιο το FAP. Σε αντίθετη περίπτωση, με την ατομική διαπομπή του εκάστοτε χρήστη η σηματοδοσία που δύνανται να ανταλλαχθεί θα ήταν περισσότερη. Επιπλέον, εφόσον το FAP είναι κοντά στο χρήστη το κανάλι της πρόσβασης στο διαδίκτυο διατηρείται πάντα σε καλή κατάσταση προσφέροντας τις κατάλληλες υπηρεσίες στον εκάστοτε χρήστη. Τέλος, η ισχύς μετάδοσης του σήματος είναι μικρότερη καθώς οι χρήστες είναι τοποθετημένοι μέσα στο όχημα [22][23].

## Κεφάλαιο 4

## 4.1 Αλγόριθμοι Κάθετης Διαπομπής

Διάφορα πρωτόκολλα που πραγματοποιούν διαχείριση διαπομπής σε ετερογενή δίκτυα έχουν προταθεί από ερευνητικές κοινότητες. Αυτά περιλαμβάνουν τα Mobile IPv6 (MIPv6) [24][25], Fast Handover Mobile IPv6 (FMIPv6) [26], the Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) [27] και Fast Handovers for Proxy Mobile IPv6 (FPMIPv6) [28][29][30].

Στο [24] εφαρμόζεται το πρωτόκολλο MIPv6 σε μια τοπολογία αποτελούμενη από δίκτυα της οικογένειας IEEE 802.16e WiMaX. Η βασική ιδέα που παρουσιάζεται είναι εξάλειψη της απώλειας δεδομένων σε τοπολογία με πολλαπλά σημεία πρόσβασης. Όσο οι χρήστες κινούνται σε ένα τέτοιο περιβάλλον και αλλάζουν το σημείο προσάρτησης τους, διατηρούν την διεύθυνση IP που τους έχει εκχωρηθεί σταθερή. Πειραματικά αποτέλεσμα έδειξαν πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος μειώνει σημαντικά τις απώλειες δεδομένων κατά την κίνηση του χρήστη εντός των δικτύων WiMaX. Στο [26] οι συγγραφείς προτείνουν τη χρήση του FMIPv6 σε δορυφορικά δίκτυα Low Earth Orbit (LEO). Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μια σύγκριση ανάμεσα στο προτεινόμενο πρωτόκολλο και το MIPv6. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιτυγχάνει μικρότερη καθυστέρηση λόγω διαπομπής, κόστος προώθησης και απώλειας πακέτων. Παράλληλα, σημειώνεται η ανάγκη χρήσης του λόγω του μεγαλύτερου βαθμού επιτυχίας στις διαπομπές και της χρήσης μηχανισμών τούνελ για την ανταλλαγή των πακέτων. Οι συγγραφείς στο [27] προτείνουν την ανάγκη χρήσης του πρωτοκόλλου PMIPv6 σε συνδυασμό με δίκτυα Software Defined Networks (SDNs) για τη διαχείριση της κινητικότητας του χρήστη. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος OpenFlow based PMIPv6 (OF-PMIPv6) παρέχει μια κεντρική οντότητα διαχείρισης που ελέγχει τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων μεταξύ του Mobile Access Gateway (MAG) και του Local Mobility Anchor (LMA) ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται διαχωρισμός τους. Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική αποτελείται από δύο τύπους διαπομπής το reactive και το proactive που επιτυγχάνουν βελτίωση στην καθυστέρηση της διαπομπής και στην απώλεια των πακέτων κατά την ανταλλαγή τους.

Στο [28] ο αλγόριθμος που προτείνεται βασίζεται στο πρωτόκολλο FPMIPv6. Παρ' όλα αυτά το συγκεκριμένο πρωτόκολλο παρουσιάζει αρκετά προβλήματα στους μηχανισμούς ασφάλειας που καλούνται να επιλυθούν. Έτσι, ο αλγόριθμος MIH-SPFP για το Fast Proxy Mobile IPv6-IoT παρέχει ενισχυμένους μηχανισμούς ασφάλειας για διαπομπές τερματικών που ανήκουν είτε στο ίδιο είτε σε διαφορετικό MAG ενώ παράλληλα παρέχει ελάχιστες καθυστερήσεις. Επιπρόσθετα, στο [29] χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο MIH ταυτόχρονα με το FPMIPv6 για τη βελτίωση της διαπομπής σε ετερογενή δίκτυα. Επιπλέον, ο μηχανισμός που προτείνεται λαμβάνει υπόψη το Evolved Packet Core (EPC) και τις αντίστοιχες οντότητες που παρέχει. Τα πακέτα άνω και κάτω ζεύξης φτάνουν με επιτυχία στον προορισμό τους απευθείας χωρίς την μεσολάβηση ενδιάμεσων οντοτήτων ενώ εισάγεται η έννοια του παροδικού (transient) flag για την αποφυγή φαινομένων ring-rong όπου το τερματικό εναλλάσσεται και πραγματοποιεί συνεχής διαπομπές μεταξύ του παλιού και του νέου σημείου προσάρτησης. Μάλιστα, το παροδικό flag εξομαλύνει μια αποτυχημένη διαπομπή και καθιστά δυνατή την επιστροφή του τερματικού στο αρχικό δίκτυο που το εξυπηρετούσε χωρίς να χάσει την σύνδεση του. Εφόσον πραγματοποιείται αυτό, τότε διατηρείται στο LMA διπλή εγγραφή του τερματικού μια για κάθε σημείο σύνδεσης. Συμπερασματικά, μειώνεται η καθυστέρηση διαπομπής, το συνολικό κόστος ανταλλαγής των μηνυμάτων σηματοδότησης. Στο [9] παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι RSS Threshold Based Dynamic Heuristic (RTBDH), QoS Based Heuristic (QBH), SINR Based Heuristic (SBH) και Weight Function Based Heuristic (WFBH). Αναλυτικότερα, ο αλγόριθμος RTBDH χρησιμοποιεί ένα δυναμικό RSS κατώφλι που αποκλείει λανθασμένες ή αχρείαστες υποδείξεις για διαπομπή. Αντίστοιχα, ο SBH βασίζεται στο SINR για να πραγματοποιήσει διαπομπή ένα τερματικό. Τέλος, ο WFBH εφαρμόζει μια συνάρτηση κόστους για την ικανοποίηση της μετρικής ποιότητας υπηρεσίας που προσφέρει το εκάστοτε πιθανό δίκτυο. Άρα, ένα δίκτυο με χαμηλή ποιότητα υπηρεσιών είναι μη πιθανός προορισμός σε σχέση με ένα δίκτυο με αυξημένη ποιότητα υπηρεσιών. Τέλος, οι συγγραφείς του [30] εξετάζουν την ανάγκη για διαπομπή, ως προς την κατανάλωση ενέργειας, με τη χρήση των πρωτοκόλλων MIH και FPMIPv6. Η προσάρτηση του τερματικού σε σταθμούς βάσης με πολλαπλές κεραίες και η χρήση πληθώρας αυτών για την ικανοποίηση του χρήστη σε ρυθμό μετάδοσης και εύρος ζώνης αυξάνει αισθητά την κατανάλωση της ενέργειας του τερματικού. Άρα, ένα τερματικό με μεγάλο ποσοστό εναπομένουσας ενέργειας καλείται να συνδεθεί στο δίκτυο και σε πολλαπλές κεραίες του σταθμού βάσης εφόσον

ικανοποιούνται οι ανάγκες του. Αντίθετα, ένα τερματικό με μικρό ποσοστό ενέργειας καλείται να πραγματοποιήσει διαπομπή σε ένα δίκτυο που προσφέρει σταθμούς βάσης με μια κεραία ανά τερματικό. Κατά συνέπεια, παρατηρείται μειωμένο κόστος σηματοδότησης καθώς και καλύτερη διαχείριση της ενέργειας του τερματικού.

## 4.2 Αλγόριθμοι Κάθετης Διαπομπής σε Οχηματικά Δίκτυα

Η διαχείριση της κινητικότητας σε οχηματικά δίκτυα παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα. Η εύρεση της κατάλληλης χρονικής στιγμής για αρχικοποίηση της διαπομπής, ο τρόπος επιλογής των πιθανών επόμενων σημείων πρόσβασης αλλά και η εκτέλεση είναι κάποια από τα ζητήματα προς επίλυση. Πλέον οι κινητοί κόμβοι του δικτύου είναι οχήματα που περιλαμβάνουν τους τελικούς χρήστες.

Οι συγγραφείς στο [31] εισάγουν μετρικές όπως η ποιότητα υπηρεσιών και η ποιότητα εμπειρίας για την αντιμετώπιση προβλημάτων διαχείρισης κινητικότητας. Αναλυτικότερα, τα οχηματικά δίκτυα στοχεύουν στην συνεχόμενη παροχή απαιτητικών υπηρεσιών όπως οι υπηρεσίες βίντεο. Αξιοποιώντας την παραπάνω πρόταση, προτείνεται ένας αλγόριθμος ποιότητας εμπειρίας για κοινοποίηση βίντεο σε οχηματικά δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Η τεχνική Analytic Hierarchy Process (AHP) αποτυπώνει τη σημασία των μετρικών προς μελέτη όπως είναι οι πόροι ραδιοσυχνότητας, η κινητική κατάσταση του οχήματος, η ποιότητα εμπειρίας κ.ά. Επιπρόσθετα, το αρχικό βίντεο προς μετάδοση συγκρίνεται με το λαμβανόμενο βίντεο σύμφωνα με το Structural Similarity (SSIM), ανιχνεύοντας τις διαφορές που προκύπτουν. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι αποτελεσματικότερος σε σχέση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους διαπομπής LTE RSI-based, Strongest Cells και QoE SER, διότι οι τελευταίοι παρέχουν μεγαλύτερο αριθμό διαπομπών, μέτρια ποιότητα βίντεο και τελικά μεγαλύτερη απώλεια πακέτων. Μάλιστα, τα αποτελέσματα του προτεινόμενου αλγόριθμου εξασφαλίζουν 18% βελτίωση από τους προαναφερθέντες λόγω της διατήρησης μιας ικανοποιητικής ποιότητας εμπειρίας στη λήψη του βίντεο με την μείωση του αριθμού των διαπομπών και την αύξηση στην ορθή λήψη των πακέτων. Επιπρόσθετα, στο [32], προτείνεται αλγόριθμος κάθετης διαπομπής που βασίζεται σε δυναμικά κριτήρια. Η κλασική εφαρμογή της διαπομπής δύναται να αποτύχει όταν εφαρμοστεί σε ένα περιβάλλον αποτελούμενο από οχήματα υψηλής κινητικότητας. Άρα, ο συνολικός αριθμός των διαπομπών αυξάνεται μαζί με την επιβάρυνση του δικτύου με την αντίστοιχη σηματοδότηση. Ένας σημαντικός παράγοντας που κρίνει την επιτυχία της διαπομπής είναι η κατάλληλη χρονική στιγμή της αρχικοποίησής της. Πιο συγκεκριμένα, αυτό το σημείο ποσοτικοποιείται από παράγοντες όπως η διακοπή υπηρεσίας, η απώλεια δεδομένων, η καθυστέρηση και αποτυχία εγκαθίδρυσης της ραδιοζεύξης. Ο αλγόριθμος αυτής της έρευνας, εισάγει την έννοια του γεγονότος σταδιακής απώλειας της ζεύξης και στηρίζεται στο πρωτόκολλο IEEE 802.21 Media Independent Handover (MIH) και τις υπηρεσίες του. Υπολογίζεται μια δυναμική τιμή για τη ρύθμιση του σημείου αρχικοποίησης σύμφωνα με την ταχύτητα του οχήματος. Μια σταθερή τιμή ρύθμισης θεωρείται υποβαθμισμένη λόγω της μη ανακάλυψης και μη εύρεσης της κατάλληλης στιγμής για εκκίνηση της αλλαγής ραδιοδιαύλου. Τελικά, οι συγγραφείς υπολογίζουν τον χρόνο παράδοσης ακόμα και με υψηλές ταχύτητες των οχημάτων.

Ακόμα στο [33], προτείνεται αλγόριθμος κάθετης διαπομπής αξιοποιώντας την μηχανική μάθηση η οποία προβλέπει αν είναι απαραίτητη μια διαπομπή για την ομαλή διατήρηση της ποιότητας εμπειρίας. Και στην συγκεκριμένη έρευνα, προκύπτει το συμπέρασμα πως τα σταθερά κατώφλια αποτυγχάνουν στην αρχικοποίηση της διαπομπής μια συγκεκριμένη στιγμή. Όμως, πριν από τη διαπομπή, υπολογίζεται ένα σκορ από παράγοντες όπως η ισχύς του σήματος, η ρυθμαπόδοση, και η προηγούμενη διαπομπή του τερματικού. Η παλινδρόμηση τύπου Support Vector ταιριάζει στα δεδομένα εξάγοντας γνώσεις για τη συμπεριφορά της διαπομπής με στόχο την ακύρωση της υποβάθμισης της ποιότητας εμπειρίας. Η προτεινόμενη προσέγγιση ρωτά ανά τακτά σύντομα χρονικά διαστήματα εάν μια διαδικασία διαπομπής θα επηρεάσει την ποιότητα υπηρεσιών. Επομένως, απαιτείται ένα σύστημα πολιτικής για την ταξινόμηση των αποτελεσμάτων διαπομπής σχετικά με την υποβάθμισή τους, τη συνέπεια ή τη βελτίωσή τους στην ποιότητα υπηρεσίας του εκάστοτε χρήστη. Όταν μια διαπομπή λαμβάνει χαμηλό ή μέσο όρο βαθμολογίας με βάση την πολιτική, η διαδικασία διαπομπής εγκαταλείπεται μέχρι το επόμενο αίτημα του συστήματος δεδομένου ότι αυτό επαναλαμβάνεται. Η προτεινόμενη μέθοδος

υπερβαίνει τον τυπικό αλγόριθμο παράδοσης που υπολογίζει την ισχύ του σήματος κάτω από ένα προκαθορισμένο στατικό όριο. Κατά συνέπεια, ο συνολικός αριθμός των μεταβιβάσεων μειώνεται έως και 38% λόγω της εξάλειψης των περιττών διαπομπών και η απόδοση περικλείεται σε ανερχόμενη ζεύξη και κάτω ζεύξη αντίστοιχα. Στο [34] παρουσιάζεται ένα σχήμα FPMIPv6 με βελτιωμένο το πρωτόκολλο MIH, λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργίες του Evolved Packet Core (EPC) [35]. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς προτείνουν ένα σχήμα VHO που εφαρμόζει το πρωτόκολλο IEEE 802.11 MIH στην αρχιτεκτονική EPC για να διευκολύνει την απρόσκοπτη διαπομπή. Επιπλέον, πραγματοποιείται απευθείας δρομολόγηση πακέτων downlink και uplink. Επίσης, μια προσωρινή σημαία εισάγεται για να αποφευχθούν τα φαινόμενα ring-rong και οι λανθασμένες μεταβιβάσεις διατηρώντας την αρχική και παροδική δέσμευση για ανταλλαγή πακέτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου σχήματος έναντι του FPMIPv6 σε καθυστέρηση παράδοσης, συνολικό κόστος σηματοδότησης και παραμέτρους απώλειας πακέτου.

Ένα άλλο σχήμα που εφαρμόζει τόσο την αρχικοποίηση της διαπομπής όσο και την επιλογή δικτύου ονομάζεται Handover Aware Handover for Smart Cities Environment (MAH-SCE) [36]. Χρησιμοποιεί πληροφορίες κυκλοφορίας που συλλέγονται από αισθητήρες που αναπτύσσονται σε περιβάλλον έξυπνης πόλης [37], για την εκτέλεση της αρχικοποίησης και την επιλογή δικτύου. Συγκεκριμένα, το συγκεκριμένο σχήμα αποφασίζει πότε θα ξεκινήσει μια παράδοση ως συνάρτηση των προαναφερθέντων δεδομένων από τους αισθητήρες σχετικά με την οδική κυκλοφορία, καθώς και το αντιληπτό SNR. Στη συνέχεια, τα οχήματα με ταχύτητα έως 16 m/s θεωρούν και τα macrocells και femtocells ως εναλλακτικές λύσεις για την παράδοσή τους. Σε αυτήν την περίπτωση, εάν τα femtocells υπάρχουν εντός της περιοχής του οχήματος, το σχήμα επιλέγει το femtocell που έχει τον υψηλότερο εκτιμώμενο χρόνο που το όχημα θα παραμείνει συνδεδεμένο χωρίς να απαιτείται η παράδοση σε άλλο κελί. Αντίθετα, εάν η ταχύτητα του οχήματος είναι μεγαλύτερη από 16 m/s, μόνο τα macrocells θεωρούνται εναλλακτικές επιλογές διαπομπής και επιλέγεται εκείνη που μεγιστοποιεί το χρόνο που το όχημα θα παραμείνει συνδεδεμένο σε αυτό, επιλέγεται. Ένας ακόμα αλγόριθμος, ο Mobility Aware Handover σε Ultra Dense Vehicle Environment (MAH-UDVE) [38], εξετάζει την κατεύθυνση της κινητικότητας του οχήματος για να επιλέξει το καταλληλότερο δίκτυο για προσάρτηση. Συγκεκριμένα, η κίνηση του οχήματος δέχεται στατιστική ανάλυση προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύνολο πιθανών επόμενων κελιών. Στη συνέχεια, τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις δύνανται να εφαρμοστούν για την επιλογή του καταλληλότερου κελιού από το προαναφερθέν σύνολο. Η πρώτη προσέγγιση επιλέγει το πλησιέστερο κελί, ενώ η δεύτερη προσέγγιση επιλέγει το επόμενο κελί που υπάρχει στον ίδιο δρόμο στην ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση της κίνησης του οχήματος. Αντίστοιχα, η τρίτη προσέγγιση επιλέγει το επόμενο κελί που υπάρχει στον ίδιο δρόμο, αλλά στην αντίθετη κατεύθυνση της κίνησης του οχήματος. Τέλος, η τέταρτη προσέγγιση επιλέγει το κελί με το χαμηλότερο φορτίο. Κάθε φορά επιλέγεται η περίπτωση που ταιριάζει για την κάλυψη μιας επιτυχημένης διαπομπής με μικρή καθυστέρηση λόγω της μεταφοράς και μικρότερες απώλειες πακέτων. Το σχήμα Hidden Markov Model - Kalman Filter (HMM-KF) ασχολείται με την επιλογή δικτύου και τις εργασίες εκτέλεσης της διαχείρισης κινητικότητας. Η κινητικότητα των οχημάτων διαμορφώνεται με παρακολούθηση της κίνησής τους, λαμβάνοντας υπόψη πληροφορίες από τις συσκευές GPS τους. Επίσης, κάθε δίκτυο διατηρεί ένα Κρυφό Μοντέλο Markov (HMM) που δείχνει τις πιθανότητες που κάθε όχημα συνδεδεμένο στο δίκτυο πρέπει να παραδώσει σε κάθε γειτονικό δίκτυο, το οποίο εκτιμάται λαμβάνοντας υπόψη το φίλτρο Kalman (KF). Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη το HMM, το εκάστοτε όχημα επιλέγει το επόμενο δίκτυό του. Η κατάλληλη σηματοδότηση ανταλλάσσεται μεταξύ του οχήματος και του επιλεγμένου δικτύου προκειμένου να πραγματοποιηθεί η παράδοση ενώ τελικά, οι πιθανότητες HMM του προηγούμενου και του νέου δικτύου του οχήματος ενημερώνονται.

Η Πολιτική Παράδοσης Περιεχομένου (CAHP) στο εξετάζει μια τοπολογία δικτύου LTE όπου υπάρχουν τόσο Macrocells όσο και Femtocells. Περιγράφεται ένας αλγόριθμος με γνώμονα το φορτίο, ο οποίος καθορίζει δύο κατώφλια παράδοσης, δηλαδή το  $M_{th}$  και το  $F_{th}$ , για Macrocells και Femtocells, αντίστοιχα. Και τα δύο κατώφλια αξιολογούνται, λαμβάνοντας υπόψη το όριο αναφοράς λαμβανόμενης ισχύος σήματος (RSRP) που ορίζεται στο LTE, καθώς και πληροφορίες φόρτωσης δικτύου. Συνεπώς, όταν το RSRP πέσει κάτω από το αντίστοιχο όριο, ενεργοποιείται ένας χρονοδιακόπτης Time-to-Trigger (TTT), ο οποίος αρχικοποιείται με μια συγκεκριμένη τιμή  $T$ , λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η ισχύς μετάδοσης κυψέλης, τις αποστάσεις μεταξύ των διαθέσιμων κυψελών, την απώλεια διαδρομής, τη συχνότητα, το φορτίο κίνησης δικτύου και την

ταχύτητα του χρήστη. Κατά τη διάρκεια της αντίστροφης μέτρησης, εάν το RSRP επιστρέψει πάνω από το αντίστοιχο όριο, ο χρονοδιακόπτης απενεργοποιείται. Διαφορετικά, όταν ο χρονοδιακόπτης ισούται με το μηδέν, ξεκινά η παράδοση και ο χρήστης μεταφέρεται στο δίκτυο με το υψηλότερο RSRP. Η εξισορρόπηση φορτίου περιβάλλοντος (HO-CALB) [39] είναι ένα άλλο σχήμα εκκίνησης της κάθετης διαπομπής. Λαμβάνει υπόψη το σενάριο στο οποίο συνυπάρχουν και τα δύο δίκτυα WiFi και WiMAX. Ένας αλγόριθμος επίγνωσης φορτίου του εκάστοτε δικτύου κατανέμει το φορτίο κίνησης σε δίκτυα WiFi και WiMAX λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Κάθε χρήστης έχει ένα σύνολο υπηρεσιών με αυστηρούς περιορισμούς QoS. Εάν το παρατηρούμενο QoS πέσει κάτω από ένα όριο, μια πολιτική παράδοσης δίνει εντολή στους χρήστες να πραγματοποιήσουν παράδοση. Ένα άλλο σύστημα υβριδικής προσέγγισης επικοινωνίας (HCA) ορίζει δύο τύπους διασύνδεσης δικτύου, συγκεκριμένα την τεχνολογία πρόσβασης δικτύου IEEE 802.11p που θεωρείται ως η κύρια διεπαφή, ενώ το 3GPP LTE θεωρείται δευτερεύον. Από προεπιλογή, ένα όχημα είναι συνδεδεμένο στην κύρια διεπαφή. Εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος εκκίνησης διαπομπής με γνώμονα το QoS, ο οποίος δίνει εντολή στο όχημα να εκτελεί παράδοση στη δευτερεύουσα διεπαφή όταν η παρατηρούμενη απώλεια πακέτου των παρεχόμενων υπηρεσιών υπερβεί ένα μέγιστο αποδεκτό όριο. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται ένα χρονόμετρο καθορίζοντας το χρονικό διάστημα που ο χρήστης παραμένει συνδεδεμένος σε δευτερεύουσα διεπαφή. Όταν λήξει ο χρονοδιακόπτης και ο εκτιμώμενος λόγος απώλειας πακέτου της πρωτεύουσας διασύνδεσης είναι χαμηλότερος από το μέγιστο αποδεκτό όριο, το όχημα εκτελεί παράδοση στην κύρια διεπαφή.

### 4.3 Αλγόριθμοι Συσταδοποίησης σε Οχηματικά Δίκτυα

Ως μέθοδος δημιουργίας δικτύου ad hoc, ο αλγόριθμος ομαδοποίησης έχει μελετηθεί εκτενώς στο παραδοσιακό MANET που βρίσκει άμεση χρήση μέχρι και σήμερα. Μεταξύ αυτών, ο πιο αντιπροσωπευτικός μηχανισμός επιλογής του CH έχει τον ελάχιστο αλγόριθμο ID [12], τον αλγόριθμο υψηλότερου βαθμού κόμβου [12] και τον αλγόριθμο WCA βάσει βάρους [12]. Αυτοί οι αλγόριθμοι λαμβάνουν πλήρως υπόψη την κινητικότητα και την ενέργεια του κόμβου και εστιάζουν κυρίως στη χρήση ενεργειακών πόρων που είναι δυνατό να δώσει το εκάστοτε δίκτυο. Ωστόσο, τα ζητήματα πόρων δεν αποτελούν σημαντικό παράγοντα για τους κόμβους του οχήματος. Η υψηλή κινητικότητα των οχημάτων είναι ο κύριος παράγοντας που προκαλεί αστάθεια συστάδων με αποτέλεσμα οι CM να βρίσκονται εκτός συστάδων είτε οι CH να μην μπορούν να παραδώσουν μηνύματα στα απλά μέλη της τοπολογίας. Έτσι, ο αλγόριθμος αποκλεισμού στο MANET δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας στο VANET και ένας μεγάλος αριθμός αλγορίθμων συμπλέγματος έχει προταθεί [12] στο VANET για τη βέλτιστη χρήση και αξιοποίηση των δυνατοτήτων του.

Ορισμένοι αλγόριθμοι συσταδοποίησης που βασίζονται στο πρωτόκολλο MAC έχουν προταθεί στο VANET. Οι Su και Zhang [12] πρότειναν έναν μηχανισμό επικοινωνίας πολλαπλών καναλιών CM-MMAC που βασίζεται σε συστάδες. Ο προτεινόμενος μηχανισμός αποτελείται από τρία μέρη: πρωτόκολλο διαμόρφωσης συστάδας, πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ συστάδων και πρωτόκολλο συντονισμού μεταξύ συστάδων. Το πρωτόκολλο διαμόρφωσης συστάδας χρησιμοποιείται για να χωρίσει τα οχήματα στην ίδια κατεύθυνση μέσα στην ίδια συστάδα. Η επικοινωνία μεταξύ ομάδων εγγυάται τη μετάδοση σε πραγματικό χρόνο πακέτων δεδομένων ασφαλείας και μη ασφαλείας μεταξύ δύο κόμβων οχήματος. Το πρωτόκολλο συντονισμού μεταξύ συστάδων χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο πολλαπλών καναλιών MAC για να προκαλέσει τη συλλογή ή την αποστολή πακέτων δεδομένων στους κόμβους μελών συστάδας. Οι Liu και Zhang [12], Javaid et al. [12nfo], και Zhang et al. [12] πρότειναν έναν αλγόριθμο συσταδοποίησης βασισμένο σε ασαφή λογική (fuzzy logic). Αναλυτικότερα, χρησιμοποίησαν ασαφή διαδικασία για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αξιοπιστίας της σύνδεσης, για να βελτιωθεί η σταθερότητα της συστάδας, καθώς η ταχύτητα είναι ο κύριος λόγος για την αστάθεια του εκάστοτε κόμβου όταν είναι μέλος μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής. Στη διαδικασία επιλογής κεφαλής της συστάδας (CH), όταν αλλάζει η βέλτιστη ταχύτητα του CH, ο υπο-βέλτιστος κόμβος χρησιμοποιείται ως νέα κεφαλή συμπλέγματος για τη βελτίωση της σταθερότητας του συμπλέγματος. Αυτός ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε σενάρια υψηλής ταχύτητας οπότε ένας ακόμα κόμβος καλείται να ικανοποιεί τις συνθήκες αντιστοίχισης σε CH. Αν εισάγονται μη βέλτιστοι κόμβοι κεφαλής συστάδας, η συχνή

εναλλαγή οδηγεί σε ασταθή ομαδοποίηση και υψηλό κόστος συντήρηση συστάδων, διότι το overhead αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς. Εκτός από τους αλγόριθμους ομαδοποίησης που αναφέρθηκαν παραπάνω, ορισμένοι αλγόριθμοι επιλέγουν CH βάσει ενός αθροίσματος σταθμισμένων τιμών, που ονομάζονται Αλγόριθμοι συμπλέγματος βάσει βάσης (WCA). Οι Mohammad και Michele [12] πρότειναν έναν αλγόριθμο ομαδοποίησης βάσει λωρίδων χρησιμοποιώντας τη σχετική ταχύτητα, τη σχετική θέση και τη ροή της κυκλοφορίας των οχημάτων. Κάθε λωρίδα μπορεί να αποδοθεί με τιμή συγκεκριμένου βάρους με βάση τη ροή κυκλοφορίας. Το VWCA [12] υπολογίζει τη σταθμισμένη τιμή ομαδοποίησης με βάση αρκετές τιμές μετρήσεων όπως τιμή δυσπιστίας οχήματος, τιμή εντροπίας, αριθμό γειτόνων και σχετική θέση. Το όχημα με την ελάχιστη σταθμισμένη τιμή αθροίσματος στη γειτονιά επιλέγεται ως CH. Για τη βελτίωση της συνδεσιμότητας του δικτύου, η VWCA εισήγαγε μια προσαρμοστική κατανομή αλγορίθμου εύρους μετάδοσης (AATR) με βάση το πρότυπο επικοινωνίας εντός της συστάδας, το πρότυπο Dedicated Short-range Communication (DSRC) [12]. Το Vehiclecan αλλάζει το εύρος μετάδοσης δυναμικά από 100m to 1000m ανάλογα με την πυκνότητα του οχήματος. Ένας άλλος μηχανισμός σταθμισμένης ανταλλαγής AMACAD [12] προτάθηκε με βάση τον τελικό προορισμό του οχήματος, που αποκτήθηκε από το σύστημα πλοήγησης. Στο AMACAD, οχήματα με παρόμοιους προορισμούς έχουν μεγάλη πιθανότητα να παραμείνουν στο ίδιο σύμπλεγμα. Το σταθμισμένο άθροισμα υπολογίζεται με βάση τους σχετικούς προορισμούς, τους τελικούς προορισμούς, τη σχετική ταχύτητα και την τρέχουσα θέση του οχήματος. Οι προαναφερθέντες αλγόριθμοι συσταδοποίησης που βασίζονται στο single-hop μπορεί να δημιουργήσουν περισσότερους CH στο δίκτυο, μειώνοντας τη σταθερότητα στο VANET. Κατά συνέπεια, τα τελευταία χρόνια, μελετήθηκαν ευρέως ορισμένοι αλγόριθμοι συμπλέγματος πολλαπλών hop (multi-hop)]. Στον αλγόριθμο συσταδοποίησης multi-hop, το μέγεθος της συστάδας δηλαδή των μελών που την αποτελούν, ελέγχεται από τον αριθμό των hops. Η εκάστοτε συστάδα έχει μόνο μία κεφαλή. Η απόσταση μεταξύ των μελών και της κεφαλής καλείται να είναι μικρότερη ή ίση με τον προκαθορισμένο μέγιστο αριθμό hop που χρησιμοποιούνται στο σενάριο. Οι Zhang et al. [12] πρότειναν έναν αλγόριθμο ομαδοποίησης πολλαπλών hop με βάση τη μέτρηση της κινητικότητας. Κάθε κόμβος οχήματος υποχρεούται να μεταδίδει τις πληροφορίες του στο γειτονικό κόμβο του. Οι γειτονικοί κόμβοι λαμβάνουν δύο διαδοχικά πακέτα Hello Beacon από ένα συγκεκριμένο όχημα για τον υπολογισμό της σχετικής κινητικότητας. Με βάση τη σχετική κινητικότητα, κάθε όχημα μπορεί να υπολογίσει την τιμή Aggregate Mobility (AM) και στη συνέχεια η τιμή AM μεταδίδεται στην περιοχή N-hop. Οι Zhang και Sayed [12] πρότειναν ένα νέο σύμπλεγμα K-HOP. Στη φάση επιλογής κεφαλής της συστάδας, προστίθεται η υψηλότερη συνδεσιμότητα, η κινητικότητα του οχήματος και το ελάχιστο αναγνωριστικό κόμβου για την επιλογή του κόμβου κεφαλής συμπλέγματος. Ο Doret et al. [12] πρότεινε έναν κατανεμημένο αλγόριθμο συμπλέγματος 2-hop HCA (ιεραρχική ομαδοποίηση σε δίκτυα Ad-Hoc Adhoc). Ο HCA είναι ένας αλγόριθμος γρήγορης ομαδοποίησης χωρίς συγκεκριμένη επιλογή κεφαλής συμπλέγματος ή δημιουργία σταθερής αρχιτεκτονικής συμπλέγματος, ενώ συγκεντρώνει το συντομότερο δυνατό και βελτιστοποίηση συμπλέγματος έχει γίνει στη φάση συντήρησης του συμπλέγματος.

## Κεφάλαιο 5

### 5.1 Προτεινόμενος Αλγόριθμος Συσταδοποίησης

Οι συγγραφείς στο [11], προτείνουν τον αλγόριθμο Cluster-based Routing for Sparse and Dense Networks (CBRSN) ως μια ολοκληρωμένη λύση για τη δημιουργία συστάδων, επιλογή του CH της εκάστοτε συστάδας και την ομαλή διαχείρισή της. Αναλυτικότερα, περιγράφει μια διαδικασία όπου τα οχήματα χωρίζονται σε συστάδες με κοινά χαρακτηριστικά και ένα από αυτά τα οχήματα είναι υπεύθυνο για την ανταλλαγή δεδομένων με όλες τις οντότητες του δικτύου. Όταν οποιοσδήποτε κόμβος θελήσει να αποστείλει πακέτα σε ένα προορισμό, το πρωτόκολλο αυτό είναι υπεύθυνο για την εγκαθίδρυση μιας διαδρομής ανάμεσα στην πηγή της πληροφορίας και



τον προορισμό. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παραμετροποιείται έτσι ώστε να προσαρμόζεται κατάλληλα σε σενάρια διαπομπής.

### 5.1.1 Δημιουργία Συστάδων

Η υπό-διαδικασία της δημιουργίας συστάδων είναι μια σημαντική παράμετρος για τον αποτελεσματικό διαχωρισμό των οχημάτων. Απώτερος στόχος είναι η εξισορρόπηση του φορτίου στο δίκτυο, η καλύτερη χρήση του εύρους ζώνης και οι βελτιωμένες διαδρομές πακέτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα VANETs, όλοι τα οχήματα και οι σταθμοί βάσης είναι ενήμεροι για την ακριβή γεωγραφική θέση των κόμβων μέσα στο δίκτυο είτε με τη χρήση του 4G είτε με το GPS. Εφόσον έχουν ανταλλαχθεί τα beacons με τα αντίστοιχα short/hello μηνύματα, η γεωγραφική θέση είναι πλέον γνωστή. Άρα, ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για τη συλλογή και την επεξεργασία των πληροφοριών θέσης για την εμποπτεία του δικτύου.

Αρχικά, ο σταθμός βάσης υπεύθυνος για την εκάστοτε περιοχή διαχωρίζει το δίκτυο σε Α τμήματα σύμφωνα με τον τύπο:

$$A = V_{Density} * Cluster_{RP} (1)$$

όπου το Α δείχνει τον αριθμό των τετραγωνικών τμημάτων που έχει χωριστεί το δίκτυο, το  $V_{Density}$  είναι ίσο με το πλήθος των οχημάτων και το  $Cluster_{RP}$  είναι το απαιτούμενο ποσοστό συστάδων με  $CM \neq 0$ . Μετά από αυτό τον υπολογισμό, ο αλγόριθμος τμηματοποιεί τους οχηματικούς κόμβους σε συστάδες ανάλογα με τη γεωγραφική θέση. Η εξίσωση (1) εκτελείται τόσες φορές μεταβάλλοντας το ποσοστό των συστάδων ώστε να βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός συστάδων με τουλάχιστον ένα όχημα στην κάθε μια. Αν βρεθεί συστάδα με μόνο ένα όχημα, η παράμετρος  $Cluster_{RP}$  μεταβάλλεται μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη. Για κάθε τμήμα  $A_i$  ο σταθμός βάσης υπολογίζει το κέντρο ( $centre_{point}$ ) και διαμοιράζει τις πληροφορίες σε κάθε όχημα στο τμήμα που αντιστοιχεί. Εφόσον έχουν συγκεντρωθεί όλες οι απαραίτητες πληροφορίες, ο σταθμός βάσης παράγει ένα σύνολο από συστάδες βασιζόμενος στην απόσταση από το ( $centre_{point}$ ). Επιπρόσθετα, ένα μοναδικό ID παράγεται για την εκάστοτε συστάδα που έχει δημιουργηθεί. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι όλα τα δίκτυα να χωριστούν σε συστάδες ή ομάδες.

#### Αλγόριθμος 1. Σχηματισμός Συστάδων

1. *Input Data* ( $V_{Density}, Cluster_{RP}$ )
2. *Output*
3.  $C_A$ : *Cluster Formation*
4. *Update location of vehicles through GPS*
5. *Send information to BS*
6.  $A = V_{Density} * Cluster_{RP}$
7. *Procedure*  $C_A(A)$  *until*
8. *For each partition*
9. *Do*
10. *Compute*  $centre_{point} (x_i, y_i)$
11. *End for*
12. *Do*
13. *Distance from j to*  $centre_{point} = compute\ distance (x_j, y_j, centre_{point})$
14. *J joins nearest cluster*
15. *End for*
16. *End procedure*

### 5.1.2 Επιλογή Cluster Head

Η εκλογή κεφαλής συστάδας (CH) είναι η δεύτερη υπό-διαδικασία και μια από τις σημαντικές στρατηγικές για τη χρήση ενός κόμβου οχήματος ως CH σε κάθε περιοχή συστάδας. Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα CBR δημιουργούν επιπλέον πολυπλοκότητες υπολογισμού και επιβάρυνση λόγω των πολύπλοκων εκλογικών διαδικασιών τους. Το Ομαδική κάθετη διαπομπή με συσταδοποίηση σε οχηματικά δίκτυα ειδικού σκοπού

προτεινόμενο πρωτόκολλο CBRSDN εφαρμόζει την εκλογή CH μόνο σε επιλεγμένο αριθμό με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Επομένως, μόνο περιορισμένος αριθμός κόμβων οχημάτων συμμετέχουν στις εκλογές CH υπολογίζοντας τις πληροφορίες φορτίου και το αντίστοιχο βάρος. Το εκάστοτε όχημα υπολογίζει ένα σκορ το οποίο περιλαμβάνει σταθμισμένες μετρικές όπως η απόσταση από το  $centre_{point}$  της συστάδας, η ισχύς το λαμβανόμενου σήματος από το σταθμό βάσης και η κατεύθυνση σύμφωνα με τον τύπο:

$$CH_{score} = a * Distance + b * Signal_{strength} + \gamma * Direction \quad (2)$$

όπου τα βάρη  $a, b, \gamma$  κυμαίνονται στις τιμές  $0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1, 0 \leq \gamma \leq 1$ . Η απόσταση είναι μια σημαντική μετρική για την επιλογή του κατάλληλου CH όπου ο πιο κεντρικός κόμβος μέσα σε μια συστάδα έχει περισσότερες ικανότητες να πληροί αυτό το κριτήριο. Η απόσταση προκύπτει από τον τύπο:

$$Distance = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

Έπειτα, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι εξίσου μια σημαντική μετρική που καλείται να ληφθεί υπόψη. Γενικά, τα ασύρματα κανάλια επικοινωνίας χαρακτηρίζονται από έντονες διαλείψεις εξαιτίας των φυσικών και μη εμποδίων που συναντώνται στο δρόμο. Ένα ισχυρό σήμα μέσα σε μια συστάδα δίνει περισσότερες πιθανότητες σε ένα κόμβο να αποκτήσει χαρακτηριστικά CH μέσα σε ένα δίκτυο. Τέλος, η τελευταία μετρική αντικατοπτρίζει την κατεύθυνση του οχήματος προς έναν περιορισμό. Η χρήση της θεωρείται κρίσιμη καθώς διαχωρίζει την κίνηση των οχημάτων σε δρόμους διπλής κατεύθυνσης. Παρ' όλα αυτά ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δέχεται μια νέα μετρική για την προσαρμογή σε σενάρια διαπομπής.

Γενικά, μέσα σε ένα οχηματικό δίκτυο, ο CH ανταλλάζει συχνά μηνύματα γνωστοποίησης παρουσίας των υπόλοιπων οχημάτων και του εαυτού του μέσα από hello beacons. Ως αποτέλεσμα, ανά τακτά χρονικά διαστήματα το κάθε όχημα ενημερώνει μια βάση (INFO\_TABLE) που διατηρεί για το εκάστοτε όχημα μέσα στο δίκτυο. Αυτή η βάση διατηρεί τιμές όπως το Vehicle\_Id, Vehicle\_State, Location-Related Information, Number of Followers, Parent\_Id, Timestamp, CH, CM. Κατά την εκλογή ενός CH, οι πληροφορίες των παραπάνω στηλών μεταβάλλονται τόσο για τον ίδιο όσο και για τους CM που τον ακολουθούν. Όταν ένας CH αντιληφθεί πως η αρχικοποίηση της διαπομπής είναι απαραίτητη καλείται να ανατρέξει στη βάση που διατηρεί τοπικά και να αρχίσει να συλλέγει πληροφορίες για τα οχήματα που θα αλλάξουν σημείο πρόσβασης μαζί του. Ενώ, τέλος, καλείται να τα παραδώσει σε αυτό. Για να είναι ενημερωμένες αυτές οι πληροφορίες, ο CH είναι απαραίτητο να διατηρεί πάντα τις πιο πρόσφατες εγγραφές για τα CMs του, ανταλλάζοντας τα σχετικά μηνύματα hello. Ταυτόχρονα, αυτό πραγματοποιείται με επιτυχία όταν βρίσκεται σε τέτοια απόσταση από όλα τα υπόλοιπα οχήματα ώστε η ισχύς των μηνυμάτων που στέλλονται και διαβάζονται να είναι πάνω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Άρα, καλείται να βρίσκεται σε τέτοιο σημείο ώστε να έχει άμεση επικοινωνία με όλους τους κόμβους. Για αυτό το λόγο στην εξίσωση (2) προστίθεται η μετρική Expected Transmission Count (EXT) [12]. Το EXT αναπαριστά ποιότητα των ζεύξεων διπλής κατεύθυνσης. Μια σταθερή ζεύξη όχι μόνο εξασφαλίζει την αξιοπιστία της επικοινωνίας αλλά και τη σταθερότητα στην συσταδοποίηση. Ο υπολογισμός της ζεύξης μεταξύ των κόμβων  $i, j$  υπολογίζεται ως:

$$EXT_{i,j} = \frac{1}{d_f + d_r} \quad (4)$$

όπου τα  $d_f, d_r$  αναπαριστούν το ποσοστό των επιτυχημένων μηνυμάτων μετάδοσης και λήψης. Δεδομένου ότι το εκάστοτε όχημα αποστέλλει πακέτα hello στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου, οι τιμές  $d_f, d_r$  υπολογίζονται εύκολα. Η εξίσωση (4) δείχνει πόσο όσο μικρότερο είναι το  $d_f, d_r$  τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της ζεύξης. Τέλος, η συγκεκριμένη μετρική υπολογίζεται και τοποθετείται στο INFO\_TABLE του εκάστοτε οχήματος. Ακόμα, λαμβάνεται υπόψη και η ταχύτητα του οχήματος ώστε αν κάποιος έχει πολύ υψηλή ή χαμηλή ταχύτητα σε σχέση με το σύνολο να λαμβάνει μικρότερη προτεραιότητα. Συμπερασματικά, η εξίσωση (2) πλέον εκφράζεται ως:

$$CH_{score} = \alpha * Distance\_from\_BS + \beta * Signal_{strength} + \gamma * Direction + \delta * EXT_{i,j,length} + \varepsilon * u \quad (5)$$

Μετά την επιλογή του CH με το μεγαλύτερο σκορ, ο CH της εκάστοτε συστάδας αποστέλλει ένα μήνυμα δήλωσης της παρουσίας του (Presence Message, PM) στα υπόλοιπα μέλη της συστάδας για να ενημερώσει το ρόλο του σε αυτή καθώς και τα INFO\_TABLE του εκάστοτε οχήματος. Το PM όταν ληφθεί από ένα κόμβο CM, διαμοιράζεται και στους υπόλοιπους κόμβους στους οποίους δεν έχει φτάσει.

## Αλγόριθμος 2. Εκλογή Cluster Head

1. *Input*
2. *C<sub>A</sub>: Cluster formation*
3. *Procedure CH Election*
4. *For every cluster*
5. *Do*
6. *Get candidate CH<sub>i</sub> position (x<sub>i</sub>,y<sub>i</sub>)*
7. *End for*
8. *For every cluster*
9. *For every vehicle*
10. *Do*
11.  $CH_i = \alpha * Distance\_from\_BS + \beta * Signal_{strength} + \gamma * Direction + \delta * EXT_{i,j,length} + \varepsilon * u$
12. *End for*
13.  $CH = max.CH_i$
14. *Do*
15. *Send PM*
16. *Update INFO\_TABLE(i)*
17. *End for*
18. *End procedure*

## 5.2 Προτεινόμενος Αλγόριθμος Κάθετης Διαπομπής

Ο αλγόριθμος διαπομπής που προτείνεται βασίζεται στα πρωτόκολλα Fast Proxy Mobile IPv6 (FPMIPv6) και Media Independent Handover (MIH). Το FPMIPv6 προσφέρει λύσεις σε ετερογενή περιβάλλοντα κινητικότητας του τερματικού υποστηρίζοντας πληθώρα διαφορετικών τεχνολογιών. Παρέχει ένα κοινό δίαυλο επικοινωνίας για γρήγορη διαπομπή μέσα από τα κατάλληλα μηνύματα σηματοδότησης που βελτιστοποιούν την απόδοση. Παρ' όλα αυτά, από μόνο του δεν δύναται να προσφέρει ένα ικανοποιητικό περιβάλλον αρχικοποίησης της διαπομπής και επιλογής του επόμενου δικτύου. Αρχικά, χαρακτηρίζεται από έλλειψη συμβάντων εκκίνησης της διαπομπής καθώς και από την έλλειψη διαδικασιών αναζήτησης και επιλογής των υποψήφιων δικτύων προς διαπομπή. Τέλος, δεν εξασφαλίζονται βήματα παράδοσης του ελέγχου στο υποψήφιο δίκτυο και διαδικασίες στο επίπεδο της ζεύξης. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο MIH που παρέχει λύσεις στα προαναφερθέντα προβλήματα. Ο συνδυασμός τους εμφανίζεται σταθερά στη βιβλιογραφία επιλύοντας μόνιμα προβλήματα κινητικότητας όπως η λανθασμένη αρχικοποίηση διαπομπής, αποτυχημένη μεταβίβαση στο νέο δίκτυο ή το φαινόμενο ping-pong.

### 5.2.1 Αρχικοποίηση Διαπομπής

Κατά την αρχικοποίηση, μελετάται ο ρυθμός δεδομένων  $C_{j,i}$  του  $j^{th}$  Cluster Head (CH) από το τωρινό PoA όπως προτείνεται στο [40]. Αναλυτικότερα, το  $C_{j,i}$  εξαρτάται από το εύρος ζώνης  $B_{j,i}$  και από το Signal to Interference plus Noise Ratio ( $SINR_{j,i}$ ). Σύμφωνα με το θεώρημα του Shannon, το  $C_{j,i}$  υπολογίζεται ως:

$$C_{j,s,i} = B_{j,i} * \log_2(1 + SINR_{j,i} * W_s)$$

Όταν ο CH της συστάδας  $A_i$  με ID αντιληφθεί πως ο ρυθμός δεδομένων  $C_{j,i}$  που λαμβάνει είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι αποστέλλει ένα μήνυμα *1.MIH\_Data\_Rate\_Going\_Down* στο τωρινό MAG για την αρχικοποίηση της διαπομπής. Στο συγκεκριμένο μήνυμα περνά ως παραμέτρους τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων που καλείται να παρέχει το επόμενο δίκτυο, καθώς και τα αναγνωριστικά του εκάστοτε Cluster Member (CM) που υπάρχει στη συστάδα. Αμέσως μετά, το τωρινό MAG ξεκινά να κάνει buffering τα πακέτα που λαμβάνει από το LMA. Το κατώφλι του SINR για την πραγματοποίηση των πράξεων του  $C_{j,i}$  είναι ίσο με 14dB όπως προτείνεται στο [41]. Κατά συνέπεια, οι τιμές  $C_{thres,video}$ ,  $C_{thres,voice}$ ,  $C_{thres,IoT}$ , είναι ίσες με 0.945, 0.061 και 0.283 αντίστοιχα.

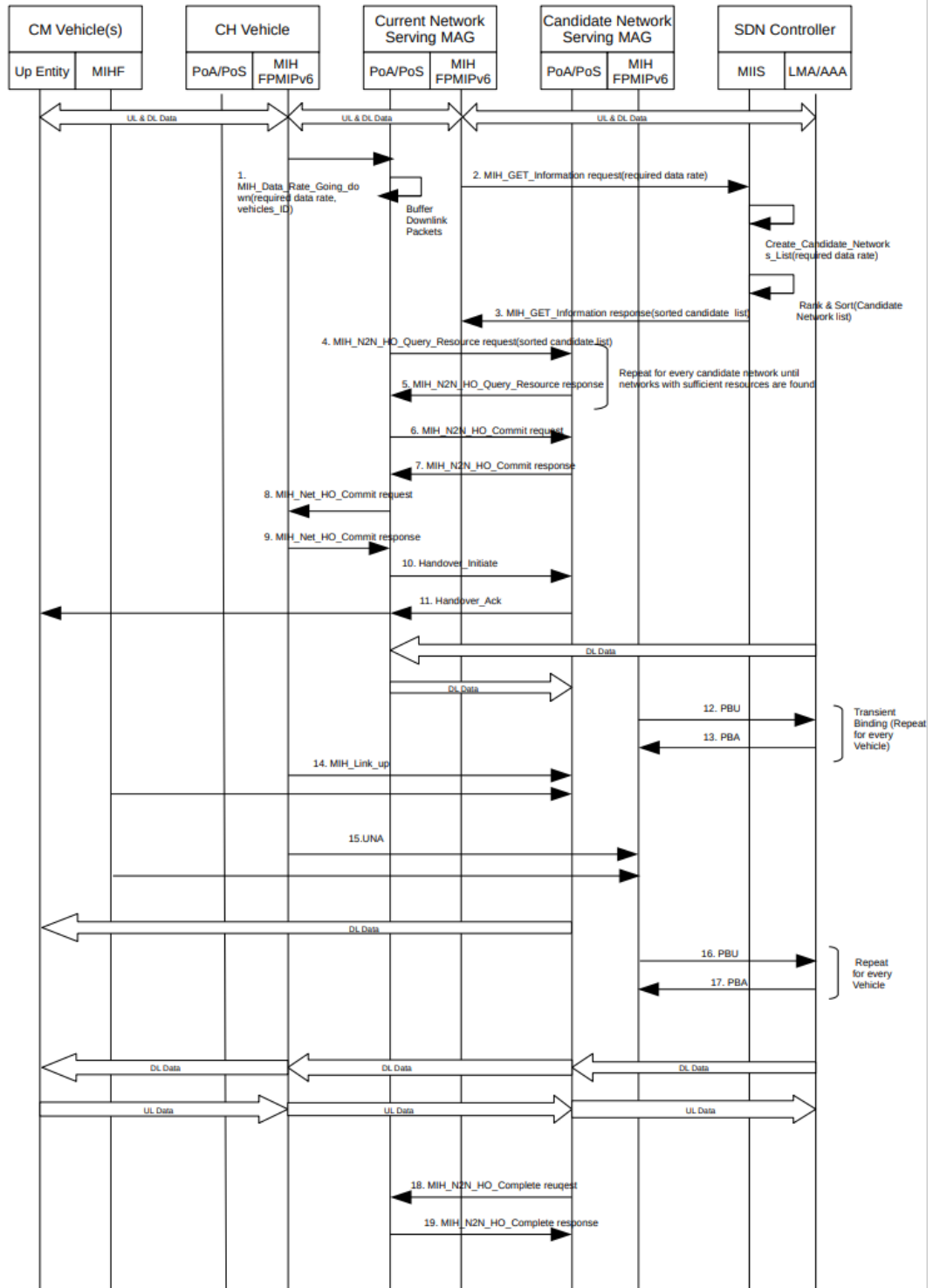
### 5.2.2 Απόφαση Διαπομπής

Το τωρινό MAG αποστέλλει στην οντότητα MIIS του SDN Controller ένα μήνυμα *2.MIH\_GET\_Information request* που περιέχει πληροφορίες για τον ελάχιστο ρυθμό δεδομένων που απαιτείται για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα υποψήφια δίκτυα προς διαπομπή και την ταχύτητα που έχει ο CH τη δεδομένη χρονική στιγμή. Η ταχύτητα αυτή εκφράζει και τα υπόλοιπα οχήματα της συστάδας ή CMs διότι αν η ταχύτητα διαφοροποιηθεί αισθητά τότε είναι πιθανό να βρεθούν εκτός. Το MIIS περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και τα χαρακτηριστικά σχετικά με τα υποψήφια MAG. Εφόσον ανακτήσει πληροφορίες για τα υποψήφια δίκτυα που ικανοποιούν τη συνθήκη του απαιτούμενου ρυθμού δεδομένων, τα ταξινομεί και δημιουργεί μια λίστα με αυτά. Από τη λίστα αποκλείονται femto κυψέλες όταν η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο κατώφλι [41]. Έτσι, λαμβάνει υπόψη μόνο τις macro κυψέλες. Αντίθετα, αν η ταχύτητα του CH και κατά συνέπεια των CMs είναι κάτω από το αντίστοιχο κατώφλι με αποτέλεσμα όλα τα δίκτυα να θεωρούνται πιθανοί προορισμοί ανεξάρτητα από την ακτίνα κάλυψης που διαθέτουν. Μέσω του μηνύματος *3. MIH\_GET\_Information response*, η συγκεκριμένη λίστα μεταβιβάζεται στο τωρινό MAG για την επιλογή του υποψήφιου δικτύου. Το τωρινό MAG ελέγχει τους πόρους του εκάστοτε PoA μέσω της ανταλλαγής των μηνυμάτων *4.MIH\_N2N\_HO\_Resource request* και *5. MIH\_N2N\_HO\_Resource response*. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου βρεθεί ένα PoA με τους απαιτούμενους πόρους που θα καθιστά επιτρεπτή την διαπομπή. Αξίζει να αναφερθεί πως εκτιμάται μικρότερο κόστος επιβάρυνσης του δικτύου και ταχύτερη ανταλλαγή μηνυμάτων διότι οι υπολογισμοί για τους πόρους έχουν πραγματοποιηθεί στην πλευρά του MIIS και όχι κάθε μέρα που ανταλλάσσονται τα μηνύματα 4 και 5.

### 5.2.3 Εκτέλεση Διαπομπής

Στη φάση εκτέλεσης, το τωρινό MAG αρχικά δεσμεύει τους πόρους στο νέο MAG για την επικείμενη διαπομπή μέσω των μηνυμάτων *6.MIH\_N2N\_HO\_Commit request* και *7. MIH\_N2N\_HO\_Commit response*. Έπειτα, για την συγκεκριμένη εξασφάλιση των πόρων του νέου PoA ενημερώνεται ο CH της συστάδας μέσω του μηνύματος *8.MIH\_Net\_HO\_Commit request*. Όταν λάβει τη συγκεκριμένη πληροφορία απαντά με το μήνυμα *9. MIH\_Net\_HO\_Commit response* προς επιβεβαίωση. Το τωρινό MAG ενημερώνει το νέο MAG με σχετικές πληροφορίες τόσο για το CH όσο και για τα CMs της συστάδας με το ID του εκάστοτε οχήματος, το Vehicle-ID Logical Link Identifier, και το LMA από το οποίο προωθείται η κίνηση στα οχήματα με το μήνυμα *10.Handover Initiate (HI)*. Όταν το μήνυμα ληφθεί με επιτυχία το νέο MAG απαντά με το *11. Handover Acknowledgement* στο CH. Με τη σειρά του, ο CH προωθεί το μήνυμα στα CMs της συστάδας του, ενημερώνοντας όλες τις οντότητες του δικτύου για τη διαπομπή. Παράλληλα, εγκαθιδρύεται ένα τούνελ διπλής κατεύθυνσης μεταξύ των MAGs για την αποστολή ενός αντιγράφου των πακέτων που είχαν γίνει buffer στην αρχικοποίησης της διαπομπής. Αυτά θα σταλούν αργότερα όταν ο CH συνδεθεί με το νέο PoA. Ως αποτέλεσμα, το νέο MAG στέλνει ένα μήνυμα *12.PBU* στο LMA για τη δημιουργία μιας παροδικής εγγραφής στο Binding Cache Entry εισάγοντας πληροφορίες για το ποιο MAG εξυπηρετεί ποιο όχημα, το Home Network Prefix καθώς και τα ενεργά flags. Αξίζει να αναφερθεί , πως τα flags B (Buffering), T (Transient) και P Ομαδική κάθετη διαπομπή με συσταδοποίηση σε οχηματικά δίκτυα ειδικού σκοπού

(Proxy), F (Forward) τίθενται σε 1. Όταν το LMA λάβει με επιτυχία το PBU, ξεκινά να κάνει buffering τα πακέτα από το δίκτυο. Όταν η παροδική εγγραφή καταχωρηθεί στο BCE, τότε αποστέλλεται το μήνυμα 13.PBA στο νέο MAG ώστε να εγκαθιδρυθεί το τούνελ διπλής κατεύθυνσης ανάμεσα σε αυτές τις δύο οντότητες. Αξίζει να σημειωθεί, πως στο BCE δημιουργούνται τόσες εγγραφές όσες και οι οντότητες των οχημάτων μέσα στην εκάστοτε συστάδα. Κατά συνέπεια, τα πακέτα κάτω ζεύξης προορίζονται από το LMA για το νέο MAG όπου γίνονται buffer μέχρι το CH και τα CMs συνδεθούν με το νέο PoA. Αναλυτικότερα, το τούνελ διπλής κατεύθυνσης μεταξύ του LMA και του νέου MAG παραμένει ενεργό μέχρι η παροδική εγγραφή να αλλάξει σε μόνιμη. Άρα, η παροδική εγγραφή επιτρέπει την ομαλότερη μετάβαση από το τωρινό MAG στο νέο MAG με την αποφυγή φαινομένων απώλειας πακέτων και αποτυχημένων περιπτώσεων διαπομπής. Τόσο ο CH όσο και ο CM αποστέλλουν τα μηνύματα 14.MIH\_Link\_up μέσω της οντότητας MIHF που βρίσκεται τοπικά εγκατεστημένη για να ενημερώσουν το νέο PoA πως το κανάλι της μεταξύ τους επικοινωνίας είναι έτοιμο και πως αναμένουν τη λήψη πακέτων. Επιπρόσθετα, στέλνουν το μήνυμα 15.UNA στο νέο MAG για να ενημερώσουν πως το επίπεδο ζεύξης και IP έχουν εγκατασταθεί. Τέλος, το νέο MAG ανταλλάζει εκ νέου τα μηνύματα 16. PBU και 17. PBA για κάθε οντότητα της συστάδας ώστε οι εγγραφές από παροδικές να είναι πλέον μόνιμες. Τέλος, οι πόροι του τωρινού MAG αποδεσμεύονται για μελλοντική χρήση μέσω της αποστολής των μηνυμάτων 18.MIH\_N2N\_Complete request και 19.MIH\_N2N\_Complete response. Τέλος, το τούνελ διπλής κατεύθυνσης για την ομαλότερη μετάβαση στο νέο PoA εγκαταλείπεται και τα πακέτα φτάνουν πλέον στον προορισμό τους από το νέο MAG. Κατά συνέπεια, τόσο ο CH όσο και τα CMs λαμβάνουν και αποστέλλουν κίνηση μέσω του νέου MAG χωρίς να έχουν συμμετάσχει σε ολόκληρη τη διαδικασία της διαπομπής. Αναλυτικότερα, έχουν ανταλλάξει μόνο τα μηνύματα εγκαθίδρυσης του καναλιού επικοινωνίας χωρίς να έχουν ενημερωθεί για τα υποψήφια δίκτυα, τους απαιτούμενους πόρους που διαθέτουν ή το Vehicle-ID Logical Link Identifier, και το LMA από το οποίο προωθείται η κίνηση στα οχήματα. Επιπλέον, σε περίπτωση που για κάποιο λόγο υπάρξει όχημα με χαρακτηριστικά CM που βρεθεί εκτός της συστάδας, τότε συνεχίζει να λαμβάνει υπηρεσίες από το σταθμό βάσης με τον οποίο έχει εγκαθιδρύσει κανάλι επικοινωνίας. Αντίστοιχα, εφόσον το Vehicle-ID είναι γνωστό στο LMA κατά την εγγραφή του BCE από τον CH, το όχημα που θα βρεθεί εκτός συστάδας μπορεί από μόνο του να εκκινήσει διαδικασίες διαπομπής για την επιλογή του επόμενου δικτύου αν αυτό κριθεί απαραίτητο. Καταληκτικά, ο CH έχει πραγματοποιήσει όλες τις απαραίτητες ενέργειες ώστε τα υπόλοιπα οχήματα της συστάδας να λειτουργούν είτε αυτόνομα είτε συγκεντρωτικά μέσα σε αυτή. Παρ' όλα αυτά είναι πιθανό να βρεθεί εκτός συστάδας ο CH λόγω απότομης αύξησης της ταχύτητας. Ως αποτέλεσμα, το πεδίο CH του INFO\_TABLE που βρίσκεται τοπικά εγκατεστημένος στο εκάστοτε όχημα γίνεται ίσο με το 0. Η διαδικασία εκλογής του νέου CH για την υπάρχουσα συστάδα ξεκινά από την αρχή και όχι διατηρώντας τις αρχικές παραμέτρους. Ο κόμβος που θα πληροί όλα τα κριτήρια του αλγόριθμου και εμφανίσει το μεγαλύτερο άθροισμα στη συνάρτηση κόστους, εκλέγεται ως CH. Ο συγκεκριμένος κόμβος αλλάζει το πεδίο CM του δικού του INFO\_TABLE σε 0 ενώ το CH γίνεται πλέον 1.



Εικόνα 1. Σηματοδότηση Διακομής

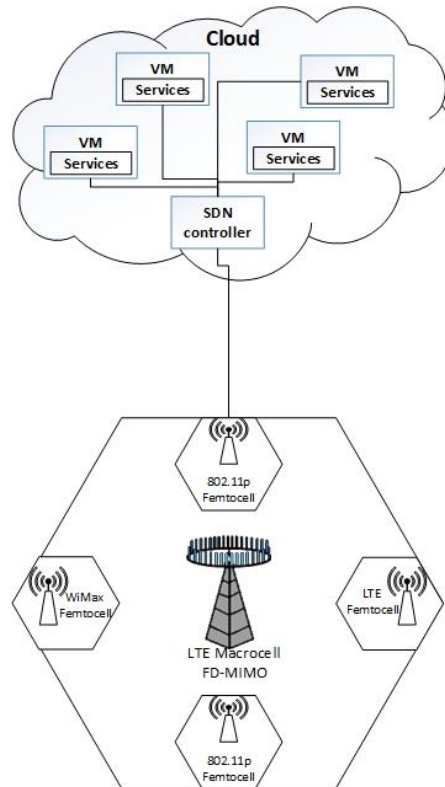
## Κεφάλαιο 6

### 6.1 Προσομοίωση Σεναρίου Συσταδοποίησης και Διαπομπής

Η προσομοίωση ξεκινάει με την τοποθέτηση των οχημάτων εντός της ακτίνας κάλυψης του εκάστοτε σταθμού βάσης. Δημιουργούνται τόσα σενάρια συσταδοποίησης όσοι και οι σταθμοί βάσης που βρίσκονται στην υπάρχουσα τοπολογία. Η macro κυψέλη καλύπτει μια περιοχή με μήκος 1000 m και πλάτος 1000 m, ενώ οι femto κυψέλες της τοπολογίας καλύπτουν μια έκταση με 200 m μήκος και 200 m πλάτος αντίστοιχα εκτός από τη WiMAX κυψέλη που έχει διαστάσεις με μήκος και πλάτος ίσο με 100 m. Ο σταθμός βάσης της macro κυψέλης παρέχει υπηρεσίες σε 34 οχήματα ενώ η εκάστοτε femto κυψέλη θεωρείται πως δεν εξυπηρετεί ακόμα κάποιο από τα υπάρχοντα οχήματα. Η προσομοίωση για την εξαγωγή των μετρήσεων έχει πραγματοποιηθεί στο περιβάλλον Network Simulator 3 (NS3 v3.31). Αρχικά, τα οχήματα τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις σε ένα πλέγμα με τυχαίες ταχύτητες καθώς και τρόπο κίνησης στο χώρο. Εφόσον πραγματοποιηθεί αυτό, ανταλλάζονται πακέτα μεταξύ των οχημάτων για την εκτίμηση του ποσοστού των πακέτων που στέλνονται, του ποσοστού των πακέτων που λαμβάνονται με επιτυχία καθώς και το Received Signal Strength (RSS) από το σταθμό βάσης που τα εξυπηρετεί. Οι μετρήσεις εξάγονται με επιτυχία και το σενάριο της προσομοίωσης εκτελείται σε δύο φάσεις στη γλώσσα προγραμματισμού Python. Έχει χρησιμοποιηθεί η βιβλιοθήκη numpy για τη χρήση πολυδιάστατων μητρώων και για την απλούστευση των πράξεων τους. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει την συσταδοποίηση και την εκλογή της κεφαλής της εκάστοτε συστάδας. Αντίστοιχα, στη δεύτερη φάση, οι κεφαλές αρχικοποιούν, αποφασίζουν και εκτελούν τις διαδικασίες της διαπομπής. Τα οχήματα τοποθετούνται στο χώρο σε σημεία (x, y) και ξεκινάει η διαδικασία της συσταδοποίησης. Αρχικά, από την εξίσωση (1), υπολογίζεται το πλήθος των συστάδων. Το πεδίο κάλυψης της macro κυψέλης χωρίζεται σε 9 συστάδες και τα πεδία κάλυψης των femto κυψελών σε 4 συστάδες. Το αριθμός των συστάδων προκύπτει από το πλήθος των αυτοκινήτων στο χώρο καθώς και από το ποσοστό συστάδων που καλούνται να αποτελούνται από τουλάχιστον ένα όχημα ώστε να ισχύει το σχήμα CH-CM. Για κάθε συστάδα που δημιουργείται υπολογίζεται το κέντρο της. Έπειτα, μέσω του τύπου της ευκλείδειας απόστασης:

$$\sqrt{\sum_{i=0}^n (a_i - b_i)^2}$$

Υπολογίζεται η απόσταση του κάθε οχήματος από όλα τα κέντρα. Όταν αυτή η απόσταση είναι η ελάχιστη, τότε το όχημα ανήκει στη συστάδα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι κάθε όχημα να ανήκει σε μια συστάδα η οποία έχει το κέντρο με την μικρότερη απόσταση από αυτό. Παρακάτω φαίνεται η διαδικασία υπολογισμού της απόστασης από τον εκάστοτε κόμβο καθώς και ο συσχετισμός του οχήματος με την αντίστοιχη συστάδα ανάλογα με την απόσταση από το κέντρο της.



Εικόνα 2. Τοπολογία Προσομοίωσης

```

Distance of Vehicle in Position (15.9,3.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 11.081967334368027
Distance of Vehicle in Position (15.9,3.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 16.21141573089778
Distance of Vehicle in Position (15.9,3.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 24.552189311749775
Distance of Vehicle in Position (15.9,3.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 2.193171219946131
Distance of Vehicle in Position (15.9,3.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 12.033702672078947
Distance of Vehicle in Position (15.9,3.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 22.0184013951967
Distance of Vehicle in Position (15.9,3.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 9.317188417113822
Distance of Vehicle in Position (15.9,3.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 15.060212481900779
Distance of Vehicle in Position (15.9,3.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 23.807771840304586
Minimum Distance: 2.193171219946131

Distance of Vehicle in Position (16.0,2.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 11.40175425099138
Distance of Vehicle in Position (16.0,2.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 17.029386365926403
Distance of Vehicle in Position (16.0,2.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 25.495097567963924
Distance of Vehicle in Position (16.0,2.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 3.1622776601683795
Distance of Vehicle in Position (16.0,2.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 13.038404810405298
Distance of Vehicle in Position (16.0,2.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 23.021728866442675
Distance of Vehicle in Position (16.0,2.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 9.486832980505138
Distance of Vehicle in Position (16.0,2.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 15.811388300841896
Distance of Vehicle in Position (16.0,2.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 24.698178070456937
Minimum Distance: 3.1622776601683795
    
```

Εικόνα 3. Εύρεση ελάχιστων αποστάσεων α'



```
Distance of Vehicle in Position (7.0,6.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 2.23606797749979
Distance of Vehicle in Position (7.0,6.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 9.219544457292887
Distance of Vehicle in Position (7.0,6.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 19.1049731745428
Distance of Vehicle in Position (7.0,6.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 8.06225774829855
Distance of Vehicle in Position (7.0,6.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 12.041594578792296
Distance of Vehicle in Position (7.0,6.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 20.615528128088304
Distance of Vehicle in Position (7.0,6.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 18.027756377319946
Distance of Vehicle in Position (7.0,6.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 20.12461179749811
Distance of Vehicle in Position (7.0,6.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 26.1725046566048
Minimum Distance: 2.23606797749979

Distance of Vehicle in Position (18.0,5.7) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 13.018832512940628
Distance of Vehicle in Position (18.0,5.7) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 15.984054554461455
Distance of Vehicle in Position (18.0,5.7) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 23.269937687926884
Distance of Vehicle in Position (18.0,5.7) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 3.0805843601498726
Distance of Vehicle in Position (18.0,5.7) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 9.7718984849414
Distance of Vehicle in Position (18.0,5.7) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 19.531768993104542
Distance of Vehicle in Position (18.0,5.7) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 7.034912934784623
Distance of Vehicle in Position (18.0,5.7) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 11.640017182117903
Distance of Vehicle in Position (18.0,5.7) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 20.530221625691233
Minimum Distance: 3.0805843601498726

Distance of Vehicle in Position (27.0,6.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 22.02271554554524
Distance of Vehicle in Position (27.0,6.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 23.769728648009426
Distance of Vehicle in Position (27.0,6.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 29.068883707497267
Distance of Vehicle in Position (27.0,6.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 12.041594578792296
Distance of Vehicle in Position (27.0,6.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 15.0
Distance of Vehicle in Position (27.0,6.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 22.47220505424423
Distance of Vehicle in Position (27.0,6.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 2.23606797749979
Distance of Vehicle in Position (27.0,6.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 9.219544457292887
Distance of Vehicle in Position (27.0,6.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 19.1049731745428
Minimum Distance: 2.23606797749979
```

Εικόνα 4. Εύρεση ελάχιστων αποστάσεων β'

```

Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 7.280109889280518
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 10.63014581273465
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 19.313207915827967
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 3.605551275463989
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 8.54400374531753
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 18.24828759089466
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 13.152946437965905
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 15.264337522473747
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 22.20360331117452
Minimum Distance: 3.605551275463989

Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 4.242640687119285
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 7.615773105863909
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 17.26267650163207
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 13.341664064126334
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 14.7648230602334
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 21.400934559032695
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 23.194827009486403
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 24.041630560342615
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 28.600699292150182
Minimum Distance: 4.242640687119285

Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 8.94427190999916
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 10.0
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 17.88854381999832
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 4.47213595499958
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 6.324555320336759
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 16.1245154965971
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 12.649110640673518
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 13.416407864998739
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 20.0
Minimum Distance: 4.47213595499958

```

Εικόνα 5. Εύρεση ελάχιστων αποστάσεων  $\gamma'$

```

Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 7.280109889280518
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 10.63014581273465
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 19.313207915827967
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 3.605551275463989
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 8.54400374531753
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 18.24828759089466
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 13.152946437965905
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 15.264337522473747
Distance of Vehicle in Position (12.0,7.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 22.20360331117452
Minimum Distance: 3.605551275463989

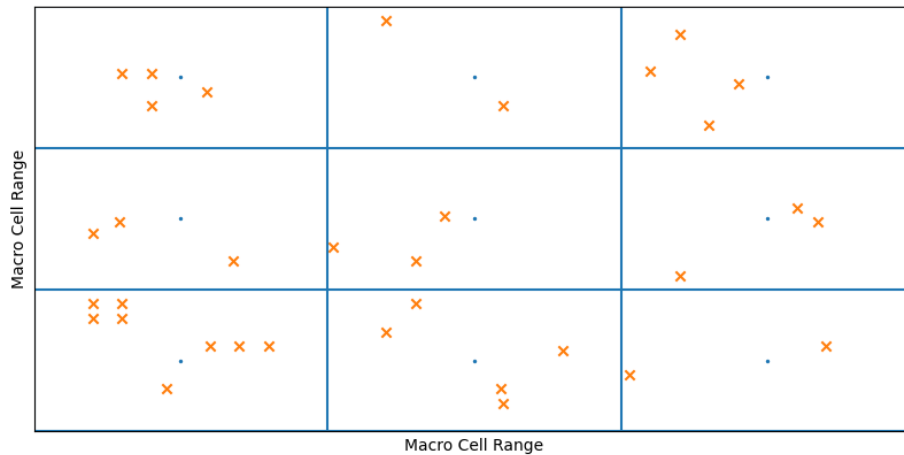
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 4.242640687119285
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 7.615773105863909
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 17.26267650163207
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 13.341664064126334
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 14.7648230602334
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 21.400934559032695
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 23.194827009486403
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 24.041630560342615
Distance of Vehicle in Position (2.0,8.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 28.600699292150182
Minimum Distance: 4.242640687119285

Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (5.0,5.0) : 8.94427190999916
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (5.0,15.0) : 10.0
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (5.0,25.0) : 17.88854381999832
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (15.0,5.0) : 4.47213595499958
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (15.0,15.0) : 6.324555320336759
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (15.0,25.0) : 16.1245154965971
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (25.0,5.0) : 12.649110640673518
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (25.0,15.0) : 13.416407864998739
Distance of Vehicle in Position (13.0,9.0) from Cluster Centre (25.0,25.0) : 20.0
Minimum Distance: 4.47213595499958

```

Εικόνα 6. Εύρεση ελάχιστων αποστάσεων δ'

Με την ολοκλήρωση της συσταδοποίησης, σε κάθε συστάδα εκχωρείται ένα μοναδικό αναγνωριστικό και το πεδίο CM του INFO\_TABLE για κάθε όχημα γίνεται ίσο με τη μονάδα. Αναλυτικότερα, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για την macro κυψέλη:



Εικόνα 7. Στιγμιότυπο Συσταδοποίησης

Τα μπλε σημεία αναπαριστούν το κέντρο της εκάστοτε συστάδας και είναι συνολικά ίσα με 6. Αντίστοιχα, τα οχήματα περιγράφονται ως «x» στο συγκεκριμένο σχεδιάγραμμα με πλήθος ίσο με 34.

```
Cluster with Centre (5.0,5.0): (4.5,3.0),(8.0,6.0),(6.0,6.0),(7.0,6.0),(2.0,8.0),(3.0,9.0),(2.0,9.0),(3.0,8.0)
Cluster with Centre (5.0,15.0): (6.8,12.0),(2.0,14.0),(2.9,14.8)
Cluster with Centre (5.0,25.0): (4.0,23.0),(5.9,24.0),(3.0,25.3),(4.0,25.3)
Cluster with Centre (15.0,5.0): (15.9,3.0),(16.0,2.0),(18.0,5.7),(12.0,7.0),(13.0,9.0)
Cluster with Centre (15.0,15.0): (10.2,13.0),(14.0,15.2),(13.0,12.0)
Cluster with Centre (15.0,25.0): (16.0,23.0),(12.0,29.0)
Cluster with Centre (25.0,5.0): (27.0,6.0),(20.3,4.0)
Cluster with Centre (25.0,15.0): (22.0,11.0),(26.0,15.8),(26.7,14.8)
Cluster with Centre (25.0,25.0): (24.0,24.5),(21.0,25.4),(22.0,28.0),(23.0,21.6)

Process finished with exit code 0
```

Εικόνα 8. Μέλη συστάδων

Σε επόμενη φάση, εκλέγεται ο CH της κάθε συστάδας από την εξίσωση (5). Το εκάστοτε όχημα, λαμβάνει υπόψη την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος από το σταθμό βάσης, την κατεύθυνση του και έναν πίνακα από το ρυθμό μετάδοσης και λήψης μηνυμάτων μεταξύ όλων των οχημάτων της συστάδας. Η τιμές για το RSS του εκάστοτε οχήματος έχουν προκύψει από το λογισμικό ns3 ενώ αντίστοιχα οι τιμές για τη μετρική  $EXT_{ij}$  έχουν συλλεχθεί ως αποτέλεσμα της μέτρησης πακέτων που έχουν σταλεί και ληφθεί με επιτυχία. Αξίζει να αναφερθεί πως η κίνηση που παράγεται προσομοιώνει πακέτα UDP συγκεκριμένου μεγέθους και με συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης μέσα ένα ορισμένο χρόνο διάστημα. Άρα, όλα τα οχήματα ταυτόχρονα δύναται να χαρακτηριστούν με βάση το σενάριο προσομοίωσης και ο servers και ως clients. Μάλιστα, οποιοσδήποτε server μπορεί να δεχτεί κίνηση από οποιονδήποτε client. Αναλυτικότερα:

Για τη συστάδα με κέντρο το (5.0,5.0):

Όχημα	Received Signal Strength (RSS)
(4.5,3.0)	-68 dB
(8.0,6.0)	-70 dB
(6.0,6.0)	-71 dB
(7.0,6.0)	-69 dB
(2.0,8.0)	-72 dB
(3.0,9.0)	-73 dB
(2.0,9.0)	-74 dB
(3.0,8.0)	-67 dB

Για τη συστάδα με κέντρο το (5.0,15.0):

Όχημα	Received Signal Strength (RSS)
(6.8,12.0)	-74 dB
(2.0,14.0)	-71 dB
(2.9,14.8)	-72 dB

Για τη συστάδα με κέντρο το (5.0,25.0):

Όχημα	Received Signal Strength (RSS)
(4.0,23.0)	-72 dB
(5.9,24.0)	-73 dB
(3.0,25.3)	-74 dB
(4.0,25.3)	-71 dB

Για τη συστάδα με κέντρο το (15.0,5.0):

Όχημα	Received Signal Strength (RSS)
(15.9,3.0)	-63 dB
(16.0,2.0)	-62 dB
(18.0,5.7)	-65 dB
(12.0,7.0)	-67 dB
(13.0,9.0)	-68 dB

Για τη συστάδα με κέντρο το (15.0,15.0):

Όχημα	Received Signal Strength (RSS)
(10.2,13.0)	-58 dB
(14.0,15.2)	-54 dB
(13.0,12.0)	-59 dB

Για τη συστάδα με κέντρο το (15.0,25.0):

Όχημα	Received Signal Strength (RSS)
(16.0,23.0)	-62 dB
(12.0,29.0)	-64 dB

Για τη συστάδα με κέντρο το (25.0,5.0):

Όχημα	Received Signal Strength (RSS)
(27.0,6.0)	-72 dB
(20.3,4.0)	-75 dB

Για τη συστάδα με κέντρο το (25.0,15.0):

Όχημα	Received Signal Strength (RSS)
(22,11)	-69 dB
(26,15.8)	-72 dB
(26.7,14.8)	-73 dB

Για τη συστάδα με κέντρο το (25.0,25.0):

Όχημα	Received Signal Strength (RSS)
(24.0,24.5)	-72 dB

(21.0,25.4)	-69 dB
(22.0,28.0)	-70 dB
(23.0,21.6)	-71 dB

Για τη συστάδα με κέντρο το (5.0,5.0):

EXT <sub>ij</sub>	(4.5,3.0)	(8.0,6.0)	(6.0,6.0)	(7.0,6.0)	(2.0,8.0)	(3.0,9.0)	(2.0,9.0)	(3.0,8.0)	Sum
(4.5,3.0)	1	1,196	1,19	1,24	1,33	1,38	1,35	1,29	<b>9,976</b>
(8.0,6.0)	1,196	1	1,11	1,05	1,28	1,315	1,21	1,245	<b>9,406</b>
(6.0,6.0)	1,19	1,11	1	1,04	1,22	1,291	1,202	1,209	<b>9,262</b>
(7.0,6.0)	1,24	1,05	1,04	1	1,23	1,21	1,225	1,229	<b>9,224</b>
(2.0,8.0)	1,33	1,28	1,22	1,23	1	1,135	1,128	1,133	<b>9,456</b>
(3.0,9.0)	1,38	1,315	1,291	1,21	1,135	1	1,125	1,117	<b>9,573</b>
(2.0,9.0)	1,35	1,21	1,202	1,225	1,128	1,125	1	1,14	<b>9,38</b>
(3.0,8.0)	1,29	1,245	1,209	1,229	1,133	1,117	1,14	1	<b>9,363</b>
<b>Sum</b>	<b>9,976</b>	<b>9,406</b>	<b>9,262</b>	<b>9,224</b>	<b>9,456</b>	<b>9,573</b>	<b>9,38</b>	<b>9,363</b>	

Για τη συστάδα με κέντρο το (5.0,15.0):

EXT <sub>ij</sub>	(6.8,12.0)	(2.0,14.0)	(2.9,14.8)	Sum
(6.8,12.0)	1	1,23	1,18	<b>3,41</b>
(2.0,14.0)	1,23	1	3	<b>5,23</b>
(2.9,14.8)	1,18	3	1	<b>5,18</b>
<b>Sum</b>	<b>3,41</b>	<b>5,23</b>	<b>5,18</b>	

Για τη συστάδα με κέντρο το (5.0,25.0):

EXT <sub>ij</sub>	(4.0,23.0)	(5.9,24.0)	(3.0,25.3)	(4.0,25.3)	Sum
(4.0,23.0)	1	1,14	1,177	1,16	<b>4,477</b>
(5.9,24.0)	1,14	1	1,34	1,411	<b>4,891</b>
(3.0,25.3)	1,177	1,34	1	1,17	<b>4,687</b>
(4.0,25.3)	1,16	1,411	1,17	1	<b>4,741</b>
<b>Sum</b>	<b>4,477</b>	<b>4,891</b>	<b>4,687</b>	<b>4,741</b>	

Για τη συστάδα με κέντρο το (15.0,5.0):

EXT <sub>ij</sub>	(15.9,3.0)	(16.0,2.0)	(18.0,5.7)	(12.0,7.0)	(13.0,9.0)	Sum
(15.9,3.0)	1	1,122	1,38	1,47	1,56	<b>6,532</b>
(16.0,2.0)	1,122	1	1,193	1,292	1,32	<b>5,927</b>
(18.0,5.7)	1,38	1,193	1	1,331	1,283	<b>6,187</b>
(12.0,7.0)	1,47	1,292	1,331	1	1,165	<b>6,258</b>
(13.0,9.0)	1,56	1,32	1,283	1,165	1	<b>6,328</b>
<b>Sum</b>	<b>6,532</b>	<b>5,927</b>	<b>6,187</b>	<b>6,258</b>	<b>6,328</b>	

Για τη συστάδα με κέντρο το (15.0,15.0):

EXT <sub>ij</sub>	(10.2,13.0)	(14.0,15.2)	(13.0,12.0)	Sum
(10.2,13.0)	1	1,134	1,199	<b>4,36</b>



Για κάθε όχημα που ανήκει σε μια συστάδα με ξεχωριστό ID υπολογίζεται το αντίστοιχο σκορ. Έπειτα, στην εκάστοτε συστάδα υπολογίζεται το μέγιστο σκορ και κατά συνέπεια ο CH που θα επικοινωνεί με τα υπόλοιπα μέλη της συστάδας με το βέλτιστο δυνατό τρόπο.

Άρα:

```
[INFO] Selected Cluster Heads
[1.9989552812808853, [4.5, 3.0]]
[-2.4350497689027097, [2.9, 14.8]]
[0.008337484161566877, [3.0, 25.3]]
[2.2379551275464014, [12.0, 7.0]]
[2.5199, [10.2, 13.0]]
[0.8776067977499782, [16.0, 23.0]]
[-1.1933932022500233, [27.0, 6.0]]
[-0.4659375152513441, [26.0, 15.8]]
[-1.488204975155167, [21.0, 25.4]]
```

Εικόνα 10. Επιλογή cluster head

Κατά συνέπεια, για τη συστάδα με κέντρο το (5,5) ως CH εκλέγεται ο κόμβος (4.5,3.0) με σκορ -1.998, για τη συστάδα με κέντρο το (5,15) ως CH εκλέγεται ο κόμβος (2.9,14.8) με σκορ -2.435, για τη συστάδα με κέντρο το (5,25) ως CH εκλέγεται ο κόμβος (3.0,25.3) με σκορ 0.008, για τη συστάδα με κέντρο το (15,5) ως CH εκλέγεται ο κόμβος (12.0,7.0) με σκορ 2.237, για τη συστάδα με κέντρο το (15,15) ως CH εκλέγεται ο κόμβος (10.2,13.0) με σκορ 2.519, για τη συστάδα με κέντρο το (15,25) ως CH εκλέγεται ο κόμβος (16.0,23.0) με σκορ 0.877, για τη συστάδα με κέντρο το (25,5) ως CH εκλέγεται ο κόμβος (27.0,6.0) με σκορ -1.193, για τη συστάδα με κέντρο το (25,15) ως CH εκλέγεται ο κόμβος (26.0,15.8) με σκορ -0.465 και τέλος για τη συστάδα με κέντρο το (25,25) ως CH εκλέγεται ο κόμβος (21.0,25.4) με σκορ -1.488. Όλοι οι παραπάνω κόμβοι είχαν τη δεδομένη χρονική στιγμή τις ιδανικότερες μετρήσεις έτσι ώστε ο συνδυασμός τους να παρέχει το μεγαλύτερο αποτέλεσμα στη συνάρτηση κόστους.

Τέλος, πραγματοποιούνται οι διαδικασίες της διαπομπής από τον εκάστοτε CH για την εύρεση του επόμενου δικτύου αν αυτό κριθεί απαραίτητο. Εφόσον, οι CHs είναι πλέον γνωστοί λαμβάνεται ο ρυθμός δεδομένων για την εκάστοτε υπηρεσία σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Υπηρεσιών

	CH0	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
$B_{j,i}$ (MHz)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$C_{video,j,i}$	2.322	12.291	0.981	0.484	-	-	1.113	-	1.043
$C_{voice,j,i}$	1.625	9.045	0.687	0.339	-	1.819	0.779	0.123	0.730
$C_{iot,j,i}$	0.696	3.876	0.294	0.145	0.378	-	0.334	-	0.313
$C_{sum,j,i}$	4.644	25.843	1.963	0.969	0.378	1.819	2.227	0.123	2.087
Handover	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No

Με την εκτέλεση του κώδικα για τη δεύτερη φάση της προσομοίωσης παράγονται τα παρακάτω αποτελέσματα:



```
[INFO] Vertical Handover Execution
Cluster Head[4.5, 3]: No VHO is required
Cluster Head[27, 6]: No VHO is required
Cluster Head[12, 7]: No VHO is required
Cluster Head[10.2, 13]: Performs VHO to ['WAVE RSU 1', 40]
Cluster Head[21, 25.4]: Performs VHO to ['WiMAX Femto', 100]
Cluster Head[16, 23]: Performs VHO to ['WiMAX Femto', 100]
Cluster Head[3, 25.3]: No VHO is required
Cluster Head[2.9, 14.8]: Performs VHO to ['WiMAX Femto', 100]
Cluster Head[26, 15.8]: No VHO is required
```

Εικόνα 11. Εκτέλεση Διαπομπής

Οι κόμβοι των συστάδων με κέντρα τα (5,5), (5,10), (5,15), (25,5) και (25,25) δεν πραγματοποιούν διαπομπή διότι τη δεδομένη χρονική στιγμή αυτό δεν κρίνεται απαραίτητο. Από την άλλη πλευρά, οι κόμβοι των συστάδων με κέντρα τα (15,15), (15,25) και (25,15) πραγματοποιούν διαπομπή στην femto κυψέλη WiMAX ενώ οι κόμβοι της συστάδας (15,5) πραγματοποιούν διαπομπή στην femto κυψέλη WAVE RSU 1. Ως αποτέλεσμα, όλοι οι κόμβοι που ανήκουν στην ίδια συστάδα πραγματοποιούν διαπομπή στο δίκτυο που έχει υποδείξει ο εκάστοτε CH. Ως συνέπεια, ενημερώνεται εκ νέου το INFO\_TABLE του εκάστοτε οχήματος. Πλέον, όλες οι τιμές στο κελί που περιγράφει το τωρινό δίκτυο αντικαθίσταται με τη νέα τιμή που προκύπτει μετά την επιτυχημένη εκτέλεση του αλγόριθμου. Ο αλγόριθμος φαίνεται να λειτουργεί ικανοποιητικά διότι είναι δυνατό να προβλεφθεί πως οι συστάδες με CH τους κόμβους (4.5,3), (27,6), (12,7), (3, 25.3), και (26, 15.8) δεν απαιτούν να μεταβιβάσουν τους εαυτούς τους και τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας

## 6.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Η παρούσα αρχιτεκτονική που υλοποιήθηκε θα συγκριθεί με προηγούμενες προσεγγίσεις τόσο στο επίπεδο δημιουργίας συστάδων και εκλογής CH αλλά και επίπεδο εφαρμογής της διαπομπής.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά Προσομοίωσης

Σύμβολο	Τιμή	Περιγραφή
$h_{macro}$	1000 m	Μήκος έκτασης macro κυψέλης
$W_{macro}$	1000 m	Πλάτος έκτασης femto κυψέλης
$h_{femto}$	300 m	Μήκος έκτασης femto κυψέλης
$W_{femto}$	300 m	Πλάτος έκτασης macro κυψέλης
$u$	10-70 m/s	Μέση ταχύτητα οχήματος
$V$	50	Σύνολο οχημάτων
$P_f$	0.1	Frame Error Rate
$H_{MN\_MAG}$	1 hop	Μέση απόσταση ανάμεσα σε MN και MAG
$H_{MAG\_LMA}$	10 hops	Μέση απόσταση ανάμεσα σε MAG και LMA
$H_{MAG\_MIIS}$	10 hops	Μέση απόσταση ανάμεσα σε MAG και MIIS

$H_{MAG\_MAG}$	10 hops	Μέση απόσταση ανάμεσα σε MGA και MAG
----------------	---------	--------------------------------------

Πίνακας 3. Κόστη Σηματοδοσίας

Μήνυμα	Κόστος	Σύμβολο
MIH_Link_Going_down	78	$M_1$
MIH_Link_up	95	$M_2$
MIH_Get_Information request	1500	$M_3$
MIH_Get_Information response	1500	$M_4$
MIH_Net_HO_Candidate_Query request	$63+118n+8*m*n$	$M_5$
MIH_Net_HO_Candidate_Query response	$77+101*m$	$M_6$
MIH_N2N_HO_Query Resource request	$150+11*m$	$M_7$
MIH_N2N_HO_Query Resource response	165	$M_8$
MIH_N2N_HO_Commit request	213	$M_9$
MIH_N2N_HO_Commit response	92	$M_{10}$
MIH_N2N_HO_Commit request (Extended)	264	$M_{9e}$
MIH_N2N_HO_Commit response (Extended)	92	$M_{10e}$
MIH_Net_HO_Commit request	122	$M_{11}$
MIH_Net_HO_Commit response	103	$M_{12}$
MIH_N2N_HO_Complete request	109	$M_{13}$
MIH_N2N_HO_Complete response	112	$M_{14}$
MIH_MN_HO_Commit request	75	$M_{15}$
MIH_MN_HO_Commit response	78	$M_{16}$
AAA Query	32	$M_{17}$
AAA Reply	60	$M_{18}$
HI	72	$M_{HI}$
Hack	32	$M_{Hack}$
PBU	76	$M_{PBU}$
PBA	52	$M_{PBA}$
RS	16	$M_{RS}$
RA	64	$M_{RA}$
UNA	52	$M_{UNA}$

Το κόστος σηματοδοσίας για την απλή περίπτωση της διαπομπής μπορεί να οριστεί ως:

$$S_{SH}^1 = \frac{P_f}{1-P_f} H_{MN\_MAG} (M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_{15} + M_{16} + M_{RS} + M_{RA}) + H_{MAG\_MAG} (m(M_7 + M_8) + M_9 + M_{10} + M_{13} + M_{14}) + H_{MAG\_MIIS} (M_3 + M_4) + H_{MAG\_LMA} (3(M_{PBU} + M_{PBA}) + M_{17} + M_{18}) \quad (1)$$

Ενώ αντίστοιχα το κόστος σηματοδοσίας για το Fast Handover ορίζεται ως:

$$S_{FH}^1 = \frac{P_f}{1-P_f} H_{MN\_MAG} (M_1 + M_5 + M_6 + M_{11} + M_{12} + M_{RS} + M_{RA}) + H_{MAG\_MAG} (m(M_7 + M_8) + M_9 + M_{10} + M_{13} + M_{14} + M_{HI} + M_{Hack}) + H_{MAG\_MIIS} (M_3 + M_4) + 3H_{MAG\_LMA} (M_{PBU} + M_{PBA}) \quad (2)$$

Το κόστος σηματοδοσίας για την Enhanced Fast Proxy Mobile IPv6 ορίζεται ως:

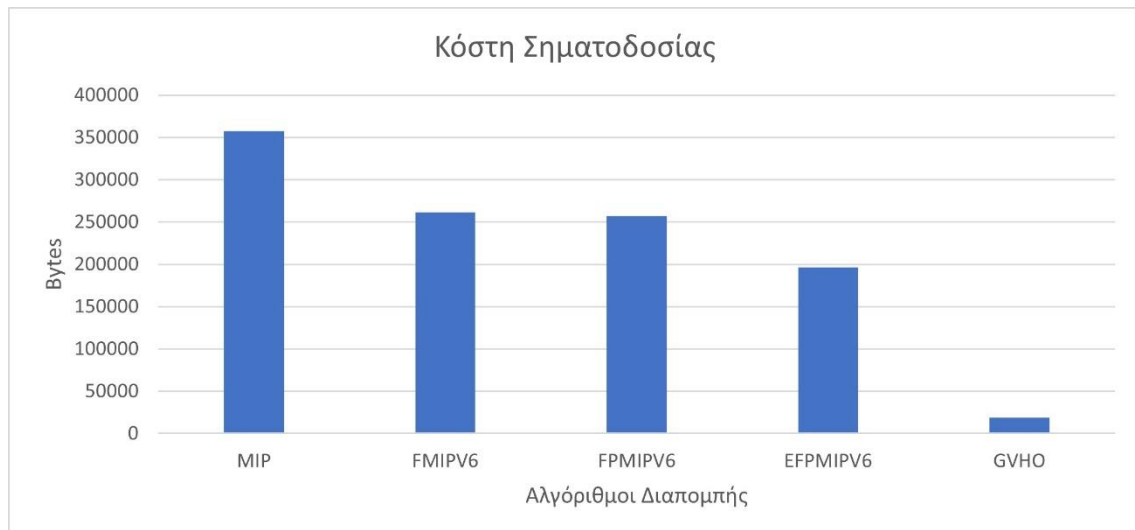
$$S_{EH}^1 = \frac{P_f}{1-P_f} H_{MN\_MAG} (M_1 + M_2 + M_5 + M_6 + M_{11} + M_{12} + M_{UNA}) + H_{MAG\_MAG} (m(M_7 + M_8) + M_{9e} + M_{10e} + M_{13} + M_{14}) + H_{MAG\_MIIS} (M_3 + M_4) + 2H_{MAG\_LMA} (M_{PBU} + M_{PBA}) \quad (3)$$

Το κόστος σηματοδοσίας για την Fast Proxy Mobile IPv6 ορίζεται ως:

$$S_{EH}^1 = \frac{P_f}{1-P_f} H_{MN\_MAG} (M_1 + M_2 + M_{11} + M_{12} + M_{UNA}) + H_{MAG\_MAG} (m(M_7 + M_8) + M_9 + M_{10} + M_{HI} + M_{HACK} + M_{13} + M_{14}) + H_{MAG\_MIIS} (M_3 + M_4) + 2H_{MAG\_LMA} (M_{PBU} + M_{PBA}) \quad (4)$$

Το κόστος σηματοδοσίας για τον προτεινόμενο GVHO ορίζεται ως:

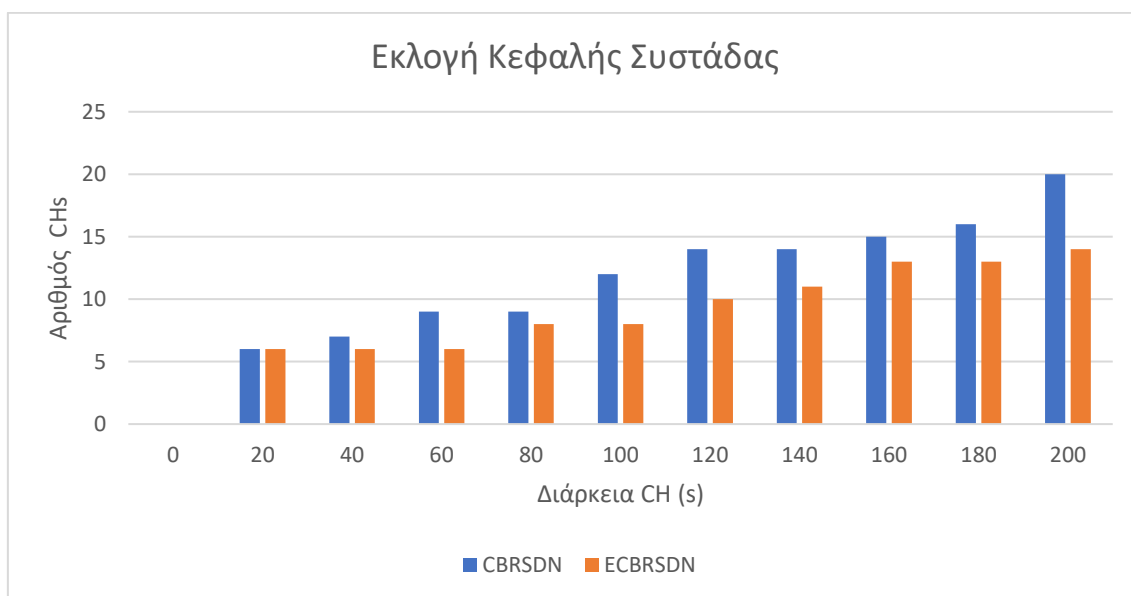
$$S_{EH}^1 = \frac{P_f}{1-P_f} H_{VEH\_MAG} (M_1 + M_{11} + M_{12} + M_{HACK} + veh(M_2 + M_{UNA})) + H_{MAG\_MAG} (m(M_7 + M_8) + M_9 + M_{10} + M_{HI} + M_{HACK} + M_{13} + M_{14}) + H_{MAG\_MIIS} (M_3 + M_4) + 2vehH_{MAG\_LMA} (M_{PBU} + M_{PBA}) \quad (5)$$



Εικόνα 12. Διάγραμμα Κόστους Σηματοδοσίας

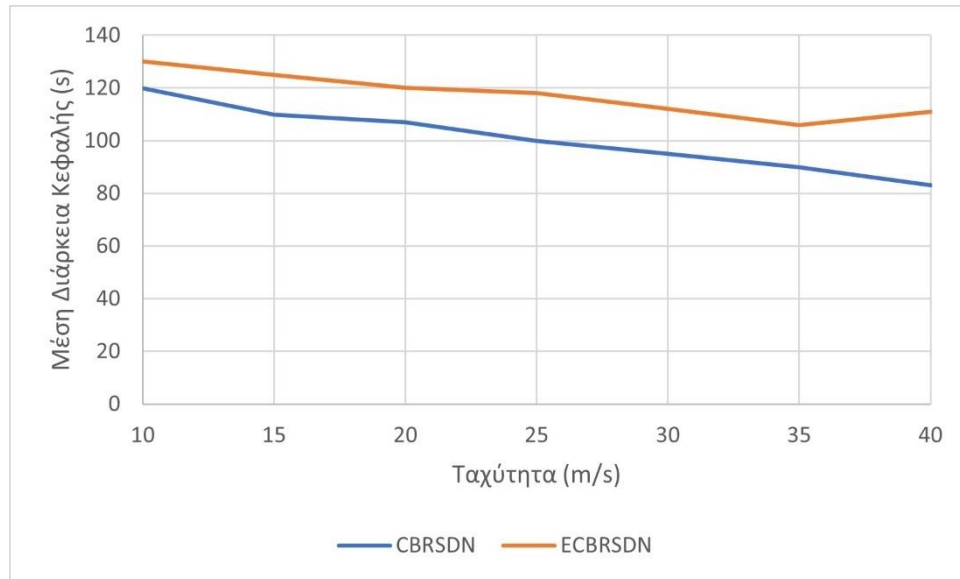
Τα κόστη στις πρώτες τέσσερις περιπτώσεις (εξισώσεις 1-4) παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιούνται για τη μεμονωμένη διαπομπή ενός χρήστη. Κάλλιιστα σε μια τοπολογία αποτελούμενη από οχηματικούς κόμβους θα μπορούσε ο καθένας σε ατομικό επίπεδο να εκτελεί διαδικασίες διαπομπής. Όμως, το κόστος αυξάνεται ραγδαία όταν συμπεριληφθούν όλοι οι κόμβοι του οχηματικού δικτύου και προκύψει το συνολικό κόστος της διαπομπής. Με τη χρήση της συσταδοποίησης και της δημιουργίας συστάδων το κόστος μειώνεται αισθητά. Όταν δημιουργηθούν οι διαφορετικές ομάδες που περιέχουν οχήματα με κοινά χαρακτηριστικά, τότε ένα όχημα από αυτά είναι υπεύθυνο για τις διαδικασίες διαπομπής. Αντί ο εκάστοτε κόμβος να ανταλλάξει όλα τα μηνύματα σηματοδοσίας με τις οντότητες, αναλαμβάνει η κεφαλή της συστάδας να ανταλλάξει όλα τα μηνύματα αρχικοποίησης, απόφασης και εκτέλεσης της διαπομπής. Τα υπόλοιπα μέλη της συστάδας ανταλλάσσουν μόνο τα μηνύματα για την εγκαθίδρυση του καναλιού επικοινωνίας και της έναρξης της λήψης και αποστολής πακέτων. Αν και η πραγματοποίηση εγγραφών για το εκάστοτε όχημα στο BCE φαίνεται να επαναλαμβάνεται πολλές φορές τόσο για την παροδική εγγραφή όσο και για την τελική, το κόστος παραμένει Ομαδική κάθετη διαπομπή με συσταδοποίηση σε οχηματικά δίκτυα ειδικού σκοπού

εξαιρετικά χαμηλό. Επιπλέον, τα μηνύματα που σε ατομικό επίπεδο φαίνεται να επιβαρύνουν το δίκτυο κορμού είναι τα MIH\_Get\_Information request και response, και τα MIH\_N2N\_HO\_Query\_Resource request και response. Στον προτεινόμενο μηχανισμό, τα παραπάνω μηνύματα εκτελούνται μόνο μια φορά από την κεφαλή της συστάδας εκ μέρους όλων των υπολοίπων μελών. Αναλυτικότερα, στο απλό πρωτόκολλο διαχείρισης της διαπομπής MIP το συνολικό μέγεθος της ανταλλαγής μηνυμάτων είναι 357680 bytes ή 0.341 megabytes. Η επόμενη τεχνολογία που διαδέχεται το MIP, το FPMIPv6 απαιτεί 261188 bytes ή 0.249 megabytes για την ολοκλήρωση των διαδικασιών διαπομπής. Η ταυτόχρονη χρήση του FPMIPv6 με το MIH χρησιμοποιεί 257312 bytes ή 0.245 megabytes ενώ η παραλλαγή του στο [] απαιτεί 196248 bytes ή 0.187 megabytes. Τέλος, ο ολοκληρωμένος μηχανισμός που προτείνεται παράγει συνολικά 18700 bytes ή 0.017 megabytes.



Εικόνα 13. Διάγραμμα Εκλογής Κεφαλής

Επίσης, πραγματοποιείται σύγκριση ως προς τη διαδικασία εκλογής κεφαλών για την εκάστοτε συστάδα μεταξύ του αρχικού αλγόριθμου CBRSDN και του προτεινόμενου ECBSDN. Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από την προσομοίωση της κίνησης των οχημάτων μέσω του λογισμικού ns3. Αναλυτικότερα, το εκάστοτε όχημα κινείται μέσα σε ένα πλέγμα και μέσω της συνάρτησης `setMobilityModel()`, στα οχήματα εκχωρείται το χαρακτηριστικό `RandomWalk2dMobilityModel` για την τυχαία κίνηση τους στο χώρο. Ο αρχικός αλγόριθμος τείνει να επιλέγει οχήματα με χαρακτηριστικά κεφαλής χωρίς να υπολογίζει τις μετρικές της ταχύτητας και της άμεσης επικοινωνίας με τα υπόλοιπα. Ως συνέπεια, οι επιλογές που γίνονται αφορούν οχήματα με μεγαλύτερη ταχύτητα από τα υπόλοιπα που τείνουν να απομακρύνονται με μεγαλύτερη ευκολία. Παράλληλα, τα ίδια οχήματα έχουν ως επί το πλείστον μικρότερα ποσοστά επιτυχημένων αποστολών και λήψεων μηνυμάτων. Ως συνέπεια, τα συγκεκριμένα οχήματα εγκαταλείπουν γρηγορότερα την συστάδα τους με τη διαδικασία επιλογής να ξεκινάει ξανά από την αρχή ως φορές κριθεί αυτό απαραίτητο. Συμπερασματικά, μέχρι τα πρώτα 200 s ο αρχικός αλγόριθμος επιλογής κεφαλής έχει εκτελεστεί 20 φορές ενώ ο αλγόριθμος που προτείνεται εκτελείται 14 φορές. Αξίζει να σημειωθεί πως ο αριθμός των συστάδων μέσα στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα έχει παραμείνει σταθερός.



Εικόνα 14. Διάγραμμα Μέσης Διάρκειας Κεφαλής

Τέλος, παρατηρείται το πως μεταβάλλεται η χρονική διάρκεια ύπαρξης της κεφαλής της συστάδας όσο η ταχύτητα μεταβάλλεται. Αναλυτικότερα, για το συγκεκριμένο πείραμα έχει χρησιμοποιηθεί η συστάδα με κέντρο (5,5) μέσα στην οποία μεταβάλλονται οι ταχύτητες των οχημάτων και καταγράφεται η διάρκεια ύπαρξης της ίδιας κεφαλής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στον αρχικό αλγόριθμο δεν λαμβάνεται υπόψη η μετρική της ταχύτητας κατά την εκλογή της κεφαλής της εκάστοτε συστάδας. Ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος τείνει να επιλέγει κεφαλές με διαφορετικές ταχύτητες από τα υπόλοιπα μέλη της συστάδας. Οι συγκεκριμένες κεφαλές πολλές φορές απομακρύνονται τελείως από τη συστάδα, ενημερώνοντας τα παιδιά CM και CH του INFO\_TABLE που διατηρούν σε 0. Αντίθετα, ο αλγόριθμος που προτείνεται λαμβάνει υπόψη την ταχύτητα των οχημάτων, παίρνοντας αποφάσεις για τη βέλτιστη επιλογή της κεφαλής. Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως η μέση διάρκεια της κεφαλής του CBRSDN μειώνεται γρηγορότερα από τον ECRSDN όσο η ταχύτητα αυξάνεται από 10 m/s σε 40 m/s

## Κεφάλαιο 7

### 7.1 Συμπεράσματα

Τα οχηματικά δίκτυα θα αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι των κινητών επικοινωνιών επόμενης γενιάς. Η πληθώρα των πόρων και των χαρακτηριστικών των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς πληρούν όλα τα κριτήρια για την υποστήριξη και εκμετάλλευση τέτοιων υποδομών, παρέχοντας μικρές καθυστερήσεις, μεγαλύτερο εύρος ζώνης και κάλυψη σε οποιαδήποτε γεωγραφική θέση. Σε ένα τέτοιο πολύπλοκο περιβάλλον που μεταβάλλεται συνεχώς, με οχήματα που επικοινωνούν τόσο με το δίκτυο που τους παρέχει υπηρεσίες όσο και μεταξύ τους καλείται να παρέχεται η κατάλληλη υποστήριξη σε διαδικασίες κινητικότητας.

Η ομαλή διεκπεραίωση διαδικασιών διαπομπής σε ένα ετερογενές περιβάλλον με δίκτυα διαφορετικών χαρακτηριστικών θεωρείται καταλυτική για την ικανοποίηση των αναγκών του εκάστοτε χρήστη. Οι υπάρχοντες αλγόριθμοι της οικογένειας του πρωτοκόλλου MIP και του MIH παρέχουν λύσεις κατά τη μεταβίβαση ενός οχήματος και κατά συνέπεια του χρήστη σε ένα δίκτυο. Η συγκεκριμένες τεχνικές όταν εφαρμόζονται ατομικά παρέχουν τα βέλτιστα αποτελέσματα στην ομαλή μετάβαση σε ένα νέο σημείο πρόσβασης, στη μείωση του αριθμού των διαπομπών και στη μείωση της απώλειας πακέτων μέχρι να εγκαθιδρυθεί και να οριστικοποιηθεί το νέο κανάλι επικοινωνίας. Όμως, η ανταλλαγή των μηνυμάτων σηματοδοσίας για την επιτυχημένη ολοκλήρωση των προαναφερθέντων ενεργειών παράγει ένα κόστος που επιβαρύνει τη ραχοκοκαλιά του δικτύου. Η χρήση των πρωτοκόλλων διαχείρισης της κινητικότητας από το Ομαδική κάθετη διαπομπή με συσταδοποίηση σε οχηματικά δίκτυα ειδικού σκοπού

εκάστοτε όχημα σε οικουμενικό επίπεδο αποτελεί τροχοπέδη στην ομαλή λειτουργία μιας τοπολογίας αποτελούμενη από δίκτυα επόμενης γενιάς. Αξιοποιώντας την αρχή της ομαδικής διαπομπής (Group Handover) επιλέγεται ένα όχημα που θα αναλάβει να εκπροσωπήσει τα υπόλοιπα στην ανταλλαγή μηνυμάτων με το σημείο πρόσβασης και τον κορμό του δικτύου. Παράλληλα, για την αποτελεσματικότερη εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου διαπομπής εφαρμόζονται αλγόριθμοι συσταδοποίησης. Αναλυτικότερα, μια περιοχή που εξυπηρετείται από κάποιο δίκτυο χωρίζεται σε συστάδες που χαρακτηρίζονται από τα οχήματα που περιέχουν. Ένα από τα οχήματα της εκάστοτε συστάδας το οποίο πληροί κριτήρια όπως η κατάλληλη ταχύτητα, η ικανοποιητική ποιότητα σήματος που λαμβάνει, το πλήθος των οχημάτων που έχει σε μικρή απόσταση γύρω του καθώς και το ποσοστό επιτυχίας των μηνυμάτων αποστολής και λήψης με αυτά επιλέγεται ως κεφαλή της συστάδας. Πλέον, η κεφαλή είναι υπεύθυνη για διαδικασίες αρχικοποίησης, επιλογής του επόμενου δικτύου και ολοκλήρωσης της διαπομπής. Παράλληλα, καλείται να κρατάει ενήμερα σε πραγματικό χρόνο τα υπόλοιπα οχήματα της συστάδας ως προς τη την επιτυχημένη ή μη φάση της διαπομπής που εκτελείται.

Καταληκτικά, το κόστος σηματοδότησης μειώνεται σημαντικά μέσα από τη μείωση του αριθμού των οχημάτων που επικοινωνούν άμεσα με τις υπόλοιπες οντότητες του δικτύου. Τα μέλη της συστάδας ανταλλάσσουν μόνο τα απαραίτητα μηνύματα εγκαθίδρυσης του νέου καναλιού κατά την ολοκλήρωση της διαπομπής, καθώς όλα τα υπόλοιπα έχουν σταλεί από την κεφαλή της συστάδας. Πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν το μειωμένο κόστος που παράγεται μετά της διαδικασίες της ομαδικής διαπομπής και της συσταδοποίησης των οχημάτων με την προσομοίωση της κίνησης τους στο περιβάλλον του Network Simulator 3 (NS3). Ταυτόχρονα, αποδεικνύεται πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος παράγει κεφαλές με μεγαλύτερη χρονική διάρκεια ύπαρξης αποτρέποντας την εκ νέου συλλογή στοιχείων από το εκάστοτε όχημα της συστάδας για την νέα εκλογή όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Άρα, ο αριθμός των κεφαλών που εκλέγονται είναι αισθητά μικρότερος οδηγώντας τη συστάδα σε μεγαλύτερη σταθερότητα.

## Βιβλιογραφία

1. Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE access*, 3, 1206-1232.
2. Bjornson, E., Van der Perre, L., Buzzi, S., & Larsson, E. G. (2019). Massive MIMO in sub-6 GHz and mmWave: Physical, practical, and use-case differences. *IEEE Wireless Communications*, 26(2), 100-108
3. Ji, H., Kim, Y., Lee, J., Onggosanusi, E., Nam, Y., Zhang, J., ... & Shim, B. (2016). Overview of full-dimension MIMO in LTE-advanced pro. *IEEE Communications Magazine*, 55(2), 176-184
4. Gao, Z., Dai, L., Mi, D., Wang, Z., Imran, M. A., & Shakir, M. Z. (2015). MmWave massive-MIMO-based wireless backhaul for the 5G ultra-dense network. *IEEE Wireless Communications*, 22(5), 13-21. Chicago
5. Adnan, N. H. M., Rafiqul, I. M., & Alam, A. Z. (2016, July). Massive MIMO for fifth generation (5G): Opportunities and challenges. In *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)* (pp. 47-52). IEEE.
6. Bilen, T., Canberk, B., & Chowdhury, K. R. (2017). Handover management in software-defined ultra-dense 5G networks. *IEEE Network*, 31(4), 49-55
7. Fan, P., Zhao, J., & Chih-Lin, I. (2016). 5G high mobility wireless communications: Challenges and solutions. *China Communications*, 13(2), 1-13. Chicago
8. Mirsadeghi, F., Rafsanjani, M. K., & Gupta, B. B. (2020). A trust infrastructure based authentication method for clustered vehicular ad hoc networks. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 1-17.
9. Elhoseny, M., & Shankar, K. (2020). Energy efficient optimal routing for communication in VANETs via clustering model. In *Emerging Technologies for Connected Internet of Vehicles and Intelligent Transportation System Networks* (pp. 1-14). Springer, Cham.
10. Shea, C., Hassanabadi, B., & Valaee, S. (2009, November). Mobility-based clustering in VANETs using affinity propagation. In *GLOBECOM 2009-2009 IEEE Global Telecommunications Conference* (pp. 1-6). IEEE.
11. Qureshi, K. N., Abdullah, A. H., Bashir, F., Iqbal, S., & Awan, K. M. (2018). Cluster-based data dissemination, cluster head formation under sparse, and dense traffic conditions for vehicular ad hoc networks. *International Journal of Communication Systems*, 31(8), e3533.
12. Zhang, D., Ge, H., Zhang, T., Cui, Y. Y., Liu, X., & Mao, G. (2018). New multi-hop clustering algorithm for vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(4), 1517-1530.
13. Ren, M., Zhang, J., Khoukhi, L., Labiod, H., & Vèque, V. (2017). A unified framework of clustering approach in vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 19(5), 1401-1414.
14. Ahizoune, A., & Hafid, A. (2012, October). A new stability based clustering algorithm (SBCA) for VANETs. In *37th annual IEEE conference on local computer networks-workshops* (pp. 843-847). IEEE.
15. Iñiguez Chavarría, J. B. (2014). LTE Handover performance evaluation based on power budget handover algorithm (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Chicago
16. Perkins, C. (2002). IP mobility support for IPv4. Chicago
17. Koodli, R. (2009). Mobile IPv6 fast handovers. Chicago
18. Devarapalli, V., Chowdhury, K., Gundavelli, S., Patil, B., & Leung, K. (2008). Proxy Mobile IPv6. Chicago
19. Koodli, R., Yokota, H., Patil, B., Chowdhury, K., & Xia, F. (2010). Fast handovers for proxy mobile ipv6. Chicago
20. Guan, J., Sharma, V., You, I., Atiquzzaman, M., & Imran, M. (2019). Extension of MIH for FPMIPv6 (EMIH-FPMIPv6) to support optimized heterogeneous handover. *Future Generation Computer Systems*, 97, 775-791. Chicago

21. De La Oliva, A., Banchs, A., Soto, I., Melia, T., & Vidal, A. (2008). An overview of IEEE 802.21: media-independent handover services. *IEEE Wireless Communications*, 15(4), 96-103. Chicago
22. Hwang, Y., & Shin, J. (2015, October). Group handover management for V2x in moving cell based LTE-Advanced system. In *2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (pp. 1054-1057). IEEE.
23. Chowdhury, M. Z., Chae, S. H., & Jang, Y. M. (2012, July). Group handover management in mobile femtocellular network deployment. In *2012 Fourth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)* (pp. 162-165). IEEE.
24. H. Anandakumar, K. Umamaheswari, and R. Arulmurugan, "A study on mobile ipv6 handover in cognitive radio networks," in *International Conference on Computer Networks and Communication Technologies*. Springer, 2019, pp. 399–408.
25. M. K. Rana, B. Sardar, S. Mandal, and D. Saha, "Implementation and performance evaluation of a mobile ipv6 (mipv6) simulation model for ns-3," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 72, pp. 1–22, 2017.
26. G. Su, P. You, and S. Yong, "Comparative handover performance analysis of mipv6 and fmipv6 in leo satellite networks," in *2017 International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC)*. IEEE, 2017, pp. 30–36.
27. S. M. Raza, D. S. Kim, D. Shin, and H. Choo, "Leveraging proxy mobile ipv6 with sdn," *Journal of Communications and Networks*, vol. 18, no. 3, pp. 460–475, 2016.
28. V. Sharma, J. Guan, J. Kim, S. Kwon, I. You, F. Palmieri, and M. Col-lotta, "Mih-sfpf: Mih-based secure cross-layer handover protocol for fast proxy mobile ipv6-iot networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 125, pp. 67–81, 2019
29. A. Michalas, A. Sgora, and D. D. Vergados, "An integrated mih-fpmipv6 mobility management approach for evolved-packet system architectures," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 91, pp. 104–119, 2017.
30. TS 24.302 (V14.3.0): Access to the 3GPP Evolved Packet Core (EPC) via non-3GPP access networks (Rel.14)," *Technical Specification*, 3GPP, 2017.
31. M. Dalla Cia, F. Mason, D. Peron, F. Chiariotti, M. Polese, T. Mahmoodi, M. Zorzi, and A. Zanella, "Mobility-aware handover strategies in smart cities," in *2017 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. IEEE, 2017, pp. 438–443
32. L. Pacheco, I. Medeiros, H. Santos, H. Oliveira, D. Rosário, E. Cerqueira, and A. Neto, "A handover algorithm for video sharing over vehicular networks," in *2019 9th Latin-American Symposium on Dependable Computing (LADC)*. IEEE, 2019, pp. 1–9P.
33. Poolnisai and R. Punalard, "Handover trigger point for high-velocity mobiles," in *2019 7th International Electrical Engineering Congress (IEECON)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
34. S. Aghabozorgi, A. Bayati, K.-k. Nguyen, C. Despina, and M. Cheriet, "Toward predictive handover mechanism in software-defined enterprise wi-fi networks," in *2019 IEEE Sustainability through ICT Summit (StICT)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
35. A. Michalas, A. Sgora, and D. D. Vergados, "An integrated mih-fpmipv6 mobility management approach for evolved-packet system architectures," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 91, pp. 104–119, 2017.
36. TS 24.302 (V14.3.0): Access to the 3GPP Evolved Packet Core (EPC) via non-3GPP access networks (Rel.14)," *Technical Specification*, 3GPP, 2017
37. H. Kumar, M. K. Singh, M. Gupta, and J. Madaan, "Moving towards smart cities: solutions that lead to the smart city transformation framework," *Technological forecasting and social change*, Elsevier, vol. 153, p. 119281, 2020.
38. S. Kapoor, D. Grace, and T. Clarke, "A base station selection scheme for handover in a mobility-aware ultra-dense small cell urban vehicular environment," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
39. M. B. Brahim, Z. H. Mir, W. Znaidi, F. Filali, and N. Hamdi, "Qos-aware video transmission over hybrid wireless network for connected vehicles," *IEEE access*, vol. 5, pp. 8313–8323, 2017
40. I. Kosmopoulos, E. Skondras, A. Michalas and D. D. Vergados, "An Efficient Mobility Management Scheme for 5G Network Architectures," *2020 5th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media*



Conference (SEEDA-CECNSM), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEEDA-CECNSM49515.2020.9221842.

41. Sahu, R., Chaurasia, K. K., & Gupta, A. K. (2020, July). SINR and Rate Coverage of Broadcast Networks using Stochastic Geometry. In *2020 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)* (pp. 1-5). IEEE.

## Παράρτημα Α

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import math
```

```
class Vehicle:
```

```
    networks = [{"LTE-A Pro Macro", 124.9}, # [Network, Csum for video, voice, IoT]
                ["WAVE RSU 1", 40],
                ["WAVE RSU 2", 40],
                ["LTE Femto", 15.6],
                ["WiMAX Femto", 100]
                ]
```

```
    # Qos constraints  $C_{i,j}$  for video, voice, IoT
    thresholds = [0.945, 0.661, 0.283]
```

```
    def __init__(self, speed, position, current_network, cluster_member, cluster_head,
VID):
```

```
        self.speed = speed
        self.position = position
        self.current_network = current_network
        self.cluster_member = cluster_member
        self.cluster_head = cluster_head
        self.VID = VID
```

```
def cluster_head_election(self):
    self.cluster_head = 1
    print(self.cluster_head)

def vertical_handover(self, cluster_members, qos_constraints, speedCH, current_net):
    total_thresh = 0
    list_thresh = []

    total_qos_constraints = [[] for z in range(9)]

    for thresh in range(len(self.thresholds)):
        total_thresh += self.thresholds[thresh]
    list_thresh.append(total_thresh)

    for val in range(len(qos_constraints)):
        a = 0

        for v in range(len(qos_constraints[val])):
            a += qos_constraints[val][v]
        total_qos_constraints[val].append(a)

    for i in range(len(cluster_members)):
        if total_qos_constraints[i] < list_thresh:
            if speedCH[i] > 50:
                self.networks.pop()
                if current_net[i] == "LTE-A Pro Macro":
                    self.networks.pop(0)
                elif current_net[i] == "WAVE RSU 1":
                    self.networks.pop(1)
                elif current_net[i] == "LTE Femto":
                    self.networks.pop(2)
```

```

elif current_net[i] == "WAVE RSU 2":
    self.networks.pop(3)
else:
    if current_net[i] == "LTE-A Pro Macro":
        self.networks.pop(0)
    elif current_net[i] == "WAVE RSU 1":
        self.networks.pop(1)
    elif current_net[i] == "LTE Femto":
        self.networks.pop(2)
    elif current_net[i] == "WAVE RSU 2":
        self.networks.pop(3)
    elif current_net[i] == "WiMAX Femto":
        self.networks.pop(4)
self.current_network = max(self.networks, key=lambda n: n[1])
print("Cluster Head"+str(cluster_members[i])+": Performs VHO to"
      " "+str(max(self.networks, key=lambda n: n[1])))

self.networks = [{"LTE-A Pro Macro", 124.9},
                 ["WAVE RSU 1", 40],
                 ["WiMAX Femto", 100],
                 ["WAVE RSU 2", 40],
                 ["LTE Femto", 15.6]
                 ]

else:
    print("Cluster Head"+str(cluster_members[i])+": No VHO is required")

```

```
vehicles = []
```

```
positions_x = np.empty((0, 1), np.float64)
```

```
positions_y = np.empty((0, 1), np.float64)
```

```
centroids = np.empty((0, 2), np.float64)
```

```
step = 10
```

```
vehicles.append(Vehicle(50, [15.9, 3], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id01"))  
vehicles.append(Vehicle(54, [16, 2], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id02"))  
vehicles.append(Vehicle(60, [4.5, 3], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id03"))  
vehicles.append(Vehicle(55, [8, 6], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id04"))  
vehicles.append(Vehicle(47, [6, 6], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id05"))  
vehicles.append(Vehicle(50, [7, 6], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id06"))  
vehicles.append(Vehicle(52, [18, 5.7], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id07"))  
vehicles.append(Vehicle(60, [27, 6], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id08"))  
vehicles.append(Vehicle(63, [12, 7], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id09"))  
vehicles.append(Vehicle(60, [2, 8], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id010"))  
vehicles.append(Vehicle(51, [13, 9], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id011"))  
vehicles.append(Vehicle(50, [24, 24.5], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id012"))  
vehicles.append(Vehicle(50, [3, 9], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id013"))  
vehicles.append(Vehicle(62, [2, 9], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id014"))  
vehicles.append(Vehicle(60, [3, 8], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id015"))  
vehicles.append(Vehicle(50, [4, 23], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id016"))  
vehicles.append(Vehicle(51, [5.9, 24], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id017"))  
vehicles.append(Vehicle(61, [10.2, 13], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id018"))  
vehicles.append(Vehicle(50, [6.8, 12], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id019"))  
vehicles.append(Vehicle(50, [21, 25.4], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id020"))  
vehicles.append(Vehicle(50, [22, 28], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id021"))  
vehicles.append(Vehicle(51, [23, 21.6], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id022"))  
vehicles.append(Vehicle(58, [14, 15.2], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id023"))  
vehicles.append(Vehicle(58, [13, 12], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id024"))  
vehicles.append(Vehicle(60, [16, 23], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id025"))  
vehicles.append(Vehicle(62, [3, 25.3], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id026"))
```

```
vehicles.append(Vehicle(50, [4, 25.3], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id027"))
vehicles.append(Vehicle(55, [12, 29], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id028"))
vehicles.append(Vehicle(60, [20.3, 4], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id029"))
vehicles.append(Vehicle(50, [22, 11], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id030"))
vehicles.append(Vehicle(43, [2, 14], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id031"))
vehicles.append(Vehicle(48, [2.9, 14.8], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id032"))
vehicles.append(Vehicle(60, [26, 15.8], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id033"))
vehicles.append(Vehicle(50, [26.7, 14.8], "LTE-A Pro Macro", 0, 0, "id034"))
```

```
plt.xlabel('Macro Cell Range')
```

```
plt.ylabel('Macro Cell Range')
```

```
# A = num_of_vehicles * cluster_per
```

```
for i in range(0, 31, step):
```

```
    plt.axvline(x=i)
```

```
    plt.axhline(y=i)
```

```
# upologismos toy kentroy gia kathe cluster
```

```
for i in range(0, 29, step):
```

```
    for j in range(0, 29, step):
```

```
        centroids = np.append(centroids, np.array([[step / 2.0 + i, step / 2.0 + j]]), axis=0)
```

```
centroid_x, centroid_y = centroids.T
```

```
plt.scatter(centroid_x, centroid_y, s=2)
```

```
# eisagogi oximatwn sta clusters
```

```
for obj in vehicles:
```

```
    positions_x = np.append(positions_x, np.array([[obj.position[0]]]))
```

```
    positions_y = np.append(positions_y, np.array([[obj.position[1]]]))
```

```
plt.scatter(positions_x, positions_y, marker='x')

plt.xlim([0, 30])
plt.ylim([0, 30])

total_dist = []

# create clusters
for i in range(30):
    for j in range(9):
        dist = (positions_x[i] - centroid_x[j]) ** 2 + (positions_y[i] - centroid_y[j]) ** 2
        dist = math.sqrt(dist)
        total_dist.append(dist)

    print('Distance of Vehicle in Position ' + '(' + str(positions_x[i]) + ',' +
str(positions_y[i]) + ') ' +
        ' from Cluster Centre ' +
        '(' + str(centroid_x[j]) + ',' + str(centroid_y[j]) + ') ' +
        ': ' + str(dist))

print("Minimum Distance: " + str(min(total_dist)))
total_dist.clear()
print('\n')

# update toy info table twm oximatwn
# for obj in vehicles[0]:
#     obj.cluster_member = 1
#     obj.cluster_members.append(obj.VID)

plt.xticks([])
plt.yticks([])
plt.show()
```

```
clusters = np.array([[[[4.5, 3.0], [8.0, 6.0], [6.0, 6.0], [7.0, 6.0], [2.0, 8.0], [3.0, 9.0], [2.0,
9.0], [3.0, 8.0]],
[[6.8, 12.0], [2.0, 14.0], [2.9, 14.8]],
[[4.0, 23.0], [5.9, 24.0], [3.0, 25.3], [4.0, 25.3]],
[[15.9, 3.0], [16.0, 2.0], [18.0, 5.7], [12.0, 7.0], [13.0, 9.0]],
[[10.2, 13.0], [14.0, 15.2], [13.0, 12.0]],
[[16.0, 23.0], [12.0, 29.0]],
[[27.0, 6.0], [20.3, 4.0]],
[[22.0, 11.0], [26.0, 15.8], [26.7, 14.8]],
[[24.0, 24.5], [21.0, 25.4], [22.0, 28.0], [23.0, 21.6]]])
```

```
cluster_rss = [[-70, -68, -63, -69, -72, -73, -74, -67],
[-74, -71, -72],
[-72, -73, -74, -72],
[-63, -62, -65, -67, -68],
[-58, -54, -59],
[-62, -64],
[-72, -75],
[-69, -72, -73],
[-72, -69, -70, -71]]
```

```
cluster_sumEXTij = [[9.976, 9.406, 9.262, 9.224, 9.456, 9.573, 9.38, 9.363],
[3.41, 5.23, 5.18],
[4.477, 4.891, 4.687, 4.741],
[6.532, 5.927, 6.187, 6.258, 6.328],
[3.333, 3.214, 3.279],
[2.18, 2.18],
[2.61, 2.61],
[4.68, 4.02, 4.36],
[5.526, 4.366, 4.391, 5.609]]
```



```
cluster_speed = [  
    [60, 55, 47, 50, 60, 50, 62, 60],  
    [50, 43, 48],  
    [50, 51, 62, 50],  
    [50, 54, 52, 63, 51],  
    [61, 58, 58],  
    [60, 55],  
    [60, 60],  
    [50, 60, 50],  
    [50, 50, 50, 51]  
]  
  
direction = [  
    [4, 4, 4, 4, 2, 2, 1, 1],  
    [3, 3, 3],  
    [4, 4, 4, 4],  
    [4, 4, 4, 4, 1],  
    [2, 2, 1],  
    [2, 2],  
    [1, 1],  
    [3, 3, 3],  
    [3, 3, 3, 1]  
]  
  
distances = [[] for i in range(len(centroids))]  
  
for i in range(len(centroids)):  
    for j in range(len(clusters[i])):  
        distances[i].append(np.linalg.norm(centroids[i] - clusters[i][j]))  
  
print(distances)
```

```
scores = [[] for i in range(len(clusters))]

for i in range(len(clusters)):

    for j in range(len(cluster_rss[i])):

        scores[i].append([distances[i][j] * 0.1 + cluster_rss[i][j] * 0.2 +
cluster_sumEXTij[i][j]
            * 0.3 + direction[i][j] * 0.2 +
            cluster_speed[i][j] * 0.2, clusters[i][j]])

print('\n')

print("[INFO] Score of each Vehicle")

print(*scores, sep='\n')

print('\n')

print("[INFO] Selected Cluster Heads")

max_scores = []

for i in range(len(scores)):

    max_scores.append(max(scores[i]))

    print(str(max(scores[i])))

qos_constraints = [
    [2.322, 1.625, 0.696],
    [12.291, 9.045, 3.876],
    [0.981, 0.687, 0.294],
```

```
[0.484, 0.339, 0.145],  
[0, 0, 0.378],  
[0, 1.819, 0],  
[1.113, 0.779, 0.334],  
[0, 0.123, 0],  
[1.043, 0.730, 0.313]  
]
```

```
for i in range(9):
```

```
    max_scores[i].pop(0)
```

```
b = []
```

```
s = []
```

```
c = []
```

```
for veh in vehicles:
```

```
    a = [veh.position]
```

```
    if a in max_scores:
```

```
        print(veh.position)
```

```
        b.append(veh.position)
```

```
        s.append(veh.speed)
```

```
        c.append(veh.current_network)
```

```
print("\n")
```

```
print("[INFO] Vertical Handover Execution")
```

```
veh.vertical_handover(b, qos_constraints, s, c)
```

```
for obj in vehicles:
```

```
    print(obj.current_network)
```