ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Εκτίμηση ταχύτητας κινητών τερματικών βάσει τεχνικών αναγνώρισης προτύπου σήματος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεόδωρος, Σ. Σταμουλακάτος

Αθήνα, Απρίλιος 2005

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Εκτίμηση ταχύτητας κινητών τερματικών βάσει τεχνικών αναγνώρισης προτύπου σήματος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεόδωρος Σ. Σταμουλακάτος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ευστάθιος, Δ. Συκάς
Μιλτιάδης, Ε. Αναγνώστου
Μιχάλης, Ε. Θεολόγου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 21η Απριλίου 2005.

..... Ε. Συκάς Καθηγητής ΕΜΠ	..... Μ. Αναγνώστου Καθηγητής ΕΜΠ	..... Μ. Θεολόγου Καθηγητής ΕΜΠ
..... Ε. Πρωτονοτάριος Καθηγητής ΕΜΠ	..... Φ. Κωσταντίνου Καθηγητής ΕΜΠ	..... Γ. Στασινόπουλος Καθηγητής ΕΜΠ
	..... Π. Δεμέστιχας Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς	

Αθήνα, Απρίλιος 2005

.....

Θεόδωρος Σ. Σταμουλακάτος

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Θεόδωρος, Σ. Σταμουλακάτος, 2005.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η γνώση της θέσης κινητού τερματικού, είναι πληροφορία στρατηγικής σημασίας για τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Ένας από τους αποτελεσματικότερους τρόπους εξατομίκευσης των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, βασίζεται στη γνώση της θέσης του Κινητού Τερματικού (ΚΤ). Η χρήση αυτής της πληροφορίας κάνει δυνατή την παροχή στο χρήστη πρωτοποριακών υπηρεσιών διαφόρων τύπων, όπως, Υπηρεσίες βασισμένες στον Προσδιορισμό της Θέσης κινητού τερματικού (ΥΠΘ). Δίνεται με αυτό το τρόπο η δυνατότητα στον πάροχο, να προσφέρει εξατομικευμένες υπηρεσίες, αυξάνοντας τη βάση των συνδρομητών του, το οποίο έχει ως συνέπεια αυξημένη αποδοτικότητα σε κέρδος.

Στην παρούσα διατριβή, επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας σε μια συγκεκριμένη τάξη ΥΠΘ, η οποία είναι η Υπηρεσία Κυκλοφοριακής Κίνησης (ΥΚΚ). Παρουσιάζουμε ένα καινοτόμο σύστημα εκτίμησης κυκλοφοριακής κίνησης οδικού δικτύου, βασισμένο στα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Κίνητρο για την έρευνα αυτή ήταν το αυξημένο κόστος τεχνικών για τη συλλογή, αναγωγή και έκθεση στοιχείων κυκλοφοριακής κίνησης οχημάτων. Βασική αδυναμία αυτών των τεχνικών είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης. Κατά τη δική μας προσέγγιση, κάνουμε χρήση της σηματοδοσίας, η οποία ανταλλάσσεται σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα εκτός του σχεδόν μηδενικού κόστους εγκατάστασης, το χαμηλό κόστος συντήρησης.

Το προτεινόμενο σύστημα συνδυάζει τεχνικές αναγνώρισης προτύπου σήματος σε μετρήσεις σήματος κινητής τηλεφωνίας και πιο συγκεκριμένα πληροφορία από τις διεπαφές Abis/Iub των δικτύων GSM και UMTS αντίστοιχα. Η επεξεργασία των παραπάνω μετρήσεων γίνεται με τη χρήση Κρυφών Μαρκοβιανών Αλυσίδων, καθώς και τεχνικών κατάτμησης. Τα ακριβή αποτελέσματα, εξετάζοντας μεμονωμένα ερευνητικά οχήματα, δείχνουν τις δυνατότητες της προσέγγισής μας, κατά την εφαρμογή της σε μεγάλη κλίμακα ΚΤ, προκειμένου να προσδιοριστεί η κυκλοφοριακή κίνηση σε κεντρικές οδικές αρτηρίες της πόλης, παρέχοντας με αυτό το τρόπο εφαρμογές ΥΚΚ σε χρήστες ΚΤ.

Λέξεις Κλειδιά: Υπηρεσίες βασισμένες στον Προσδιορισμό της Θέσης Κινητού Τερματικού, Τεχνικές Αναγνώρισης Προτύπου, Μοντέλο Κρυφών Μαρκοβιανών Αλυσίδων, Κατάτμηση, Μοντελοποίηση Διάδοσης Σήματος, Μοντελοποίηση Κίνησης Οδικού Δικτύου, GSM, GPRS, UMTS.

Abstract

Location is a strategic asset of cellular network providers. One of the most powerful ways to personalize mobile services, is based on location of Mobile Terminal (MT). By utilizing this information, the user is able to experience value-added services of various types, like Location Based Services (LBS). In that way, the cellular network provider is able to offer differential services, increasing by that way its subscribers base, which results in increased profitability.

In the present dissertation we have focused on a particular class of LBS, which is Traffic Information Service (TIS). An innovative system for road traffic load estimation is presented, based on existing cellular network infrastructure.

The motivation for this research stems from the high implementation cost of techniques for collection, reduction and reporting of travel time data. The basic weakness of these techniques is their high implementation cost. In our approach, we make use of the signaling, that is exchanged in cellular networks. This results in very low implementation cost, as well as low maintenance cost.

The proposed approach combines signal pattern recognition techniques on signal strength measurements and more precisely, information extracted from Abis/Iub interfaces of GSM and UMTS, respectively. The processing of the last mentioned measurements, takes place with the use of Hidden Markov Modeling (HMM), as well as with clustering techniques. The accurate results, while examining probe vehicles, show the potential of our approach, when applied to large scale of MTs, in order to estimate basic parameters for road traffic load estimation, offering in that way applications of TIS to MT users.

Keywords: Location Based Services, Pattern Recognition, Hidden Markov Model, Clustering, Propagation Modeling, Road Traffic Modeling, GSM, GPRS, UMTS.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ 13

ΠΡΟΛΟΓΟΣ 17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 21

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 21

1.1. Υπηρεσίες βασιζόμενες στη θέση Κινητού Τερματικού 21

1.2. Διατύπωση του προβλήματος 22

1.3. Ορισμός του προβλήματος 23

1.4. Αρχές Κινητής Επικοινωνίας 25

1.4.1. GSM 27

1.4.2. GPRS 28

1.4.3. UMTS 29

1.4.4. Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4ης γενιάς 30

1.4.5. Ενεργά Δίκτυα 32

Παραπομπές 34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 37

ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 37

2.0. Εισαγωγή 37

2.1. Παρακολούθηση Κίνησης και Πρόγνωση 38

2.1.1. Τεχνική Δοκιμαστικού Οχήματος 38

2.1.2. Τεχνικές Σύγκρισης Πινακίδων 39

2.1.3. Τεχνικές Ερευνητικών Οχημάτων 40

2.2. Μέθοδοι Προσδιορισμού Θέσεως Κινητού Τερματικού 43

2.2.1.Αναγνώριση Ταυτότητας Κυψέλης 45

2.2.2. Ισχύς Λαμβανομένου Σήματος 46

2.2.3. Γωνία Λήψης Σήματος 47

2.2.4. Μέθοδος Χρονικής Διαφοράς Αφίξεως Σήματος Ανερχόμενης Ζεύξης 48

2.2.5. Χρονικές Διαφορές Κατερχόμενης Ζεύξης 49

2.2.6. Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσεως (GPS) 51

2.2.6.1. Συμβατικό GPS 51

2.2.6.2. Υποβοηθούμενο GPS (A-GPS) 53

2.2.6.3. Άλλα συστήματα δορυφορικού προσδιορισμού θέσεως 53

2.2.7. Υβριδικές Μέθοδοι 55

2.2.7.1. CGI + TA / CGI+ RTT 55
2.2.7.2. Angle of Arrival + Round Trip Time (AOA+RTT) 55
2.2.7.3. OTDOA + AOA 56
2.2.7.4. A-GPS + CGI ή E-OTD / OTDOA 56
2.2.8. Συσχετισμός Βάσεως 57
2.2.8.1. ΜΣΒ (Μέθοδος Συσχετισμού Βάσεως) 58
2.2.8.2. Αναγνώριση Πρότυπου Σήματος 59
2.2.8.3. Μέθοδος Σύγκρισης Προτύπου (RadioCamera) 59
2.3. Μέθοδοι Προσδιορισμού Ταχύτητας Κινητού Τερματικού 60
2.3.1. Εισαγωγή 60
2.3.2. Βιβλιογραφική αναφορά μεθόδων εκτίμησης ταχύτητας Κινητού Τερματικού 60
2.3.3. Στιγμιαία συχνότητα λαμβανομένου σήματος (Instantaneous Frequency) 65
2.3.4. Μετατοπίσεις Doppler 67
2.3.5. Στατιστικές αναπαραστάσεις κατά τη μοντελοποίηση διάδοσης 68
2.3.5.1. Ρυθμός Υπέρβασης Στάθμης (LCR) 68
2.3.5.2. Μέση Διάρκεια Διάλειψης (AFD) 69
Παραπομπές 70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 75
3.0. Εισαγωγή 75
3.0.1. Φιλτράρισμα με τη χρήση τεχνικής HMM (Hidden Markov Models) 76
3.0.2. Φιλτράρισμα με τη χρήση τεχνικής Kalman 76
3.1. Μοντέλα Κρυφών Μαρκοβιανών Αλυσίδων (HMM) 76
3.1.1. Λύση στο πρόβλημα αξιολόγησης 79
3.1.2. Λύση στο πρόβλημα αποκωδικοποίησης 80
3.1.3. Λύση στο πρόβλημα εκμάθησης / εκτίμησης 82
3.1.3.1. Ο αλγόριθμος Baum-Welch 82
3.1.3.2. Ο αλγόριθμος Segmental K-Means 85
3.2. Μέθοδοι Κατάτμησης / Ομαδοποίησης 86
3.2.1. K-Means 87
3.2.2. Fuzzy C Means 88
3.2.3. PAM 90
3.2.4. CLARA 93
3.2.3.Τεχνικές κατάτμησης χρησιμοποιούμενες στο HMM πρότυπο (μέτρο απόκλισης KL) 94
3.2.4. Κατάτμηση των ακολουθιών μέτρησης RSS από τα επεξεργαζόμενα στοιχεία (ιδιότητα KL) 95

3.2.5. Διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων Baum-Welch και Segmental K-means (σε σχέση με τις τιμές πιθανότητας) 98

Παραπομπές *100*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 103

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ 103

4.0. Εισαγωγή *103*

4.1. Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους του μοντέλου σύμφωνα με τον πάροχο κινητής τηλεφωνίας *103*

4.2. Έρευνα που έχει διεξαχθεί μέχρι σήμερα *107*

4.2.1. Κατανομή καθημερινών κλήσεων και όγκου κίνησης οδικού δικτύου 107

4.2.2. Ανίχνευση περιστατικών και πλήθος κλήσεων 109

4.3. Πλήθος μετρήσεων που απαιτούνται για το χαρακτηρισμό οδικού δικτύου *111*

4.4. Χαρακτηρίζοντας το δείγμα των υπαρχόντων οχημάτων *112*

4.4.1. Κατανομή συσκευών μεταξύ του πληθυσμού των οδηγών 112

4.4.2. Κατανομή συσκευών σε σχέση με το σκοπό μετακίνησης 113

4.4.3. Κατανομή συσκευών σε σχέση με το τύπο του οχήματος 114

4.5. Μοντελοποίηση κίνησης οδικού δικτύου και εκτίμηση των παραμέτρων κίνησης *115*

4.5.1. Προτεινόμενα μοντέλα κίνησης 115

4.5.1.1. Προτεινόμενο μοντέλο κίνησης οχήματος 115

4.5.1.2. Προτεινόμενο μοντέλο κίνησης οδικού δικτύου 119

4.5.2. Ποσοτικές τεχνικές 127

4.5.2.1. Δοκιμή "Χι τετράγωνο" 128

4.5.2.1.1. Εξέταση για τη διανεμητική επάρκεια 128

4.5.2.1.2. Ορισμός 128

4.5.2.2. Δοκιμή Kolmogorov-Smirnov 129

4.5.2.2.1. Εξέταση για τη διανεμητική επάρκεια 129

4.5.2.2.2. Χαρακτηριστικά και Περιορισμοί της δοκιμής K-S 130

4.5.2.2.3. Ορισμός 130

4.5.2.3. Δοκιμή Anderson-Darling 131

4.5.2.3.1. Εξέταση για τη διανεμητική επάρκεια 131

4.5.2.3.2. Ορισμός 131

4.5.2.4. Δοκιμή Shapiro-Wilk 131

4.5.2.4.1. Shapiro-Wilk test for normality 131

4.5.2.4.2. Ορισμός 132

4.5.2.5. Μετρήσεις της Κεντρικής Τάσης (χρήση του αρμονικού μέσου όρου) 132

Παραπομπές *133*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ..... **135**

ΣΗΜΑΤΟΔΟΣΙΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ 135

5.0. Εισαγωγή *135*

5.1. Σηματοδοσία (αρχή της μεθόδου εξέτασης των διεπαφών Abis/A) *136*

5.1.1. Διεπαφή μεταξύ BSC – BTS: Η διεπαφή Abis 136

5.1.2. Διεπαφή μεταξύ MSC – BSS: Η διεπαφή A 137

5.1.3. Χαρακτηριστικά της πληροφορίας προερχόμενης από τις διεπαφές στο GSM 138

5.2. Σηματοδοσία (αρχή της μεθόδου εξέτασης της διεπαφής Iub) *138*

5.2.1. Γενικές Αρχές των διεπαφών στο UTRAN 139

5.2.2. Η διεπαφή Iub 139

5.2.2.1. Συνδυασμός μακρο-πολυπλοκότητας πλοκάδων ραδιο-πλαισίων 139

5.2.2.2. Έλεγχος τοπολογίας συνδυασμού/διαχωρισμού μακρο-πολυπλοκότητας 139

5.2.2.3. Απόφαση ήπιας διαπομπής 140

5.2.2.4. Χειρισμόςτων υλικών πόρων του Node B 140

5.2.3. Χαρακτηριστικά της πληροφορίας προερχόμενης από τις διεπαφές στο UMTS 140

5.3. RSSI Διάνυσμα *141*

5.4. Περιβάλλον Διάδοσης *144*

5.4.1. Χάρτης Ραδιοκάλυψης 145

5.4.2. Μοντελοποίηση διάδοσης σήματος 146

5.4.2.1. Μοντέλο Okumura-Hata 147

5.4.2.2. Μοντέλο COST-Hata 148

5.4.2.3. Μοντέλο για οδούς με συνθήκες διάδοσης LOS 149

5.4.2.4. Μοντέλο για οδούς κάθετες στην οδό με συνθήκες διάδοσης LOS 150

5.4.2.5. Μοντέλο για οδούς παράλληλες στην οδό με συνθήκες διάδοσης LOS 151

Παραπομπές *152*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ..... **155**

ΣΧΗΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 155

6.0. Εισαγωγή *155*

6.1. Σχήμα εκτίμησης κυκλοφοριακής κίνησης *155*

6.2. Αποτελέσματα *159*

6.2.0. Κλάσεις ταχύτητας 159

6.2.0.1. Δίκτυο GSM 160

6.2.0.2. Δίκτυο UMTS 161

6.2.1. Προσομοίωση κίνησης ερευνητικού οχήματος 162

6.2.1.1. Χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης (αστικό περιβάλλον) 163

6.2.1.1.1. Χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης (αστικό περιβάλλον – GSM δίκτυο)....164
6.2.1.1.2. Χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης (αστικό περιβάλλον – UMTS δίκτυο)....169
6.2.1.2. Χρήση μοντέλου διάδοσης σήματος (αστικό περιβάλλον – GSM δίκτυο)....173
6.2.1.3. Χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης (μη αστικό περιβάλλον – GSM δίκτυο)....177
6.2.1.4. Χρήση μοντέλου διάδοσης σήματος (μη αστικό περιβάλλον – GSM δίκτυο)....181
6.2.1.5. Συμπεράσματα....185
6.2.2. Επάρκεια πλήθους οχημάτων....187
6.2.2.1. Gaussian κατανομή ταχύτητας....188
Περίπτωση 1: ελεύθερη ροή κίνησης και στις δύο λωρίδες....189
Περίπτωση 2 : χαμηλή ροή κίνησης και στις δύο λωρίδες....190
Περίπτωση 3: ελεύθερη ροή κίνησης στη μία λωρίδα και χαμηλή ροή κίνησης στην άλλη λωρίδα - διαφορές στην εκτίμηση της τιμής ταχύτητας για την αργή λωρίδα....191
6.2.2.2. Δίπλευρη (two-sided) Poisson κατανομή ταχύτητας....192
Περίπτωση 1: ελεύθερη ροή κίνησης και στις δύο λωρίδες....193
Περίπτωση 2: χαμηλή ροή κίνησης και στις δύο λωρίδες....194
Περίπτωση 3: ελεύθερη ροή κίνησης στη μία λωρίδα και χαμηλή ροή κίνησης στην άλλη λωρίδα - διαφορές στην εκτίμηση της τιμής ταχύτητας για την αργή λωρίδα....195
6.2.3. Εξαγωγή αναφορών για κίνηση οδικού δικτύου....196
6.2.3.1. Επαλήθευση μοντελοποίησης κίνησης με τη χρήση πραγματικών δεδομένων....196
6.2.3.2. Επαλήθευση μοντελοποίησης κίνησης με τη χρήση δεδομένων προσομοίωσης....196
6.2.3.2.1. Αστικό περιβάλλον (σενάριο 1) – πραγματικά στοιχεία....197
6.2.3.2.2. Αστικό περιβάλλον (σενάριο 2) –στοιχεία προσομοίωσης (πρώτη οδός)....199
6.2.3.2.3. Αστικό περιβάλλον (σενάριο 3) –στοιχεία προσομοίωσης (δεύτερη οδός)....201
6.2.3.2.4. Μη αστικό περιβάλλον (σενάριο 4) –στοιχεία προσομοίωσης....203
6.2.4. Δοκιμή της μεθόδου με χρήση πραγματικών δεδομένων (Vodafone Pilotentwicklung GmbH)....205
6.2.4.1. Δομή των στοιχείων....206
6.2.4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης....209
Παραπομπές....*212*
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7....**213**
7.0. Εισαγωγή....*213*
7.1. Περαιτέρω Έρευνα....*214*
7.1.1. Επεκτείνοντας τη μελέτη μας σε περιβάλλον WCDMA....214
7.1.2. ΚΤ σε κατάσταση ανενεργούς σύνδεσης....215
7.1.3. Διανύσματα σήματος πολλών διαστάσεων....215
7.1.4. Αυξάνοντας την ακρίβεια του μοντέλου....216
7.1.4.1. Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας....216

7.1.4.2. Οδικό δίκτυο 217

7.1.5. Βελτιστοποίηση της εκτίμησης των παραμέτρων του Μαρκοβιανού μοντέλου 218

Παραπομπές *219*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 221

Α. Αναλυτικό Μοντέλο *221*

Α.1.Ορισμοί 221

Α.2. Αποτελεσματικότητα της Διαδικασίας Δειγματοληψίας 221

Β1. Αποτελέσματα (παράγραφος 6.2.0.1.) *224*

Β2. Αποτελέσματα (παράγραφος 6.2.0.1.) *224*

Γ. GSM/UMTS – Τεχνικά Δεδομένα *225*

Δ. Κωδικοποίηση της προσομοίωσης *227*

Πρώτο στάδιο: 227

Δεύτερο στάδιο: 229

Τρίτο στάδιο: 230

Τέταρτο στάδιο: 240

Πίνακας Ακρωνυμίων

2G	Second Generation of wireless communication systems
3G	Third Generation of wireless communication systems
A-GPS	Assisted Global Positioning System
AOA	Angle Of Arrival
AUC	Authentication Center
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BCCH	Broadcast Control CHannel
BER	Bit Error Ratio
BLER	Block Error Ratio
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BSIC	Base Station Identity Code
BSS	Base Station Sub-system
BSSAP	BSS Application Part
BSSMAP	BSS Management Application Part
BSSOMAP	BSS Operation and Maintenance Application Part
BTS	Base Transceiver Station
BTSM	BTS Management
CCH	Control Channel
CDMA	Code Division Multiple Access
CA	Capacity Allocation
CAA	Capacity Allocation Acknowledgement
CBR	Constant Bit Rate
CCCH	Common Control Channel
CCPCH	Common Control Physical Channel
CCTrCH	Coded Composite Transport Channel
CD	Capacity De-allocation
CDA	Capacity De-allocation Acknowledgement
CDMA	Code Division Multiple Access
CI	Cell Identity
CM	Connection Management
CN	Core Network
CTDMA	Code Time Division Multiple Access
CRC	Cyclic Redundancy Check
DCA	Dynamic Channel Allocation
DCH	Dedicated Channel
DCCH	Dedicated Control Channel
DC-SAP	Dedicated Connection Service Access Point
DL	Downlink
DLB	geometrical Distance from LMU to BTS
DMB	geometrical Distance from MS to BTS
DTAP	Direct Transfer Application Part

DPCH	Dedicated Physical Channel
DPCCH	Dedicated Physical Control Channel
DPDCH	Dedicated Physical Data Channel
DRNS	Drift RNS
DRX	Discontinuous Reception
DTX	Discontinuous Transmission
DS-CDMA	Direct-Sequence Code Division Multiple Access
EIR	Equipment Identity Register
E-OTD	Enhanced Observed Time Difference
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FACCH	Fast Associated Control Channel
FACH	Forward Access Channel
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FER	Frame Error Ratio
GMLC	Gateway Mobile Location Center
GMSC	Gateway Mobile Switching Center
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
GTD	Geometric Time Difference
HLR	Home Location Register
HO	Handover
HPLMN	Home Public Land Mobile Network
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IT	Time interval
ITU	International Telecommunication Union
JD	Joint Detection
Kbps	kilo-bits per second
L1	Layer 1 (physical layer)
L2	Layer 2 (data link layer)
L3	Layer 3 (network layer)
LAC	Location Area Code
LAPD	Link Access Protocol on the D channel
LAPDm	Link Access Protocol on the Dm channel
LOT	bserved Time at the LMU
LLC	Logical Link Layer
LMU	Location Measurement Unit
MA	Multiple Access
MAC	Medium Access Control
MAHO	Mobile Assisted Handover
MAP	Mobile Application Part
Mcps	Mega Chip Per Second

ME	Mobile Equipement
MIC	Modulation par Impulsion et Codage
MM	Mobility Management
MO	Mobile Originated
MOHO	Mobile Originated Handover
MOT	Observed Time at the MS
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
MSISDN	Mobile Station ISDN number
MSRN	Mobile Subscriber Roaming Number
MT	Mobile Terminal
MTP	Message Transfer Part
NMC	Network Management Center
NMR	Network Measurement Reports
NRT	Non-Real Time
NSS	Network Sub-system
ODMA	Opportunity Driven Multiple Access
OMC	Operation and Maintenance Center
OSS	Operation Sub-system
OTD	Observed Time Difference
OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor (codes)
PC	Power Control
PCH	Paging Channel
PCM	Pulse Coded Modulation
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Physical layer
PhyCH	Physical Channel
PG	Processing Gain
PLMN	Public Land Mobile Network
PRACH	Physical Random Access Channel
PUF	Power Up Function
QoS	Quality of Service
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
RACH	Random Access Channel
RANAP	Radio Access Network Application Part
RF	Radio Frequency
RFI	Request For Information
RLC	Radio Link Control
RLCP	Radio Link Control Protocol
RN	Neural Network
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
RNSAP	Radio Network Subsystem Application Part
RR	Radio Resource management
RRC	Radio Resource Control

RRM	Radio Resource Management
RT	Real Time
RTCP	Réseau Téléphonique Commuté Public
RTD	Real Time Difference
RTP	Real Time Process
RU	Resource Unit
RxLev	Received signal Level
RxQual	Received signal Quality
RX	Receive
SACCH	Slow Associated Control CHannel
SAP	Service Access Point
SCCP	Signalling Connection Control Part
SCH	Synchronisation CHannel
SDCCH	Stand Alone Dedicated Control CHannel
SDU	Service Data Unit
SF	Spreading Factor
SFR	Société Française de Radiotéléphonie
SIM	Subscriber Identity Module
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SMLC	Serving Mobile Location Center
SMS	Short Message Service
SP	Switching Point
SRNS	Serving RNS
STRIP	System for TRaffic Information and Positioning
STK	SIM Tool Kit
TA	Timing Advance
TC	Transaction Courte
TCH	Traffic Channel
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference Of Arrival
TL	Long Transaction
TPC	Transmit Power Control
TMSI	Temporary Mobile Station Identity
TOA	Time Of Arrival
TX	Transmit
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USIM	UMTS Subscriber Identity Module
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VBR	Variable Bit Rate
VLR	Visited Location Register

Πρόλογος

Οι Υπηρεσίες Προσδιορισμού Θέσεως κινητού τερματικού (ΥΠΘ) είναι ένας νέος τύπος υπηρεσιών που απευθύνεται σε χρήστες Κινητών Τερματικών (ΚΤ) βασιζόμενος στη θέση του ΚΤ. Στην παρούσα διατριβή, επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας σε μια συγκεκριμένη τάξη ΥΠΘ η οποία είναι η Υπηρεσία Κυκλοφοριακής Κίνησης (ΥΚΚ).

Δεδομένα κυκλοφοριακής κίνησης είναι η κύρια πηγή υποστήριξης της ΥΚΚ. Τα δεδομένα κυκλοφοριακής κίνησης συλλέγονται συνήθως από συστήματα τοποθετημένα παραπλεύρως του δρόμου, συστήματα που τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούν αισθητήρες κίνησης. Οι αισθητήρες αυτοί βοηθούν τον προσδιορισμό της πυκνότητας κίνησης, της ροής κίνησης καθώς και της ταχύτητας των κινούμενων οχημάτων. Αυτοί είναι οι βασικοί παράγοντες που χρειάζονται κατά τον προσδιορισμό του κυκλοφοριακού φόρτου συγκεκριμένης οδού.

Νέες τεχνικές αναπτύσσονται, με σκοπό να εντοπίζουν τα σημεία όπου υπάρχει κυκλοφοριακή συμφόρηση και εκείνα όπου πρόκειται να δημιουργηθεί μποτιλιάρισμα και να βοηθούν τους οδηγούς να αποφύγουν και τα δύο. Για το λόγο αυτό σε πολλές χώρες έχουν δημιουργήσει ειδικά κέντρα παρακολούθησης της κίνησης, που συνδέονται με δίκτυα από κάμερες και αισθητήρες. Οι στατικοί αυτοί αισθητήρες είναι πολύ χρήσιμοι αλλά το κόστος τόσο υλοποίησής όσο και συντήρησής τους προκειμένου να επιτευχθεί σημαντική κάλυψη του οδικού δικτύου, τους καθιστά απαγορευτικούς. Υπάρχουν, ωστόσο, εναλλακτικοί τρόποι προκειμένου να καθορίσουμε τους χρόνους διανυθέντων αποστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, η χρησιμοποίηση οχημάτων εξοπλισμένων με αισθητήρες (ερευνητικά οχήματα), είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε χρήση αποδοτικότερων και λιγότερο δαπανηρών τεχνικών.

Στη διατριβή αυτή παρουσιάζεται ένα καινοτόμο σύστημα το οποίο μετατρέπει οχήματα με ΚΤ σε ερευνητικά οχήματα, πληρούμενων βέβαια κάποιων προϋποθέσεων. Το προτεινόμενο σύστημα συνδυάζει τεχνικές αναγνώρισης προτύπου σήματος με μετρήσεις σήματος κινητής τηλεφωνίας και πιο συγκεκριμένα πληροφορία από τις διεπαφές Abis/Iub δικτύων GSM και UMTS αντίστοιχα. Η αναγνώριση προτύπου σήματος γίνεται με τη χρήση Hidden Markov Model (HMM) καθώς και τεχνικών κατάτμησης. Τα ακριβή αποτελέσματα, εξετάζοντας μεμονωμένα ερευνητικά οχήματα, δείχνουν τις δυνατότητες της μεθόδου κατά την εφαρμογή της σε μεγάλη κλίμακα, προκειμένου να προσδιοριστεί η κυκλοφοριακή κίνηση σε κεντρικές οδικές αρτηρίες της πόλης, παρέχοντας με αυτό το τρόπο ΥΚΚ σε χρήστες ΚΤ.

Η διδακτορική διατριβή είναι δομημένη σε επτά κεφάλαια. Το πρώτο (1°) κεφάλαιο περιλαμβάνει τη διατύπωση και τον ορισμό του προβλήματος προσδιορισμού της ταχύτητας ΚΤ, με απώτερο σκοπό

την εξαγωγή αναφοράς κυκλοφοριακής κίνησης. Τονίζεται η σπουδαιότητα των υπηρεσιών βασιζόμενων στη θέση του ΚΤ, ενώ αναφέρονται εν συντομία οι αρχές της κινητής τηλεφωνίας, όπως και τα είδη των δικτύων της. Στο δεύτερο (2°) κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχετική βιβλιογραφία που αφορά τη παρακολούθηση κίνησης οδικού δικτύου καθώς και μεθόδους για την πρόγνωση αυτής, μεθόδων που έχουν όμως υψηλό κόστος εγκατάστασης. Άλλες μέθοδοι χρησιμοποιούμενες για το προσδιορισμό τόσο της θέσεως όσο και της ταχύτητας του ΚΤ παρατίθενται στο υπόλοιπο του κεφαλαίου, οι οποίες και θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, κατά την επίλυση του προβλήματος. Στο τρίτο (3°) κεφάλαιο αναπτύσσεται το μαθηματικό υπόβαθρο των τεχνικών αναγνώρισης προτύπου σήματος. Εδώ αναλύεται η χρήση μοντέλων βασιζόμενων σε Κρυφές Μαρκοβιανές Αλυσίδες, καθώς και τεχνικές κατάτμησης, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά την αρχικοποίηση της παραπάνω μοντελοποίησης. Στο τέταρτο (4°) κεφάλαιο παρουσιάζονται έρευνες οι οποίες συσχετίζουν τον όγκο κίνησης οδικού δικτύου με την κατανομή κλήσεων σε ΚΤ. Στη συνέχεια του κεφαλαίου βρίσκουμε το πλήθος των μετρήσεων που απαιτούνται για το χαρακτηρισμό οδικού δικτύου ενώ από την κατανομή των ΚΤ σε οδικό δίκτυο χαρακτηρίζουμε το δείγμα οχημάτων. Ακολούθως διαχωρίζουμε την μοντελοποίηση της κίνησης σε οδικό δίκτυο σε δύο περιπτώσεις: α) στη μελέτη κίνησης ερευνητικού οχήματος και β) στη μελέτη κίνησης οχημάτων οδικού δικτύου. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παράθεση ποσοτικών τεχνικών για την εξαγωγή των γραφικών παραστάσεων κατά τη δεύτερη περίπτωση κίνησης. Στο πέμπτο (5°) κεφάλαιο επεξηγούμε τις διεπαφές, σε δίκτυα GSM και UMTS, ενώ ορίζεται το διάνυσμα σήματος στο οποίο στηρίζεται η προτεινόμενη τεχνική προσδιορισμού ταχύτητας ΚΤ. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση του περιβάλλοντος διάδοσης σήματος. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται, είτε χάρτης ραδιοκάλυψης, είτε μοντελοποίηση διάδοσης υπό διαφορετικές συνθήκες. Στο έκτο (6°) κεφάλαιο παρουσιάζεται το προτεινόμενο σχήμα εκτίμησης κυκλοφοριακής κίνησης, ενώ ακολουθούν τέσσερα σύνολα αποτελεσμάτων. Η διατριβή ολοκληρώνεται στο έβδομο (7°) κεφάλαιο, όπου παρατίθενται τα συμπεράσματα καθώς και προτάσεις επέκτασης της διατριβής. Τέλος, στο παράρτημα παρουσιάζεται η μαθηματική απόδειξη της εξίσωσης που χρησιμοποιείται στη παράγραφο 4.3, για το πλήθος των ερευνητικών οχημάτων που απαιτούνται για το χαρακτηρισμό οδικού δικτύου καθώς και αποτελέσματα προσομοίωσης.

Κλείνοντας τον πρόλογο αυτό, θα ήθελα να αναγνωρίσω την αδιάκοπη βοήθεια και τις συμβουλές των καθηγητών της επιτροπής μου και κυρίως του κ. Ευστάθιου Συκά, κ. Μιχάλη Θεολόγου, κ. Μιλτιάδη Αναγνώστου και κ. Εμμανουήλ Πρωτονοτάριου από το εργαστήριο τηλεπικοινωνιών. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Παναγιώτη Δεμέστιχα ο οποίος με βοήθησε τόσο κατά κατά τα πρώτα στάδια εκπόνησης του διδακτορικού όσο και στη πορεία του, τον Γιώργο Καρέτσο για την εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της διατριβής όπως και την ομάδα του Εργαστηρίου Τηλεπικοινωνιών η οποία βοήθησε στην υλοποίηση

των ιδεών που περιγράφονται παρακάτω. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω από τον προσωπικό μου κύκλο όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου αυτά τα χρόνια αλλά πάνω από όλους την οικογένειά μου, για την αδιάκοπη υποστήριξη, για την πραγματοποίηση αυτού του φιλόδοξου και μεγάλης έκτασης έργου, στην οποία και το αφιερώνω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.1. Υπηρεσίες βασιζόμενες στη θέση Κινητού Τερματικού

Στην εποχή μας είμαστε μάρτυρες ενός αυξανόμενου ενδιαφέροντος για τεχνολογίες προσδιορισμού θέσεως ΚΤ. Η ευρεία χρήση ΥΠΘ θα βελτίωνε την ποιότητα ζωής από κάθε άποψη. Από το καλοκαίρι του 2001, μερικές ΥΠΘ έχουν ήδη παρουσιαστεί από παρόχους GSM στην Ευρώπη. Οι υπάρχουσες μέθοδοι εντοπισμού περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την μέθοδο Αναγνώρισης Ταυτότητας Κυψέλης καθώς και μεθόδους βασισμένους σε μετρήσεις ισχύος σήματος ([SKS03], [LVL99]). Ακόμα συσκευές GSM που υποστηρίζουν GPS λειτουργίες είναι διαθέσιμες στην αγορά.

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για τον εντοπισμό ΚΤ. Το ΚΤ μπορεί να εντοπιστεί είτε με τη βοήθεια των σημάτων του συστήματος κινητής τηλεφωνίας είτε μπορεί να εξοπλιστεί με δέκτη GPS, ο οποίος και υποστηρίζει τις λειτουργίες εντοπισμού. Οι μέθοδοι εντοπισμού, μπορούν να εφαρμοστούν είτε στο κινητό τηλέφωνο και / ή στο δίκτυο. Οι παραπάνω τροποποιήσεις δημιουργούν ποικίλα κόστη καθώς και νέο φόρτο σήματος στο δίκτυο. Επιπλέον, η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί, ποικίλει ανάλογα με τη μέθοδο προσδιορισμού θέσεως. Οι απαιτήσεις που τίθενται από τις εφαρμογές καθορίζουν ποια μέθοδο προσδιορισμού θέσεως είναι η καλύτερη ή η προτιμότερη από πλευράς κόστους. Είναι γενικά αποδεκτό ότι αυξημένη ακρίβεια και ευρεία κάλυψη θα υποστήριζε ένα πλήθος υπηρεσιών, ενώ ταυτόχρονα θα αύξανε τη διαθέσιμη βάση συνδρομητών στους παρόχους.

Παρουσιάζοντας υπηρεσίες ΥΠΘ, παρατίθεται μια κατηγοριοποίηση βασισμένη στους διαφορετικούς τύπους διαθέσιμων υπηρεσιών:

α. Υπηρεσίες Πληροφοριών, όπως αναφορές κυκλοφοριακής κίνησης, δελτία καιρού.

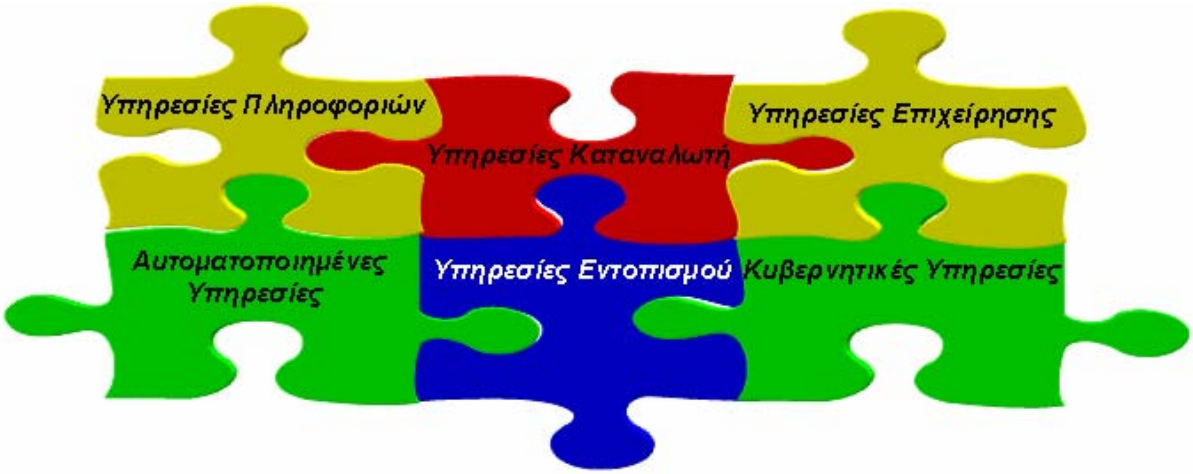
β. Υπηρεσίες Καταναλωτή, όπως υπολογισμός θέσεως χρήστη, πωλήσεις αγαθών σε χαμηλότερο κόστος, τουριστικές υπηρεσίες

γ. Υπηρεσίες Επιχείρησης, όπως επαφή με το απαραίτητο προσωπικό βρισκόμενο στη κοντινότερη θέση, κατευθυνόμενη διαφήμιση.

δ. Αυτοματοποιημένες Υπηρεσίες, όπως υπηρεσίες χρέωσης ανάλογα με τη θέση του χρήστη, αυτοματοποιημένη διαφήμιση, διόδια και εισιτήρια.

ε. Υπηρεσίες Εντοπισμού, όπως υπηρεσία εύρεσης φίλου, υπηρεσία εντοπισμού αγαθών, υπηρεσία προσωπικής ασφαλείας.

στ. Κυβερνητικού Τύπου Υπηρεσίες, όπως αναφορές επιτηρούμενων (υψίστης ασφαλείας) περιοχών, συναγερμός σε περίπτωση δυστυχημάτων.



Σχήμα 1.1. Είδη υπηρεσιών βασισμένα στη θέση ΚΤ (ΥΠΘ)

Στην εργασία αυτή, επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας σε μια συγκεκριμένη τάξη ΥΠΘ, η οποία είναι η ΥΚΚ [SS03]. Μποτιλιαρίσματα είναι συνήθη στις πόλεις, ειδικά μετά το διαρκώς αυξανόμενο αριθμό αυτοκινήτων, ενώ δεν υπάρχουν και πολλά πράγματα που μπορούν να γίνουν κατά τη διάρκεια του αστικού σχεδιασμού, προκειμένου να βελτιωθεί η ροή της κίνησης. Λύσεις όπως απαγόρευση της εισόδου των οχημάτων σε συγκεκριμένες περιοχές της πόλης, εξαρτώμενη από τις πινακίδες τους ή επιβολή διοδίων δεν μπορούν να θεωρηθούν λύση. Ένας τρόπος αποφυγής μποτιλιαρισμάτων είναι η έγκαιρη πληροφόρηση των οδηγών για την ύπαρξη μποτιλιαρίσματος.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούμε τεχνικές αναγνώρισης προτύπου σήματος προκειμένου να δημιουργήσουμε αναφορές κίνησης. Η προτεινόμενη εφαρμογή ΥΚΚ έχει δύο χαρακτηριστικά. Πρώτον, καμία αλλαγή υλικού στο δίκτυο δεν πρόκειται να χρειαστεί. Επιπλέον, κοινές συσκευές (χωρίς υποστήριξη GPRS, WAP, και 3G) είναι επαρκείς. Δεύτερον και πιο σημαντικό, δε χρειάζεται επιπλέον φορτίο σηματοδοσίας στο δίκτυο, προκειμένου να υποστηριχτεί η προτεινόμενη εφαρμογή ΥΠΘ.

1.2. Διατύπωση του προβλήματος

Η προτεινόμενη υπηρεσία είναι βασισμένη σε τεχνικές αναγνώρισης προτύπου σήματος, που εφαρμόζονται σε μετρήσεις σήματος κινητής τηλεφωνίας, και ακριβέστερα πληροφορίας, που εξάγεται είτε από τη διεπαφή Abis, κάνοντας χρήση των μετρήσεων προπορείας συγχρονισμού (TA) σε δίκτυο GSM, είτε από τη διεπαφή Iub, κάνοντας χρήση των μετρήσεων χρόνου πλήρους διαδρομής (RTT) σε δίκτυο UMTS. Η εξεταζόμενη μέθοδος βασίζεται στην επεξεργασία του επιπέδου ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης και το οποίο μετρά το ΚΤ (μετρήσεις RSSI). Σε

GSM δίκτυο, έχουμε αναφορές μέτρησης κάθε 480ms όπου το επίπεδο ισχύος ανήκει στο διάστημα -110 dBm έως -48 dBm. Σε δίκτυο UMTS, έχουμε αναφορές μέτρησης κάθε 10ms με το επίπεδο ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης, το οποίο μετρά το ΚΤ να ανήκει στο διάστημα -94dBm έως -32dBm.

Έχοντας λοιπόν, αναφορές μέτρησης επιπέδου ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης, δημιουργούμε ακολουθίες τιμών του επιπέδου ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης του εξυπηρετούντος Σταθμού Βάσης (ΣΒ), οι οποίες, υπό προϋποθέσεις, μπορούν να δώσουν με μεγάλη ακρίβεια την τιμή της ταχύτητας συγκεκριμένου οχήματος. Προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι τα διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης καθώς και το φαινόμενο Rayleigh fading, δεδομένου ότι εξετάζουμε ΚΤ ευρισκόμενο σε κινούμενο όχημα. Βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι δεν χρειάζεται να μεταδοθούν επιπλέον δεδομένα στις διεπαφές τόσο σε GSM όσο και σε UMTS δίκτυα, επειδή οι χρησιμοποιούμενες αναφορές μέτρησης είναι μέρος της σηματοδοσίας δικτύου για την εξυπηρέτηση λειτουργιών διαπομπής.

1.3. Ορισμός του προβλήματος

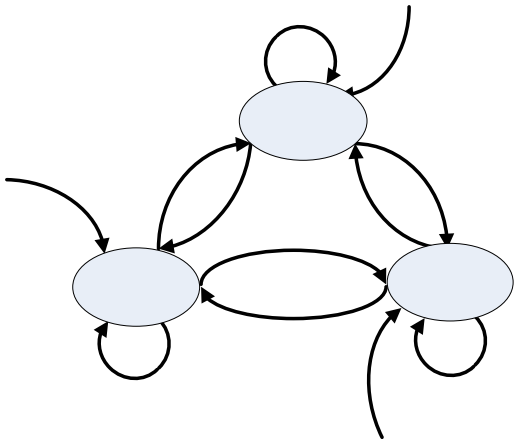
Παρατηρώντας ΚΤ ευρισκόμενο σε κινούμενο όχημα, μπορούμε να εξάγουμε την ακολουθία ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως, την οποία λαμβάνει το ΚΤ από τον εξυπηρετώντα ΣΒ. Όπως έχει προαναφερθεί η πληροφορία που επεξεργαζόμαστε είναι:

Α. Ταυτότητα κυψέλης,

Β. Προπορεία συγχρονισμού (TA) σε δίκτυο GSM και χρόνου πλήρους διαδρομής (RTT) σε δίκτυο UMTS,

Γ. Ακολουθία παρατηρήσεων του επιπέδου ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης.

Τα στοιχεία πληροφορίας Α και Β περιορίζουν το πλήθος των παραπάνω ακολουθιών προς επεξεργασία. Τα στοιχεία πληροφορίας Γ, μπορούν να επεξεργαστούν επιτυχώς με μοντελοποίηση Μαρκοβιανών Αλυσίδων. Μια διακριτή Μαρκοβιανή διαδικασία χαρακτηρίζεται από έναν πεπερασμένο αριθμό καταστάσεων $S_1, S_2, S_3, ..., S_N$ (σχήμα 1.2).



Σχήμα 3.1. Μαρκοβιανή αλυσίδα τριών (3) καταστάσεων

Για παράδειγμα, αν η ακολουθία παρατηρήσεων ήταν:

S = {31, 31, 32, 38, 33, 35, 36, 37, 39, 34}

ένα Μαρκοβιανό μοντέλο τριών καταστάσεων S1, S2 και S3 θα μπορούσε να έχει την παρακάτω μορφή:

S_1 = 31, 32, 33

S_2 = 34, 35, 36

S_3 = 37, 38, 39

Η παραπάνω ακολουθία παρατηρήσεων S παίρνει τη ακόλουθη μορφή

S= { S_1 , S_1 , S_1 , S_3 , S_1 , S_2 , S_2 , S_3 , S_3 , S_2 }

Ένα μοντελοποιημένο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ότι ευρισκόμενο σε μία από τις πιθανές καταστάσεις, μπορεί να μεταβάλει τη κατάστασή του, μεταξύ των πιθανών καταστάσεων σε ίσα και διακριτά διαστήματα, σύμφωνα με την πιθανότητα μετάβασης κατάστασης a_{ij} που συνδέεται με κάθε κατάσταση. Στην περίπτωση μιας Μαρκοβιανής αλυσίδας πρώτης τάξεως που χρησιμοποιείται στα πλαίσια αυτής της διατριβής, η πιθανότητα μετάβασης κατάστασης δεν εξαρτάται από το ιστορικό της διαδικασίας, αλλά μόνο από την τρέχουσα κατάσταση.

Δοθέντων των παραμέτρων μιας HMM, τα ακόλουθα προβλήματα μπορούν να λυθούν:

1. Δοθείσης μιας ακολουθίας παρατηρήσεων $O = O_1, O_2, O_3, ..., O_N$ και ενός προτύπου $\lambda = \{A, B, \pi)$, πώς υπολογίζουμε αποτελεσματικά $\lambda = \{A, B, \pi)$; Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται ως πρόβλημα αξιολόγησης (evaluation problem).

2. Δοθείσης μιας ακολουθίας παρατηρήσεων $O = O_1, O_2, O_3, ..., O_N$ και ενός προτύπου $\lambda = \{A, B, \pi)$, πώς επιλέγουμε τη βέλτιστη ακολουθία καταστάσεων $I = I_1, I_2, I_3, ..., I_N$; Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται ως πρόβλημα αποκωδικοποίησης (decoding problem).

3. Δοθείσης μιας ακολουθίας παρατηρήσεων $O = O_1, O_2, O_3, ..., O_N$ πώς ρυθμίζουμε τις παραμέτρους του προτύπου $\lambda = \{A, B, \pi)$, για να μεγιστοποιήσουν την πιθανότητα $P(O \mid \lambda)$; Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται ως πρόβλημα εκμάθησης ή εκτίμησης (learning/estimation problem).

Η λύση αυτών των προβλημάτων είναι σημαντική για τη δημιουργία του μοντέλου. Όταν έχουμε πολλαπλά HMM και μια ακολουθία παρατηρήσεων, η λύση στο πρόβλημα αξιολόγησης χρησιμοποιείται για να καθορίσει το πιθανότερο πρότυπο για την περιγραφή των δεδομένων. Αφότου βρεθεί το πρότυπο που ταιριάζει καλύτερα στην ακολουθία παρατηρήσεων, η λύση του προβλήματος αποκωδικοποίησης βοηθά στην εμφάνιση της δομής του προβλήματος, δηλ. τις κρυμμένες καταστάσεις του μοντέλου. Τέλος, η λύση στο πρόβλημα εκμάθησης χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των HMM μοντέλων που χρησιμοποιούνται στα προηγούμενα προβλήματα.

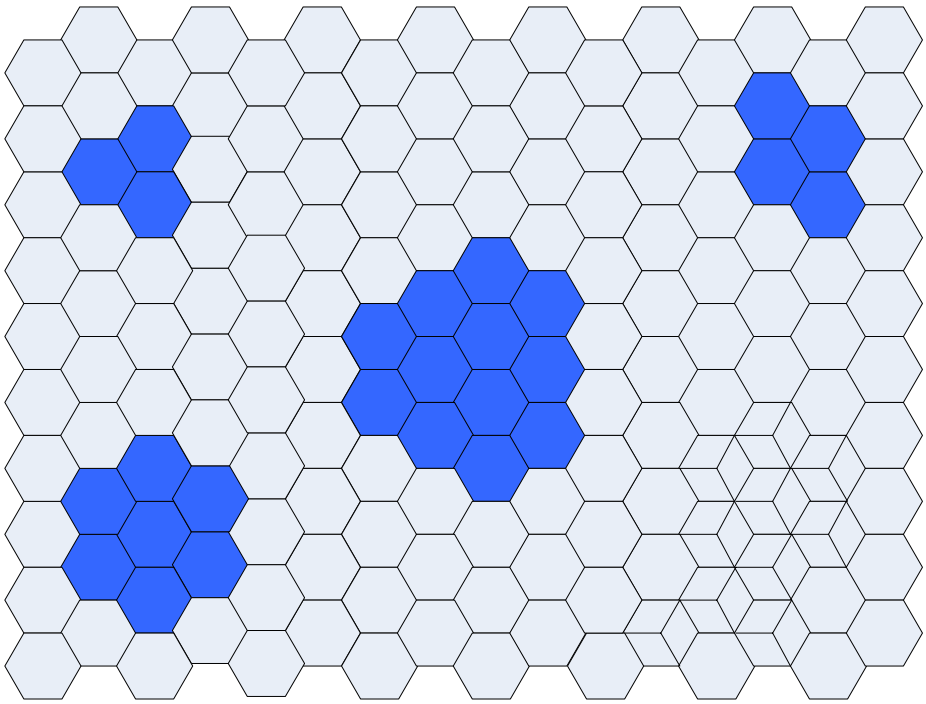
1.4. Αρχές Κινητής Επικοινωνίας

Τα κυψελωτά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών βασίζονται στην αρχή της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Το περιορισμένο διαθέσιμο φάσμα για την υπηρεσία, επιμερίζεται σε N το πλήθος μη επικαλυπτόμενα κανάλια, τα οποία ανατίθενται, ακολουθώντας ένα επαναλαμβανόμενο πρότυπο, σε ένα εξαγωνικό πλέγμα κυψελών. Το εξάγωνο είναι απλά μια εύκολη εξιδανίκευση, που προσεγγίζει το σχήμα ενός κύκλου (το σταθερό επίπεδο σήματος το οποίο διαμορφώνει το περίγραμμα μιας μη κατευθυντικής κεραίας τοποθετημένης στο κέντρο), διαμορφώνοντας ένα πλέγμα χωρίς κενά ή επικαλύψεις. Η επιλογή των N εξαρτάται από πολλές μεταβλητές, συμπεριλαμβάνοντας το τοπικό περιβάλλον διάδοσης, κατανομή κίνησης, καθώς και κόστη. Το περιβάλλον διάδοσης καθορίζει την παρεμβολή η οποία προκαλείται από τα κανάλια στις γειτονικές κυψέλες, η οποία με τη σειρά της καθορίζει την απόσταση επαναχρησιμοποίησης και η οποία είναι η επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ κυψελών που χρησιμοποιούν το ίδιο σύνολο συχνοτήτων καναλιών.

Ο καθορισμός του μεγέθους της κυψέλης βασίζεται συνήθως στην κατανομή της κίνησης τοπικά, καθώς και στη ζήτηση. Όσο μεγαλύτερη η ζήτηση σε μια περιοχή, τόσο μικρότερο πρέπει να οριστεί το μέγεθος της κυψέλης, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το σύνολο συχνοτήτων σε ένα μικρότερο αριθμό χρηστών, οπότε και να περιορίσουμε τη πιθανότητα μπλοκαρίσματος κλήσης εντός της κυψέλης. Από την άλλη μεριά, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος της κυψέλης, τόσο περισσότερα εξαρτήματα θα χρειαστούν στο σύστημα καθώς κάθε κυψέλη απαιτεί τον απαραίτητο μεταδότη και εξαρτήματα μεταγωγής, γνωστά ως Base Station Subsystem (BSS), μέσω του οποίου οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας έχουν πρόσβαση στο δίκτυο μέσω ραδιοσυνδέσεων. Ο βαθμός με τον οποίο το

κατανεμημένο φάσμα συχνοτήτων επαναχρησιμοποιείται στην περιοχή παροχής υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, καθορίζει την αποδοτικότητα του φάσματος στα κυψελωτά συστήματα. Αυτό σημαίνει ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος της κυψέλης και ο αριθμός των κυψελών στη γεωμετρία επαναχρησιμοποίησης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αποδοτικότητα της χρησιμοποίησης του φάσματος. Από τη στιγμή που συστήματα ψηφιακής διαμόρφωσης μπορούν να λειτουργήσουν με μικρότερη αναλογία σήματος προς θόρυβο (π.χ., σήματος προς παρεμβολή) για την ίδια ποιότητα υπηρεσίας, κατά μία άποψη, επιτρέπεται μικρότερη απόσταση επαναχρησιμοποίησης, οπότε και παροχή υψηλότερης αποδοτικότητας φάσματος. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα των κυψελωτών συστημάτων κινητών τηλεπικοινωνιών, έναντι των παλιότερων αναλογικών κυψελωτών συστημάτων. Περισσότερες πληροφορίες στην ανάλυση αποδοτικότητας φάσματος σε κυψελωτά συστήματα μπορούν να βρεθούν στις [T00], [L89] και [R93]). Στο σχήμα 1.3. έχουμε ομάδες των τριών (3), τεσσάρων (4), επτά (7), δώδεκα (12) κυψελών.

Αξίζει να αναφερθεί ότι τα ψηφιακά συστήματα έχουν χρησιμοποιήσει κυψέλες με τομείς 120-μοιρών ή μικρότερους, χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραίες προκειμένου να μειώσουν περαιτέρω την απόσταση αποτελεσματικής επαναχρησιμοποίησης (βλέπε σχήμα 1.3.). Αυτό επιτρέπει μικρότερο αριθμό κυψελών στο μοντέλο επαναχρησιμοποίησης, ενώ κάνει διαθέσιμο μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού φάσματος συχνοτήτων εντός κάθε κυψέλης.



Σχήμα 1.3. Εξαγωνική κυψελωτή δομή με επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

1.4.1. GSM

Το GSM περιέχει τις τυποποιημένες υπηρεσίες όπως τις ορίζει το CEPT (Conference of European Posts and Telegraphs), λειτουργικότητα υποσυστημάτων, καθώς και την αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου βασισμένο στη χρήση των διεθνών στάνταρτ, όπως αυτά ορίζονται από τις CCITT και CCIR ([EV98], [H99]), για ένα πανευρωπαϊκό επίγειο ψηφιακό σύστημα, αρχικώς προοριζόμενο να εξυπηρετήσει χρήστες μετακινούμενους με οχήματα.

Το 1982 η επιτροπή CEPT δημιούργησε το GSM - Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών ("Global System for Mobile telecommunication" ή κατά άλλους "Groupe Special Mobile") προκειμένου να μελετηθεί και να αναπτυχθεί ένα πανευρωπαϊκό κινητό σύστημα δημόσιας χρήσεως. Τα κριτήρια του συστήματος αυτού είναι:

α. υψηλή ποιότητα ήχου

β. χαμηλό κόστος ΚΤ και υπηρεσιών

γ. δυνατότητα υποστήριξης ΚΤ

δ. δυνατότητα υποστήριξης νέων υπηρεσιών και εγκαταστάσεων

ε. ευρεία φασματική αποδοτικότητα

στ. συμβατότητα ISDN

Το 1989 η αρμοδιότητα για το GSM μεταφέρεται στο European Telecommunication Standards Institute (ETSI) ενώ το 1990 δημοσιεύεται η πρώτη φάση των προδιαγραφών για GSM. Ξεκινώντας την εμπορική του χρήση το 1991 έχει εντυπωσιακή διείσδυση στην αγορά. Έτσι, 36 δίκτυα GSM τέθηκαν σε λειτουργία σε 22 χώρες το 1993, με 1.3 εκατομμύρια συνδρομητές παγκοσμίως το 1994 και περισσότερους από 55 εκατομμύρια συνδρομητές στο τέλος του 1997.

Τα δίκτυα GSM προσφέρουν ένα πλήθος υπηρεσιών δεδομένων. Οι συνδρομητές δικτύων GSM μπορούν να στείλουν και να λάβουν δεδομένα, χρησιμοποιώντας πλήθος μεθόδων προσπέλασης και πρωτόκολλα, όπως το Χ.25 ή Χ.32 σε:

α. Χρήστες POTS (Plain Old Telephone Service)

β. ISDN

γ. Μετάδοση τεχνολογίας Packet Switched

δ. Μετάδοση τεχνολογίας Circuit Switched

Τέλος, σε δίκτυα GSM οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων περιορίζονται σε 9.6 kbit/s.

Το GSM παρέχει κινητικότητα ΚΤ, με προσωπική ευελιξία, μέσω της εισαγωγής της μονάδας ταυτότητας χρήστη (ΜΤΧ) στο GSM δίκτυο. Η ΜΤΧ μεταφέρει τον προσωπικό αριθμό του κάθε χρήστη ΚΤ. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βασισμένα στο GSM είναι πλέον ευρέως διαδεδομένα στην Ευρώπη. Προς το παρόν μελετάται, η επόμενη γενιά υπηρεσιών προσωπικών τηλεπικοινωνιών μετά το GSM. Τα συστήματα 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς αναμένεται να εξαλείψουν την ανάγκη χρήσης

διαφορετικών τερματικών συσκευών για εφαρμογές εκτός (κυψελωτή) και εντός (ασύρματη) οικίας. Τα παραπάνω συστήματα θα παρέχουν επίσης προσωπικές υπηρεσίες υψηλότερης ποιότητας, κατά μήκος των "συνόρων" διαφορετικών τύπων δικτύων (κινητής και σταθερής τηλεφωνίας, κυψελωτής και ασύρματης τεχνολογίας).

Δυνατότητες δικτύου, ωστόσο, όπως διαχείριση κινητικότητας, προστασία δεδομένων χρήστη, και κατανομή πόρων, τα οποία έχουν διευθετηθεί στο GSM, είναι μερικές από τις βασικές απαιτήσεις στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας του μέλλοντος [MP92]. Γενικά, το GSM μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα πλαίσιο για την μελέτη λειτουργιών και θεμάτων σχετικών με τα δίκτυα προσωπικών επικοινωνιών κυψελωτού τύπου, ανεξάρτητα από τα μέσα εφαρμογής.

Εφαρμόζοντας και επεκτείνοντας το GSM σε δίκτυα προσωπικών επικοινωνιών επόμενης γενιάς, θα πρέπει να είμαστε προσεκτικοί στο διαχωρισμό μερικών χαρακτηριστικών μοναδικών στην αρχιτεκτονική δικτύου του GSM [GSM1]. Με αυτόν τον τρόπο, το GSM μπορεί να θεωρηθεί σαν μια πλατφόρμα σχεδιασμού και κατασκευής της επόμενης γενιάς δικτύων τηλεπικοινωνιών.

1.4.2. GPRS

Η εντυπωσιακή ανάπτυξη της κινητής τηλεφωνίας, όπως επίσης και ο αριθμός χρηστών Internet, υπόσχεται μια εντυπωσιακή δυναμική για μια αγορά, η οποία συνδυάζει και τις δύο καινοτομίες. Μέσα στα αμέσως επόμενα χρόνια θα υπάρξει μια αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματες υπηρεσίες δεδομένων. Συγκεκριμένα, προβλέπεται ζήτηση ασύρματης πρόσβασης υψηλής απόδοσης στο Internet.

Οι υπάρχουσες κυψελωτές υπηρεσίες δεδομένων δεν ικανοποιούν τις ανάγκες των χρηστών και των πάροχων. Από την πλευρά του χρήστη οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων είναι πολύ χαμηλοί, η διαδικασία σύνδεσης χρειάζεται πολύ χρόνο και είναι μάλλον πολύπλοκη. Επιπλέον, η υπηρεσία είναι πολύ ακριβή για τους περισσότερους από τους χρήστες. Από τεχνικής άποψης τα μειονεκτήματα οφείλονται στο γεγονός ότι οι υπάρχουσες υπηρεσίες ασύρματων δεδομένων βασίζονται σε μετάδοση τεχνολογίας circuit switched. Στην διεπαφή του αέρα, ένα κανάλι κίνησης διατίθεται σε ένα χρήστη για ολόκληρη τη περίοδο κλήσης. Σε περίπτωση έντονης κίνησης (π.χ. κίνηση Internet), έχει ως αποτέλεσμα την μη αποδοτική χρήση πόρων. Είναι φανερό ότι για έντονη κίνηση, η χρήση των υπηρεσιών τεχνολογίας packet switched έχουν ως αποτέλεσμα τη καλύτερη χρησιμοποίηση των καναλιών κίνησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα κανάλι θα διατίθεται όταν χρειάζεται και θα απελευθερώνεται άμεσα μετά την μετάδοση των πακέτων. Με αυτή την αρχή πολλαπλοί χρήστες μπορούν να μοιράζονται ένα φυσικό κανάλι (στατιστική πολυπλεξία σήματος).

Προκειμένου να διευθετηθούν αυτές οι ανεπάρκειες, έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής δύο τεχνολογίες packet switched: Cellular Digital Packet Data (CDPD) (για AMPS, IS-95, and IS-136)

και General Packet Radio Service (GPRS). Το GPRS αρχικά αναπτύχθηκε για το GSM, αλλά ενοποιήθηκε επίσης με το IS-136 [FHK99].

Το GPRS είναι μία νέα υπηρεσία κομιστή για το GSM, το οποίο βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό και απλοποιεί την ασύρματη πρόσβαση σε δίκτυα πακέτων δεδομένων όπως στο Internet. Εφαρμόζει την αρχή packet switched προκειμένου να μεταφέρει πακέτα πληροφορίας του χρήστη με αποτελεσματικό τρόπο μεταξύ των GSM ΚΤ και εξωτερικών δικτύων μεταφοράς πακέτων δεδομένων. Τα πακέτα μπορούν να δρομολογηθούν κατευθείαν από το GPRS ΚΤ σε δίκτυα packet switched. Δίκτυα βασισμένα στο Internet Protocol (IP) (π.χ., το παγκόσμιο Internet ή εταιρικά Intranet) και δίκτυα X.25 υποστηρίζονται από την τρέχουσα έκδοση του GPRS ([GSM2], [GSM3], [BVE99]).

Το GPRS μπορεί να θεωρηθεί ως δίκτυο επικάλυψης του δικτύου GSM, χρησιμοποιώντας τα περισσότερα από τα υπάρχοντα στοιχεία δικτύων GSM, και επιπλέον νέα στοιχεία δικτύου, διεπαφές και πρωτόκολλα για την δημιουργία ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας, βασισμένο σε τεχνολογία packet switched. Τα νέα στοιχεία δικτύου καλούνται GSNs (GPRS Support Nodes) και είναι αρμόδια για δρομολόγηση και παράδοση των πακέτων δεδομένων, μεταξύ ΚΤ και εξωτερικών δικτύων PDN (packet data networks).

Οι χρήστες του GPRS ωφελούνται από μικρότερους χρόνους πρόσβασης και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Όπως έχει προαναφερθεί, στο συμβατικό GSM, η διαδικασία σύνδεσης παίρνει μερικά δευτερόλεπτα και οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων περιορίζονται σε 9.6 kbit/s. Το GPRS στην πράξη προσφέρει χρόνους εγκατάστασης κλήσεως κάτω του ενός δευτερολέπτου και ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, παρόμοιους με αυτούς του ISDN (171kbit/s).

Επιπρόσθετα, η εκπομπή πακέτων στο GPRS προσφέρει μια πιο προσιτή τιμολόγηση στο χρήστη από αυτή που προσφέρεται από τις υπηρεσίες βασισμένες σε τεχνολογία circuit switched. Στις υπηρεσίες αυτές η τιμολόγηση βασίζεται στη διάρκεια της σύνδεσης. Αυτό είναι μη αποδεκτό για εφαρμογές με έντονη κίνηση. Ο χρήστης πρέπει να πληρώσει για ολόκληρη τη διάρκεια σύνδεσης, ακόμα και για "νεκρές" περιόδους, όπου κανένα πακέτο δεν στέλνεται (π.χ. όταν ο χρήστης διαβάζει μια σελίδα στο Internet). Σε αντίθεση με αυτό, σε υπηρεσίες που στηρίζονται στη τεχνολογία packet switched η τιμολόγηση μπορεί να βασιστεί στην ποσότητα των μεταφερομένων δεδομένων. Το πλεονέκτημα για το χρήστη είναι ότι μπορεί να είναι συνδεδεμένος για μεγάλη χρονική περίοδο αλλά θα τιμολογείται βάση του όγκου των μεταφερομένων δεδομένων.

1.4.3. UMTS

Το UMTS είναι η ευρωπαϊκή εκδοχή των συστημάτων κινητής επικοινωνίας τρίτης γενιάς. Στόχος των συστημάτων αυτών είναι η παροχή στο χρήστη κινητής τηλεφωνίας υπηρεσιών πολυμέσων. Αυτό απαιτεί την παροχή στο χρήστη ρυθμό δεδομένων ο οποίος είναι σημαντικά υψηλότερος από εκείνο που παρέχουν τα σημερινά 2^{ης} γενιάς δίκτυα. Σε δίκτυα GSM, για παράδειγμα, μόνο ρυθμοί

μετάδοσης δεδομένων της τάξεως των 9.6 kbit/s υποστηρίζονται ευρέως μέχρι στιγμής. Σε δίκτυα UMTS στους χρήστες θα παρέχονται ρυθμοί δεδομένων έως 144 kbit/s σε περιβάλλοντα μικροκυψέλης και έως 2 Mbit/s σε εσωτερικούς χώρους ή περιβάλλοντα πικοκυψέλης ([GW99], [R00]).

Οι απαιτήσεις αυτές δείχνουν τους περιορισμούς των δικτύων GSM, τα οποία, παρόλο την παγκοσμίως μεγάλη επιτυχία τους, είχαν σχεδιαστεί πρωταρχικά για κινητή ψηφιακή τηλεφωνία με περιορισμένη χωρητικότητα. Παρόλο, που η εισαγωγή των υπηρεσιών τεχνολογίας packet-switched καθώς και επιπλέον στοιχείων βασισμένων σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, επιλύουν μέχρι ένα βαθμό τους υπάρχοντες περιορισμούς στο GSM, το UMTS είναι σε θέση να παρέχει στο χρήστη έναν ακόμα μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Μια περαιτέρω βασική απαίτηση για δίκτυα UMTS είναι η ανάγκη εξέλιξης της αρχιτεκτονικής κορμού δικτύου, που χρησιμοποιείται σε δίκτυα GSM (τα οποία εμπεριέχουν ένα πρωτόκολλο σηματοδοσίας γνωστό ως MAP). Με αυτό το τρόπο οι πάροχοι δικτύων GSM θα είναι σε θέση να προστατέψουν τις επενδύσεις υποδομής κατά τη διάρκεια της αναβάθμισης των δικτύων τους υποστηρίζοντας και υπηρεσίες δικτύου UMTS.

Δεδομένου ότι το UMTS θα προσφέρει σε παγκόσμια επίπεδο κάλυψη και υπηρεσία διαπομπής, το URAN (UMTS radio access network) δομήθηκε με έναν ιεραρχικό τρόπο σε στρώματα βαθμωτής κάλυψης. Ένα υψηλότερο στρώμα καλύπτει μια μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή από ένα χαμηλότερο στρώμα. Στο υψηλότερο στρώμα υπάρχουν δορυφόροι που καλύπτουν ολόκληρο τον πλανήτη, τα χαμηλότερα στρώματα διαμορφώνουν το UTRAN (UMTS terrestrial radio access network). Διαιρούνται σε μακρο-επίπεδο, μικρο-επίπεδο και πικο-επίπεδο. Κάθε στρώμα διαιρείται σε κυψέλες. Όσο χαμηλότερο είναι το ιεραρχικό επίπεδο, τόσο μικρότερες είναι οι κυψέλες. Οι μικρότερες κυψέλες επιτρέπουν υψηλότερη συγκέντρωση συνδρομητών. Επομένως μακρο-κυψέλες χρησιμοποιούνται για ευρεία κάλυψη, οι πρόσθετες μικρο-κυψέλες εγκαθίστανται στις περιοχές με υψηλότερη πυκνότητα συνδρομητών, ενώ οι πικο-κυψέλες εγκαθίστανται σε κτήρια καθώς και στα αποκαλούμενα "καυτά σημεία" (π.χ. αερολιμένες, σιδηροδρομικοί σταθμοί).Η διαχείριση κινητικότητας που εφαρμόζεται σε δίκτυα GPRS ισχύει επίσης και σε δίκτυα UMTS.

Τέλος σε δίκτυο UMTS οι συνδρομητές υποστηρίζονται από ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων μέχρι 144 kbit/s σε περιβάλλοντα μικρο-κυψελών και μέχρι 2 Mbit/s σε εσωτερικό περιβάλλον ή περιβάλλοντα πικο-κυψελών.

1.4.4. Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, η 2^{η} γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας δεδομένου ότι πρωταρχικός της σκοπός ήταν η υποστήριξη υπηρεσιών φωνής και όχι δεδομένων (9.6 kbit/sec), γρήγορα έδωσε τη θέση της ερευνητικά στα δίκτυα 2.5^{ης} γενιάς. Τα δίκτυα αυτά μετά

από αναβάθμιση του λογισμικού στους ΣΒ υποστήριζαν υψηλότερο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων (64-200 kbit/sec) από ότι σε δίκτυα 2ης γενιάς, ενώ οι υπηρεσίες των δικτύων αυτών ήταν προσβάσιμες μόνο από ΚΤ νέας γενιάς. Η 3η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας με τη σειρά της προσφέρει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (2-20 Mbit/sec) επιτρέποντας στους χρήστες την ανταλλαγή μεγαλύτερου όγκου πληροφορίας. Όλες οι παραπάνω αρχιτεκτονικές όμως συνεχίζουν να στηρίζονται στην αρχή της κυψελωτής τηλεφωνίας.

Το πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι δοθέντων χρόνου και χρήματος, οι πάροχοι μπορούν να αναπτύξουν εθνικά δίκτυα, κάτι το οποίο έχει ήδη γίνει από τους περισσότερους. Μερικά από τα πλεονεκτήματα είναι η απουσία ισορροπίας φορτίου σηματοδοσίας καθώς και φασματικές ανεπάρκειες. Ένα όμως από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα των υπαρχόντων δικτύων κινητής τηλεφωνίας καθώς αυτά εξελίσσονται είναι ότι αυξανομένου του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, θα πρέπει να αυξηθεί και η εκπεμπόμενη ισχύς – ή το μέγεθος των κυψελών θα πρέπει να μειωθεί – προκειμένου να υποστηρίξει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ενδεχόμενη αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος προκαλεί ανησυχίες τόσο στους χρήστες όσο και στους ελεγκτές, οπότε και είναι πιθανότερο να δούμε σημαντικά μικρότερες σε μέγεθος κυψέλες. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη περαιτέρω μείωση των κερδών στα ήδη εύθραυστα οικονομικά σχέδια των δικτύων 3ης γενιάς.

Ορίζοντας τα δίκτυα 4ης γενιάς θα μπορούσαμε να πούμε πως είναι ασύρματα επί τούτω (ad hoc) δίκτυα, διομότιμων (peer-to-peer) επικοινωνιών. Αναλύοντας τον οικονομικό παράγοντα των παρόχων, βλέπουμε πως μέχρι τώρα ακολουθούν τον κανόνα 80/20. Στα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα, περίπου το 80% του κόστους καλύπτει υποδομή και εγκατάσταση, ενώ μόνο το 20% διατίθεται για λογισμικό. Μεγαλώνοντας τα κόστη τόσο ενοικίασης όσο και συντήρησης σημαίνει ότι τα κόστη εγκατάστασης τείνουν να μεγαλώνουν με το πέρασμα του χρόνου. Με τη χρήση όμως ασύρματων επί τούτω δικτύων, διομότιμων επικοινωνιών, περίπου το 80% του κόστους της επένδυσης είναι σε ανάπτυξη λογισμικού νέας τεχνολογίας και μόνο το 20% αντιπροσωπεύει κόστος εγκατάστασης. Δεδομένου ότι το κόστος ανάπτυξης λογισμικού νέας τεχνολογίας τείνει να μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου, το οικονομικό μοντέλο για δίκτυα 4ης γενιάς καθίσταται όχι μόνο εφαρμόσιμο αλλά και κερδοφόρο με το πέρασμα του χρόνου. Έτσι, οι πάροχοι σύντομα θα είναι σε θέση να επιτύχουν οικονομίες κλίμακας, οπότε, μεταφέροντας μέρος των κερδών τους στους συνδρομητές, θα προκαλέσουν επιπλέον αύξηση του ρυθμού διείσδυσης στην αγορά. Το έτος 2000 το πλήθος των συνδρομητών κινητών τηλεπικοινωνιών ήταν περίπου 400 εκατομμύρια παγκοσμίως ενώ αναμένεται να ξεπεράσει τα 1.8 δισεκατομμύρια το έτος 2010. Ένα ευρείας κλίμακας περιβάλλον δοκιμής των δικτύων 4ης γενιάς θα παρακολουθήσουμε κατά τη διεξαγωγή των Ολυμπιακών αγώνων του Πεκίνου το 2008, όπου και θα αναπτυχθούν εφαρμογές για την κάλυψη και την ασφάλεια των αγώνων, την διαχείριση κίνησης κ.α.. διαδραματίζοντας καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχία των αγώνων.

Την ίδια στιγμή, έχουν ξεκινήσει οι διαδικασίες εφαρμογής της ασύρματης τεχνολογίας WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access), μιας εξελιγμένης και βελτιωμένης έκδοσης του Wi-Fi, που θα επιτρέπει την ασύρματη πρόσβαση σε ευρυζωνικές συνδέσεις Internet και τηλεφωνίας. Το Wi-Fi μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά με τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς, τα οποία δεν προσφέρουν πλήρη κάλυψη όλων των σημείων και είναι σχεδιασμένα για μια ευρεία κάλυψη περιοχών. Αντιθέτως, το Wi-Fi είναι σχεδιασμένο για λειτουργία σε τοπικό επίπεδο. Αυτό μπορεί να γίνει με hot-spots (μεμονωμένα ασύρματα δίκτυα, τοποθετημένα π.χ. σε αεροδρόμια) ή με hot-zones (μεγαλύτερες ζώνες λειτουργίας ασύρματων δικτύων Wi-Fi). Το πλεονέκτημα του WiMax είναι οι υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης και η δυνατότητά του να αξιοποιεί το υφιστάμενο δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας.

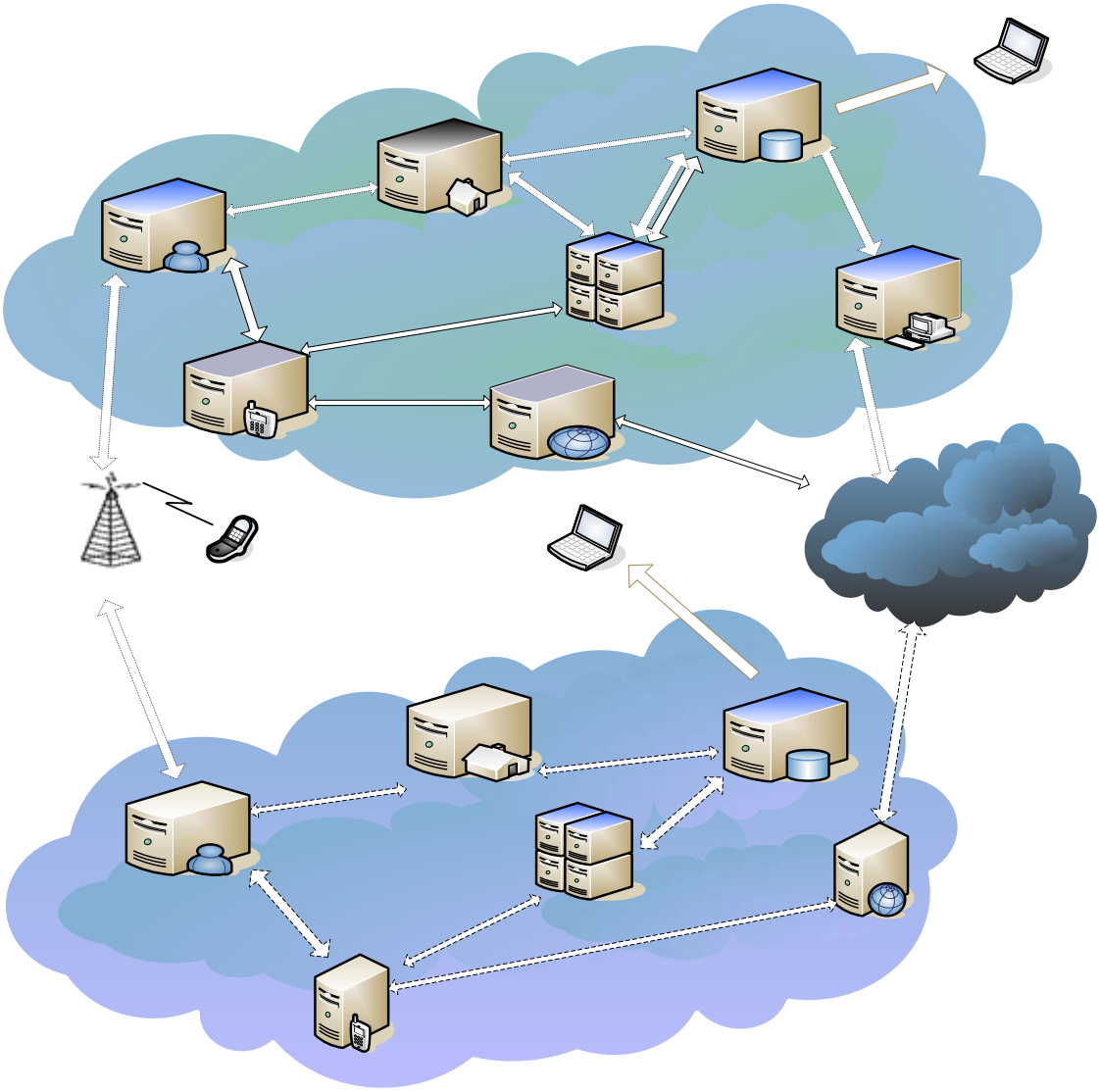
Η ανάπτυξη δοκιμαστικών σταθμών WiMax έχει ήδη ξεκινήσει σε διάφορα σημεία της χώρας από εταιρείες που εκδήλωσαν ενδιαφέρον και έλαβαν σχετικές δοκιμαστικές άδειες από την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ), ενώ βρίσκεται στο στάδιο της ολοκλήρωσής της η πιστοποίηση εξοπλισμού των πρώτων εκδόσεων του WiMax (802.16 και 802.16e). Τα επόμενα 10 χρόνια, κύριο ερευνητικό θέμα στη περιοχή των ασύρματων δικτύων, αναμένεται να αποτελέσει η ανάπτυξη δικτύων που υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξεως των 100Mbps έως 1 Gbps.

1.4.5. Ενεργά Δίκτυα

Χρήση τεχνολογιών Ενεργών Δικτύων (Active Networks) σημαίνει χρήση Ενεργών και Προγραμματίσιμων Δικτύων ([SHKS03], [P99], [TSWM97], [KT04]). Υποστήριξη ευέλικτων ΥΠΘ από Ενεργά Δίκτυα προυποθέτει συνύπαρξη τεχνολογιών εταιρογενών δικτύων (IPv4/IPv6) με δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (2G, 2.5G, 3G, 4G). Προκειμένου να επιτευχθεί το παραπάνω, οι παραπάνω τεχνολογίες χρειάζεται να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω διεπαφών οι οποίες θα πρέπει να έχουν υλοποιηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η υλοποίηση των επιθυμητών ΥΠΘ. Κάνοντας χρήση τεχνολογιών Ενεργών Δικτύων, ξεπερνάμε την ανάγκη ανάπτυξης προσαρμοσμένης υποδομής για συγκεκριμένη εφαρμογή. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4, ένας Ενεργός Κόμβος (Active Node) συνδέεται στο GMLC εξασφαλίζοντας λειτουργικότητα ΥΠΘ εκτός της υποδομής δικτύων 2^{ης} γενιάς δεδομένου ότι δίκτυα 3^{ης} γενιάς μπορούν να συνδεθούν απευθείας σε δίκτυα IPv6 κάνοντας χρήση του κόμβου GGSN.

Στην [SSGS04] προτείνεται μια αρχιτεκτονική δικτύου βασισμένη σε υπάρχουσα υποδομή δικτύων κινητής τηλεφωνίας 2ης έως 3ης γενιάς ([R93], [ETSI02]), όπου και προσθέτονται συγκεκριμένα στοιχεία δικτύου προκειμένου να υποστηριχτεί η προτεινόμενη εφαρμογή ΥΠΘ (βλέπε σχήμα 1.4.). Τα στοιχεία δικτύου αναφέρονται στη συνέχεια ενώ οι κόμβοι AN, AS/LS και GMLC αναλύονται. Στοιχεία δικτύου όπως αυτοί φαίνονται στο σχήμα 1.4. είναι BSC (Base Station Controller), HLR

(Home Location Register), VLR (Visitor Location Register), MSC (Mobile Switching Center), GGSN (Gateway GPRS support Node), SGSN (Serving GPRS Support Node), SRNC (Serving Radio Node Controller).



Σχήμα 1.4. Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου για εφαρμογή ΥΠΘ σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Η ύπαρξη του Ενεργού Κόμβου ΑΝ καθιστά δυνατή μια πολιτική διαχείρισης Ενεργών Κόμβων η οποία θα μπορούσε να δράσει συμπληρωματικά σε δίκτυα IPv6, παρέχοντας υποστήριξη ΥΠΘ. Ο εξυπηρετητής θέσεως (Location Server) χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων δικτύου κινητής τηλεφωνίας καθώς και τη συσχέτισή τους με γεωγραφική πληροφορία. Ο εξυπηρετητής εφαρμογών (Active Server) είναι ο δημιουργός αναφορών κίνησης οδικού δικτύου.

2G

Συνεργασία του με τον εξυπηρετητή θέσεως οδηγεί στην εξαγωγή προτεινόμενων κατευθύνσεων για χρήστες ΚΤ. Τέλος το GMLC (Gateway Mobile Location Center) είναι το στοιχείο υποδομής σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας $2^{ης}$ έως $3^{ης}$ γενιάς, όπου τροφοδοτεί την εφαρμογή ΥΠΘ με την απαραίτητη πληροφορία θέσεως.

Παραπομπές

[BVE99] C. Bettstetter, H-J. Vogel, and J. Eberspacher. "*GSM Phase 2+; General Packet Radio Service GPRS: Architecture, Protocols and Air Interface*", IEEE Communications Surveys, 2(3), Third Quarter 1999.

[ETSI02] ETSI, "*Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); General Packet Radio Service (GPRS) Service description; Stage 2*", (3GPP TS 123 060 version 5.4.0 Release 5), ETSI, December 2002.

[EV98] J. Eberspächer and H.-J. Vögel, "*GSM: Switching, Services and Protocols*", John Wiley & Sons, 1998.

[FHK99] S. Faccin, Liangchi Hsu, R. Koodli, Khiem Le, and R. Purnadi, "*GPRS and IS-136 Integration for Flexible Network and Services Evolution*", IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 3, pp. 48-54, June 1999.

[GSM1] GSM 03.02, "*Network architecture*".

[GSM2] GSM 02.60, "*GPRS, Service description, Stage 1*".

[GSM3] GSM 03.60, "*GPRS, Service description, Stage 2*".

[GW99] M. Gallagher, W. Webb, "*UMTS-the next generation of mobile radio*", IEE Rev., March 1999, 45, (11), pp. 59-63.

[H99] G. Heine, "*GSM Networks: Protocols, Terminology, and Implementation*", Artech House, 1999.

[KT04] D. Kagklis, C. Tsakiris, N. Liampotis, G. Balis, T. Stamoulakatos, E. Sykas, ***"A Framework for Implicit and Explicit Service Activation based on Service Level Specification",*** SAC 2004, ACM, March 2004.

[L89] W.C.Y. Lee, "*Spectrum Efficiency in Cellular*," IEEE Trans. on Veh. Tech.,vol. 38, no. 2, May 1989.

[LVL99] Lopes L., Villier E., Ludden B. "*GSM Standards Activity on Location*", IEE colloqium on Novel Methods of Location and Tracking of Cellular Mobiles and Their System Applications, London, May 1999.

[MP92] M. Mouly and M.-B. Pautet, "*The GSM System for Mobile Communications*", Telecom Pub, 1992.

[P99] K. Psounis, "*Active Networks: Applications, Security, Safety, and Architectures*", IEEE Communications Surveys, vol. 2, no. 3, Third Quarter 1999.

[R00] K. Richardson, "*UMTS overview*", Electronics & Communication Engineering Journal, 12(3):93-100, 2000.

[R93] M. Rahnema, "*Overview of the GSM System and Protocol Architecture*", IEEE Communications, vol. 31, no. 4, pp. 92- 100, April 1993.

[SHKS03] Theodore Stamoulakatos, Constantine Harbilas, Dimitrios Kagklis, Efstathios Sykas, "*Deploying Terminal Mobility in ALAN Enabled Networks*", AUTOMATICS AND INFORMATICS '03, Sofia, Bulgary, October 6-8, 2003.

[SKS03] Theodore S. Stamoulakatos, George T. Karetsos, Efstathios D. Sykas, "*A Location Based Information Service reliant on DCM cellular network location method*", 7th International Conference "Information Technologies

and Telecommunications“ in the Baltic Sea and CEE Region (Wireless Workshop), April 2-5, 2003, Riga, Latvia.

[SS03] Theodore S. Stamoulakatos, Efstathios D. Sykas, “*A network architecture to obtain traffic information for Location Based Service applications*”, ConTEL 2003 7th International Conference on Telecommunications, Zagreb, Croatia, June 11-13, 2003.

[SSGS04] Theodore Stamoulakatos, Marios S. Koumanos, Stylianos D. Goutzioupas, Efstathios D. Sykas, “*Deploying Traffic Information Service applications in any type of cellular networks*”, IEEE 12th International Conference on Telecommunications MELECON 2004, pp.631-636, Dubrovnik, Croatia, May 9-12, 2004.

[T00] Μιχαήλ Ε. Θεολόγου, “*Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών*”, Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, Μάρτιος 2000.

[TSWM97] D.Tennenhouse, J. Smith, D. Sincoskie, D. Wetherall, G. Minden, “*A survey of Active network research*”, IEEE Communications Magazine, Vol.35, No.1, pp.80-86, January 1997.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

2.0. Εισαγωγή

Στη βιβλιογραφία συναντούμε διάφορες τεχνικές υπολογισμού της ταχύτητας ΚΤ, οι οποίες βασίζονται στην υποδομή δικτύου κινητών τηλεπικοινωνιών για τη συλλογή, αναγωγή και έκθεση στοιχείων κυκλοφοριακής κίνησης οχημάτων [WH1]. Οι τεχνικές αυτές παρατίθενται στη παράγραφο 2.1.. Βασική αδυναμία αυτών των τεχνικών είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης. Από τη άλλη μεριά, τεχνικές οι οποίες εκμεταλλεύονται πληροφορία, η οποία ανταλλάσσεται σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας εκτός του σχεδόν μηδενικού κόστους εγκατάστασης, προσφέρουν επιπλέον χαμηλό κόστος συντήρησης. Οι τελευταίες προσπαθούν να μετατρέψουν τα οχήματα με ΚΤ σε "ερευνητικά" οχήματα έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε βασικές παραμέτρους κυκλοφοριακής κίνησης στους δρόμους.

Προκειμένου να επιτύχουμε το παραπάνω, χρησιμοποιούμε είτε διαδοχικές εκτιμήσεις θέσεως ΚΤ ή αξιοποιούμε μεθόδους επεξεργασίας σήματος του ΚΤ. Στην πρώτη περίπτωση, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ΚΤ δεδομένου ότι γνωρίζουμε τις θέσεις που εκείνο είχε κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του σε συγκεκριμένη διαδρομή. Υπάρχουσες μέθοδοι προσδιορισμού θέσεως ΚΤ παρατίθενται στη παράγραφο 2.2.. Στην δεύτερη περίπτωση, αξιοποιούμε τις ιδιότητες σήματος κινητής τηλεφωνίας, που και πάλι μας οδηγεί σε εκτίμηση της ταχύτητας του ΚΤ. Υπάρχουσες μέθοδοι προσδιορισμού ταχύτητας ΚΤ παρατίθενται στη παράγραφο 2.3.. Ο λόγος της εκτενούς έρευνας, όσον αφορά μεθόδους προσδιορισμού ταχύτητας ΚΤ δικαιολογείται από την ευρεία χρήση τους σε αλγόριθμους διαπομπής.

2.1. Παρακολούθηση Κίνησης και Πρόγνωση

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τις βασικές αρχές και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για συλλογή, αναγωγή και έκθεση στοιχείων, για χρόνους διανυθέντων αποστάσεων [MR90]. Εξετάζονται διάφορες μέθοδοι συλλογής χρόνων διανυθέντων αποστάσεων, προκειμένου να αυξήσουμε την ακρίβεια των εκθέσεων κίνησης, βασισμένων στη πληροφορία την οποία έχουμε ήδη συλλέξει από το υπάρχον σήμα δικτύου. Χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες τεχνικές, το μοντέλο κίνησης (το οποίο θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 6) θα γίνει περισσότερο ακριβές όπως θα περιγραφεί παρακάτω.

2.1.1. Τεχνική Δοκιμαστικού Οχήματος

Η Τεχνική Δοκιμαστικού Οχήματος έχει χρησιμοποιηθεί για συλλογή στοιχείων για χρόνους διανυθέντων αποστάσεων, από τα τέλη του 1920. Παραδοσιακά, αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τη χρήση ενός οχήματος συλλογής στοιχείων, μέσα στο οποίο ένας παρατηρητής καταγράφει αθροιστικά χρόνους διανυθέντων αποστάσεων σε προκαθορισμένα σημεία ελέγχου, κατά μήκος της προκαθορισμένης διαδρομής. Η πληροφορία αυτή μετατρέπεται σε χρόνο διαδρομής, ταχύτητα και καθυστέρηση για κάθε τμήμα της εξεταζόμενης διαδρομής. Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές μέθοδοι για την συλλογή αυτού του τύπου των στοιχείων, οι οποίες εξαρτώνται από τα όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται στο όχημα καθώς και από τις οδηγίες πλοήγησης του οχήματος, που δίνονται στον οδηγό [M90]. Από τη στιγμή που τα οχήματα είναι εξοπλισμένα με όργανα και αποστέλλονται για συλλογή στοιχείων για χρόνους διανυθέντων αποστάσεων, μερικές φορές αποκαλούνται “ενεργά” δοκιμαστικά οχήματα. Αντιστρόφως, “παθητικά” ερευνητικά οχήματα είναι τα οχήματα τα οποία είναι ήδη στην ροή της κίνησης, για λόγους διαφορετικούς από την συλλογή στοιχείων κυκλοφορίας. Τεχνικές ερευνητικών οχημάτων συζητούνται στη παράγραφο 2.1.3.. Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τρία επίπεδα χρήσης οργάνων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση χρόνων διανυθέντων αποστάσεων με δοκιμαστικό όχημα:

Πρακτικά: καταγραφή διανυθέντος χρόνου σε προκαθορισμένα σημεία ελέγχου, χρησιμοποιώντας επιβάτη στο δοκιμαστικό όχημα (Πρακτικά, Εγγραφή Κασέτας, Φορητός Υπολογιστής),

Εργαλείο Μέτρησης Απόστασης (ΕΜΑ): καθορισμός χρόνου διανυθείσας απόστασης κατά μήκος διαδρόμου, βασισμένο σε ταχύτητα και απόσταση, καταγεγραμμένο από ΕΜΑ και συνδεδεμένο με την μετάδοση του δοκιμαστικού οχήματος, και

GPS: καθορισμός της θέσης και της ταχύτητας του δοκιμαστικού οχήματος, χρησιμοποιώντας σήματα από το σύστημα του Υπουργείου Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών με τη χρήση δορυφόρων χαμηλής γήινης τροχιάς.

Επίπεδο Χρήσης Οργάνων	**Κόστος**			**Επίπεδο Ειδίκευσης**		**Επίπεδο Ακρίβειας Στοιχείων**	**Ακρίβεια Στοιχείων**	**Δυνατός Αυτοματισμός**
	Κεφάλαιο	Συλλογή Στοιχείων	Αναγωγή Στοιχείων	Συλλογή Στοιχείων	Αναγωγή Στοιχείων			
Πρακτικά	Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλό	Χαμηλό	Μέτριο	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό
Εγγραφή Κασέτας	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό	Χαμηλό	Μέτριο	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό
Φορητός Υπολογιστής	Μέτριο	Χαμηλό	Μέτριο	Μέτριο	Μέτριο	Χαμηλό	Μέτριο	Μέτριο
EMA	Υψηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Μέτριο	Χαμηλό	Υψηλό	Μέτριο	Υψηλό
GPS	Υψηλό	Χαμηλό	Μέτριο	Μέτριο	Υψηλό	Υψηλό	Υψηλό	Υψηλό

Σημείωση: Η κλίμακα βαθμολόγησης είναι σχετική μεταξύ των επιπέδων χρήσης οργάνων: [Υψηλό, Μέτριο, Χαμηλό].

Πίνακας 2.1: Σύγκριση τεχνικών δοκιμαστικού οχήματος

2.1.2. Τεχνικές Σύγκρισης Πινακίδων

Αυτή η παράγραφος περιέχει πληροφορίες για την συλλογή στοιχείων για χρόνους διανυθέντων αποστάσεων, χρησιμοποιώντας τεχνικές σύγκρισης πινακίδων. Γενικά, οι τεχνικές σύγκρισης πινακίδων αποτελούνται από καταγραφή πινακίδων οχημάτων και χρόνων άφιξης των τελευταίων σε διάφορα σημεία ελέγχου, σύγκριση των πινακίδων μεταξύ συνεχόμενων σημείων ελέγχου, καθώς και υπολογισμού διανυθέντων χρόνων αποστάσεων από τη διαφορά των χρόνων άφιξης ([B52], [R94]). Τέσσερις βασικές μέθοδοι για συλλογή και επεξεργασία πινακίδων μελετώνται στη παράγραφο αυτή (πίνακας 2.2):

Πρακτικά: συλλογή πινακίδων με χρήση στυλού και χαρτιού ή εγγραφή κασέτας ήχου και χειροκίνητη εισαγωγή πινακίδων, καθώς και χρόνων άφιξης σε φορητό υπολογιστή,

Φορητός Υπολογιστής: συλλογή πινακίδων χρησιμοποιώντας φορητούς υπολογιστές, οι οποίοι αυτόματα παρέχουν ένα αποτύπωμα χρόνου άφιξης,

Μαγνητοσκόπηση με Χειροκίνητη Εγγραφή: συλλογή πινακίδων χρησιμοποιώντας μηχανές μαγνητοσκόπησης, καθώς και χειροκίνητη καταγραφή πινακίδων, χρησιμοποιώντας ανθρώπινους παρατηρητές, και

Μαγνητοσκόπηση με Αναγνώριση Χαρακτήρων: συλλογή πινακίδων χρησιμοποιώντας μαγνητοσκόπηση και έπειτα αυτόματη καταγραφή πινακίδων και χρόνων άφιξης σε υπολογιστή, χρησιμοποιώντας μηχανογραφημένη αναγνώριση χαρακτήρων πινακίδων.

Σύγκριση των παραπάνω μεθόδων παρατίθεται στο πίνακα 2.2..

Επίπεδο Χρήσης Οργάνων	**Κόστος**			**Επίπεδο Ειδίκευσης**		**Τυπικό Μέγεθος Δείγματος**	**Επίπεδο Ακρίβειας Στοιχείων**	**Ακρίβεια Στοιχείων**	**Δυνατός Αυτοματισμός**
	Κεφάλαιο	Συλλογή Στοιχείων	Αναγωγή Στοιχείων	Συλλογή Στοιχείων	Αναγωγή Στοιχείων				
Πρακτικά	Πολύ Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Μέτριο	Χαμηλό	Χαμηλό
Φορητός Υπολογιστής	Μέτριο	Χαμηλό προς Μέτριο	Χαμηλό	Χαμηλό	Μέτριο	Μέτριο	Μέτριο	Μέτριο	Υψηλό
Μαγνητοσκόπηση με Χειροκίνητη Εγγραφή	Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλό	Μέτριο	Χαμηλό	Υψηλό	Υψηλό	Μέτριο προς Υψηλό	Μέτριο
Μαγνητοσκόπηση με Αναγνώριση Χαρακτήρων	Υψηλό	Μέτριο	Χαμηλό	Μέτριο προς Υψηλό	Μέτριο προς Υψηλό	Υψηλό	Υψηλό	Μέτριο προς Υψηλό	Υψηλό

Πίνακας 2.2. Σύγκριση τεχνικών Σύγκρισης Πινακίδων

2.1.3. Τεχνικές Ερευνητικών Οχημάτων

Οι τεχνικές ερευνητικών οχημάτων που αναλύονται σε αυτή την παράγραφο είναι μοναδικές, με την έννοια ότι είναι τυπικά εφαρμογές σχεδιασμένες πρωταρχικά για συλλογή στοιχείων σε πραγματικό χρόνο. Η πρωταρχική τους εφαρμογή είναι για συγκεκριμένο λόγο διαφορετική από τη συλλογή στοιχείων για χρόνους διανυθέντων αποστάσεων, όπως παρακολούθηση κίνησης σε πραγματικό χρόνο, ανίχνευση επεισοδίων, καθώς και εφαρμογές καθοδήγησης. Παρόλα αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή στοιχείων για χρόνους διανυθέντων αποστάσεων. Από τη στιγμή που τα Ερευνητικά Οχήματα χρησιμοποιούνται για τη συλλογή στοιχείων για χρόνους διανυθέντων αποστάσεων αλλά ήδη υπάρχουν στη ροή κίνησης για διαφορετικό λόγο, μερικές φορές αναφέρονται σαν “παθητικά” Ερευνητικά Οχήματα. Αντιθέτως, οι τεχνικές δοκιμαστικών οχήματος που συζητήθηκαν στη παράγραφο 2.1.1. μερικές φορές αναφέρονται σαν “ενεργά” Δοκιμαστικά Οχήματα. Συχνά είναι απαραίτητος ο συντονισμός μεταξύ των παραγόντων υπεύθυνων για τη λειτουργία του συστήματος και του παράγοντα που θα ήθελε να αξιοποιήσει το σύστημα για συλλογή στοιχείων για χρόνους διανυθέντων αποστάσεων. Αυτή η διάκριση ξεχωρίζει τις τεχνικές Ερευνητικών Οχημάτων από άλλες τεχνικές, όπως τις τεχνικές Δοκιμαστικού Οχήματος ή Σύγκρισης Πινακίδων [PR95].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται πέντε τύποι συστημάτων συλλογής στοιχείων ερευνητικών οχημάτων. Τα συστήματα αυτά συνήθως έχουν υψηλό κόστος εφαρμογής και ταιριάζουν σε προσπάθειες συλλογής στοιχείων μεγάλης κλίμακας. Παρόλα αυτά, επιτρέπουν τη συνεχή συλλογή στοιχείων, με την ελάχιστη ανθρώπινη αλληλεπίδραση. Ο πίνακας 2.3 παρέχει μια σύγκριση των τεχνικών

συλλογής στοιχείων με τη χρήση ερευνητικών οχημάτων. Τα συστήματα ερευνητικών οχημάτων περιγράφονται ως:

Αυτόματος Προσδιορισμός Θέσεως με χρήση Οδοδεικτών (ΑΠΘ): Η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από μέσα μεταφοράς. Ερευνητικά Οχήματα τα οποία επικοινωνούν με αναμεταδότες, τοποθετημένους σε υπάρχοντες κατασκευές οδοδεικτών.

Αυτόματη Αναγνώριση Οχήματος (ΑΑΟ): Τα ερευνητικά οχήματα είναι εξοπλισμένα με ηλεκτρονικές ετικέτες. Οι ετικέτες αυτές επικοινωνούν με αναμεταδότες κατά μήκος του δρόμου προκειμένου να προσδιορίσουν τη ταυτότητα μοναδικών οχημάτων, αλλά και για να συλλέξουν χρόνους διανυθέντων αποστάσεων μεταξύ αναμεταδοτών.

Επίγεια Ραδιοπλοήγηση: Χρησιμοποιείται συχνά σε στόλο μεταφορών ή εμπορικών οχημάτων, μοιάζοντας πολύ με το global positioning system (GPS). Στοιχεία συλλέγονται με επικοινωνία μεταξύ των Ερευνητικών Οχημάτων και ενός ραδιοπύργου.

Κυψελωτός Γεω-προσδιορισμός: Η πειραματική αυτή τεχνολογία μπορεί να συλλέξει στοιχεία για χρόνους διανυθέντων αποστάσεων, παρακολουθώντας διακριτικά τις μεταδόσεις σημάτων των κινητών τηλεφώνων κατά τη διάρκεια των κλήσεων.

GPS: Ερευνητικά Οχήματα τα οποία είναι εξοπλισμένα με GPS δέκτες καθώς και με αμφίδρομη επικοινωνία, προκειμένου να είναι σε θέση να λάβουν σήματα από γεωστατικούς (earth-orbiting) δορυφόρους. Η πληροφορία θέσης καθορισμένη από τα GPS σήματα, μεταδίδεται σε ένα κέντρο ελέγχου για τον προσδιορισμό της θέσης των Ερευνητικών Οχημάτων σε πραγματικό χρόνο.

Η πληροφορία για τους χρόνους διανυθέντων αποστάσεων μπορεί να προσδιοριστεί από τα συλλεγμένα στοιχεία.

Τεχνική	**Κόστος**				**Ακρίβεια Στοιχείων**	**Περιορισμοί**	**Εκπαίδευση οδηγού**
	Κεφάλαιο	Εγκατάσταση	Συλλογή Στοιχείων	Αναγωγή Στοιχείων			
ΑΠΘ	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό	Υψηλό	Χαμηλό	πλήθος περιοχών με οδοδείκτες, οδοί μεταφορών και αριθμός ερευνητικών οχημάτων	Καμία (χρησιμοποιούνται οχήματα μεταφορών)
ΑΑΟ	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό	πλήθος περιοχών με κεραίες και κατανομή ετικετών	Απαιτείται
Επίγεια Ραδιοπλοήγηση	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Μέτριο	πλήθος ερευνητικών οχημάτων και μέγεθος και μέγεθος εξυπηρετούμενης περιοχής	Απαιτείται
Κυψελωτός Γεω-προσδιορισμός	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό	Μέτριο	Χαμηλό	πλήθος χρηστών κινητών τηλεφώνων και σταθμών βάσης	Καμία (χρησιμοποιούνται υπάρχων χρήστες κινητών τηλεφώνων)
GPS	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλό	πλήθος ερευνητικών οχημάτων	Απαιτείται

Πίνακας 2.3. Σύγκριση τεχνικών συλλογής στοιχείων με χρήση Ερευνητικού Οχήματος

2.2. Μέθοδοι Προσδιορισμού Θέσεως Κινητού Τερματικού

Οι μέθοδοι προσδιορισμού θέσεως ΚΤ χρησιμοποιούν τα σήματα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, για να προσδιορίσουν τη θέση του ΚΤ. Από τη στιγμή που τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεν σχεδιάστηκαν αρχικά για προσδιορισμό θέσεως, η υλοποίηση των διαφορετικών μεθόδων προσδιορισμού θέσεως, ενδεχομένως να απαιτήσει νέες εγκαταστάσεις προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες μετρήσεις για τον καθορισμό θέσεως, καθώς και νέο φόρτο σήματος, προκειμένου να μεταφερθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων στη μονάδα καθορισμού θέσεως. Πριν παρουσιάσουμε τις μεθόδους προσδιορισμού θέσεως ΚΤ, καθώς και τους τρόπους εφαρμογής των, πρώτα θα ορίσουμε κάποιες αρχές που θα χρησιμοποιηθούν για την κατηγοριοποίηση των διαφορετικών μεθόδων, βασισμένων στο ρόλο του ΚΤ και του δικτύου.

Βασιζόμενοι στις λειτουργίες του ΚΤ και του δικτύου, οι υπάρχουσες εφαρμογές μεθόδου προσδιορισμού θέσεως μπορούν να καταταγούν σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες:

α. Βασισμένες στο δίκτυο

β. Βασισμένες στο ΚΤ

γ. Υποβοηθούμενες από το ΚΤ

Στις εφαρμογές βασισμένες στο δίκτυο, ένας ή περισσότεροι σταθμοί βάσεως (ΣΒ) πραγματοποιούν τις απαραίτητες μετρήσεις και στέλνουν τα αποτελέσματα αυτά σε ένα κέντρο προσδιορισμού θέσεως όπου υπολογίζεται η θέση. Στις εφαρμογές βασισμένες στο δίκτυο δεν απαιτούνται αλλαγές στα υπάρχοντα ΚΤ, γεγονός που αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα, συγκρινόμενο με τις εφαρμογές είτε βασισμένες είτε υποβοηθούμενες από το ΚΤ. Παρόλα αυτά, το ΚΤ πρέπει να είναι σε κατάσταση “ενεργούς” σύνδεσης (active mode), προκειμένου να πραγματοποιήσει μετρήσεις προσδιορισμού θέσεως από τη στιγμή που σε ανενεργή κατάσταση σύνδεσης, η διαδικασία προσδιορισμού θέσεως είναι ανέφικτη.

Στις εφαρμογές βασισμένες στο ΚΤ, το ΚΤ πραγματοποιεί τις μετρήσεις και τον καθορισμό θέσεως. Αυτό επιτρέπει τον προσδιορισμό θέσεως σε ανενεργή κατάσταση σύνδεσης, μετρώντας τα κανάλια ελέγχου τα οποία είναι σε συνεχή λειτουργία. Βοηθητική πληροφορία, π.χ. συντεταγμένες του ΣΒ, ενδεχομένως να χρειαστούν από το δίκτυο, προκειμένου να πραγματοποιήσει μετρήσεις προσδιορισμού θέσεως από το ΚΤ. Στις εφαρμογές βασισμένες στο ΚΤ, δεν υποστηρίζονται κοινά ΚΤ.

Στη τρίτη κατηγορία, όπου έχουμε τις εφαρμογές υποβοηθούμενες από το ΚΤ, περιλαμβάνονται λύσεις, όπου το ΚΤ πραγματοποιεί μετρήσεις και στέλνει τα αποτελέσματα αυτά σε ένα κέντρο προσδιορισμού θέσεως, ευρισκόμενο στο δίκτυο για περαιτέρω επεξεργασία. Με τον τρόπο αυτό το υπολογιστικό φορτίο μεταφέρεται στο κέντρο προσδιορισμού θέσεως. Παρόλο αυτά, η καθυστέρηση σήματος και ο φόρτος σήματος αυξάνονται, συγκρινόμενα με τις εφαρμογές

βασισμένες στο ΚΤ, ειδικά στη περίπτωση όπου το αποτέλεσμα προσδιορισμού θέσεως χρειάζεται στο ΚΤ. Παρόλο που στις εφαρμογές υποβοηθούμενες από το ΚΤ, δεν υποστηρίζονται ΚΤ, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων (βλέπε παράγραφο 4.1), τα οποία μεταδίδονται συνεχώς από τα GSM ΚΤ στο δίκτυο σε "ενεργή" κατάσταση. Τεχνικές που κάνουν χρήση αυτών των αποτελεσμάτων, π.χ. μετρήσεις επιπέδου ισχύος σήματος, συχνά κατηγοριοποιούνται σαν τεχνικές βασισμένες στο δίκτυο από τη στιγμή που δεν απαιτούν αλλαγές σε υπάρχοντα ΚΤ. Ωστόσο, είναι το ΚΤ εκείνο το οποίο πραγματοποιεί τις μετρήσεις και για το λόγο αυτό, οι τεχνικές αυτές θα καλούνται στο εξής τεχνικές υποβοηθούμενες από το ΚΤ.

Οι απαιτήσεις που τίθενται από διαφορετικές εφαρμογές ενδεχομένως να ευνοούν διαφορετικούς τρόπους εφαρμογής των. Για παράδειγμα, ο εντοπισμός θέσεως κλήσης κινδύνου, απαιτεί υψηλή αξιοπιστία ενώ είναι επιθυμητός ο εντοπισμός των κλήσεων αυτών από τα ήδη υπάρχοντα όπως και από καινούργιου τύπου ΚΤ. Εφαρμογές που χρησιμοποιούν συνεχή εντοπισμό, π.χ. καθορισμό πορείας, απαιτούν υψηλή ακρίβεια και γρήγορο εντοπισμό με ένα σταθερό ρυθμό ανανέωσης. Από τη στιγμή που το αποτέλεσμα της διαδικασίας προσδιορισμού θέσεως χρειάζεται στο ΚΤ στην περίπτωση αυτή, οι απαιτήσεις εκπληρώνονται με τον καλύτερο τρόπο χρησιμοποιώντας λύση βασισμένη στο κινητό. Μερικές εφαρμογές, π.χ. παρακολούθηση κυκλοφορίας και σχεδιασμός δικτύου υποβοηθούμενο από τον προσδιορισμό θέσεως (location aided network planning-LAP), απαιτούν μαζική ικανότητα προσδιορισμού θέσεως στο δίκτυο. Οι απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιηθούν μόνο από εφαρμογές βασισμένες στο δίκτυο ή υποβοηθούμενες από το κινητό στις έως σήμερα προτεινόμενες λύσεις. Στο πίνακα 2.4. παρατίθενται χαρακτηριστικά ορισμένων από τις μεθόδους προσδιορισμού θέσεως ΚΤ που περιγράφονται στη συνέχεια ([S03]).

Πίνακας 2.4.

Χαρακτηριστικά Μεθόδων Προσδιορισμού Θέσεως ΚΤ

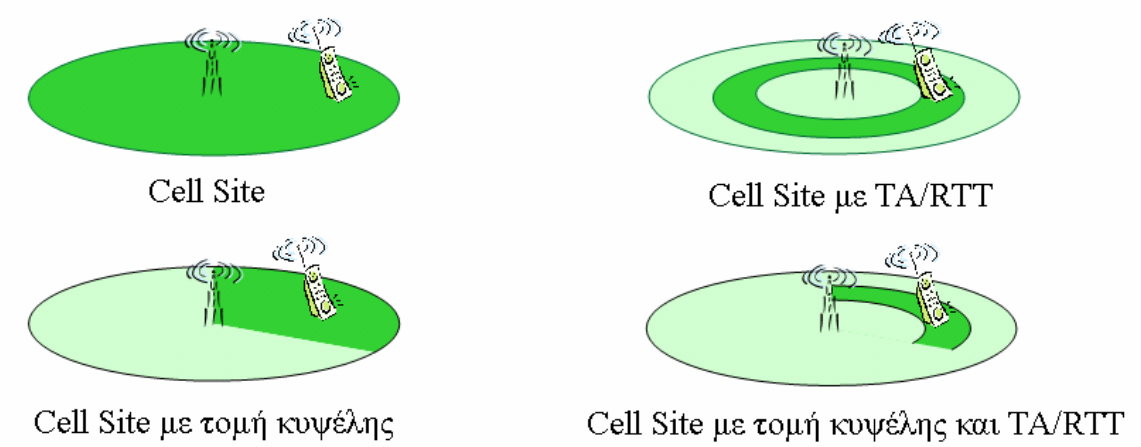
Μέθοδος	GSM/ UMTS standard	Κάλυψη σε: Αστικό Περιβάλλον Προαστιακό Περιβάλλον Ύπαιθρος	Καταλληλότητα για "εκτίμηση θέσης συνόλου ΚΤ"/ Επιπλέον Σηματοδοσία
Signal strength	No	Υψηλή Υψηλή Χαμηλή (απαιτούνται 3 ΣΒ)	Υψηλή / Όχι
Angle of arrival (AOA)	No	Υψηλή Υψηλή Μέτρια (απαιτούνται 2 ΣΒ)	Χαμηλή / Όχι
uplink TOA	GSM	Υψηλή Υψηλή Χαμηλή (απαιτούνται 3 ΣΒ)	Χαμηλή / Όχι
E-OTD	GSM	Υψηλή Υψηλή Χαμηλή (απαιτούνται 3 ΣΒ)	Χαμηλή / Ναι (μετρήσεις OTD)
OTDOA	UMTS	Μέτρια Μέτρια Χαμηλή ("πρόβλημα ακουστικότητας")	Υψηλή / Όχι
A-GPS	UMTS	Μέτρια Υψηλή Υψηλή	Χαμηλή / Ναι (μετρήσεις ψευδοαπόστασης)

2.2.1.Αναγνώριση Ταυτότητας Κυψέλης

Η απλούστερη μέθοδος για τον προσδιορισμό θέσεως ΚΤ βασίζεται στην αναγνώριση ταυτότητας κυψέλης (Cell Global Identity – CGI). Από τη στιγμή όπου αυτό είναι ένα δομικό χαρακτηριστικό των κυψελωτών συστημάτων, ελάχιστες αλλαγές στα υπάρχοντα συστήματα απαιτούνται. Η ταυτότητα κυψέλης σχετίζεται μόνο με την τοποθεσία, π.χ. πρέπει να είναι γνωστές οι συντεταγμένες του ΣΒ. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σαν τεχνική βασισμένη στο δίκτυο ή στο κινητό. Σαν εφαρμογή βασισμένη στο κινητό, το δίκτυο θα πρέπει συνεχώς να μεταδίδει τις συντεταγμένες στο κανάλι ελέγχου.

Άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν χρειάζονται υπολογισμοί, προκειμένου να προσδιοριστεί η πληροφορία θέσεως. Έτσι, η μέθοδος αναγνώρισης ταυτότητας κυψέλης είναι γρήγορη και κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο δείγμα. Το μειονέκτημα είναι ότι το επίπεδο ακρίβειας σχετίζεται άμεσα με την ακτίνα κυψέλης, η οποία μπορεί να είναι πολύ μεγάλη ειδικά σε αγροτικές περιοχές (έως 30 χλμ.). Σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές είναι σχετικά καλύτερο λόγω της μικρότερης ακτίνας κυψέλης (50 μ. σε εσωτερικούς χώρους). Το επίπεδο ακρίβειας μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας πληροφορία καλυπτόμενης περιοχής από κυψέλες

(π.χ. τομείς κυψελών) και προπορεία συγχρονισμού (timing advance-TA) στο GSM ή χρόνο πλήρους διαδρομής (round trip time-RTT) στο UMTS.



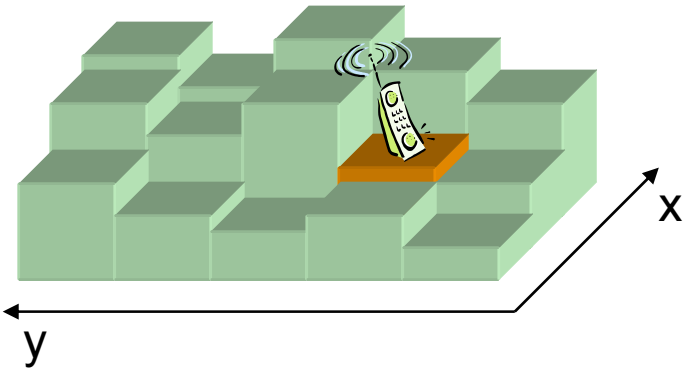
Σχήμα 2.1. Αναγνώριση Ταυτότητας Κυψέλης

2.2.2. Ισχύς Λαμβανομένου Σήματος

Χρησιμοποιώντας μετρήσεις ισχύος λαμβανομένου σήματος από τα κανάλια ελέγχου αρκετών ΣΒ, μπορούν να υπολογιστούν οι αποστάσεις μεταξύ του ΚΤ και των ΣΒ. Θεωρώντας γεωμετρία δύο διαστάσεων, μία μη-κατευθυντική κεραία ΣΒ και ελεύθερες συνθήκες διάδοσης, τα επίπεδα ισχύος σήματος διαμορφώνουν γύρω από τους ΣΒ κύκλους. Στη περίπτωση που είναι γνωστά τα επίπεδα ισχύος σήματος από τρεις διαφορετικούς ΣΒ, η θέση του ΚΤ μπορεί να προσδιοριστεί ως το μοναδικό σημείο τομής των τριών κύκλων. Ωστόσο, οι συνήθεις συνθήκες διάδοσης, ειδικά σε αστικές περιοχές διαφέρουν σε σχέση με τη διάδοση σε ελεύθερο χώρο. Για το λόγο αυτό, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο διάδοσης εξαρτημένο από το περιβάλλον, σχετικό με την ισχύ του λαμβανόμενου επιπέδου σήματος, για τον προσδιορισμό της απόστασης ΣΒ και ΚΤ. Σε αστικές περιοχές, το λαμβανόμενο επίπεδο ισχύος σήματος γενικά μειώνεται γρηγορότερα αναφορικά με την απόσταση, από ότι στην ύπαιθρο.

Η πολλαπλή διόδευση (διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών) και η σκίαση δημιουργούν πρόβλημα στον προσδιορισμό της απόστασης βασισμένο στο επίπεδο ισχύος σήματος. Στιγμιαία, το επίπεδο ισχύος στενοζωνικού σήματος μπορεί να κυμαίνεται έως 30-40dB για απόσταση μόνο κλάσματος του μήκους κύματος. Τυχαίες διακυμάνσεις αυτής της τάξεως μεγέθους προκαλούν μεγάλα λάθη στον προσδιορισμό αποστάσεως. Παρόλα αυτά, γρήγορες διαλείψεις μπορούν να ομαλοποιηθούν με υπολογισμό του μέσου όρου της ισχύος σήματος, στο χρόνο και στο φάσμα συχνοτήτων. Ο υπολογισμός του μέσου όρου της ισχύος σήματος στο χρόνο έχει μικρή επίδραση, λόγω της κίνησης στο γύρω περιβάλλον, αν το ΚΤ είναι στάσιμο. Σε αντίθεση με τις γρήγορες διαλείψεις, οι τυχαίες διακυμάνσεις οφειλόμενες σε σκίαση δεν μπορούν να αντισταθμιστούν. Για το λόγο αυτό, οι

διακυμάνσεις στην προσαρμογή της κεραίας και οι τοπικές συνθήκες σκίασης γύρω από το ΚΤ (εσωτερικού χώρου, μέσα σε όχημα κλπ.) θεωρούνται ως τυχαία λάθη, κατά τον προσδιορισμό της απόστασης και συνεπώς στον προσδιορισμό θέσεως. Το επίπεδο ακριβείας εξαρτάται επίσης από την ακρίβεια του μοντέλου διάδοσης καθώς και από τον αριθμό των διαθέσιμων μετρήσεων.

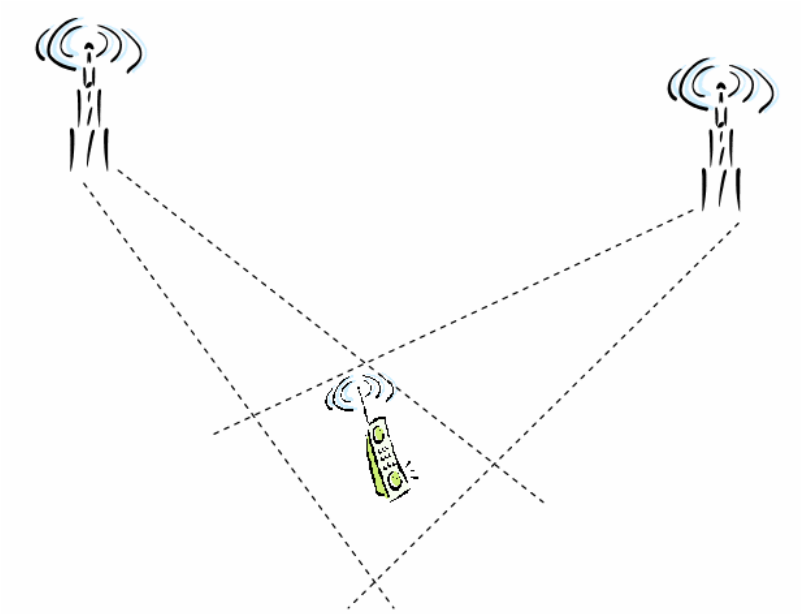


Σχήμα 2.2. Ισχύς Λαμβανομένου Σήματος

Η μέθοδος ισχύος σήματος μπορεί να εφαρμοστεί τόσο ως υποβοηθούμενη όσο και ως βασιζόμενη στο ΚΤ. Στις εφαρμογές βασισμένες στο δίκτυο απαιτείται οι συντεταγμένες του ΣΒ να μεταδίδονται στο ΚΤ. Η μέθοδος ισχύος σήματος είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε δίκτυο GSM, βασισμένη σε αποτελέσματα μετρήσεων, μετρήσεις οι οποίες συνεχώς μεταδίδονται από το ΚΤ στο δίκτυο, όντας σε "ενεργή" κατάσταση. Για το λόγο αυτό δεν απαιτούνται αλλαγές στα υπάρχοντα ΚΤ, ενώ συχνά καλείται μέθοδος βασιζόμενη στο δίκτυο, παρόλο που το ΚΤ πραγματοποιεί τις μετρήσεις. Μια εναλλακτική εφαρμογή είναι η τροποποίηση του ΚΤ, προκειμένου να είναι σε θέση να μεταδίδει τα αποτελέσματα των μετρήσεων ακόμα και σε κατάσταση ανενεργούς σύνδεσης. Κινητά τερματικά GSM με τέτοια δυνατότητα είναι ήδη διαθέσιμα. Η μέθοδος της ισχύος λαμβανομένου σήματος είναι εύκολα υλοποιήσιμη με χαμηλό κόστος εφαρμογής, προκειμένου να βελτιώσουμε το επίπεδο ακριβείας της μεθόδου αναγνώρισης ταυτότητας κυψέλης.

2.2.3. Γωνία Λήψης Σήματος

Πληροφορία για τη Γωνία Λήψης Σήματος (Angle of Arrival - AOA), μετρημένη στο ΣΒ χρησιμοποιώντας κεραιοσυστοιχία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσδιορισμό θέσεως. Θεωρώντας γεωμετρία δύο διαστάσεων, μετρήσεις για τη γωνία λήψης σε δύο ΣΒ είναι αρκετές για το καθορισμό μοναδικού στοιχείου, όπου η θέση του χρήστη καθορίζεται σαν το σημείο τομής των δύο γραμμών με αρχή τους ΣΒ (σχήμα 2.3). Φαίνεται πως η τεχνική της Γωνίας Λήψης Σήματος απαιτεί οπτική επαφή (συνθήκες Line Of Sight – LOS) μεταξύ του ΚΤ και των ΣΒ για ακριβή αποτελέσματα. Ακόμα, η αβεβαιότητα των μετρήσεων Γωνίας Λήψης Σήματος προκαλεί αβεβαιότητα στον προσδιορισμό θέσεως, η οποία αυξάνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση ΚΤ και ΣΒ. Η ακρίβεια που θα επιτευχθεί εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων μετρήσεων, τη γεωμετρία των ΣΒ γύρω από το ΚΤ καθώς και από τη διάδοση πολλαπλών διαδρομών.



Σχήμα 2.3. Προσδιορισμός θέσεως με τη μέθοδο Γωνίας Λήψης Σήματος

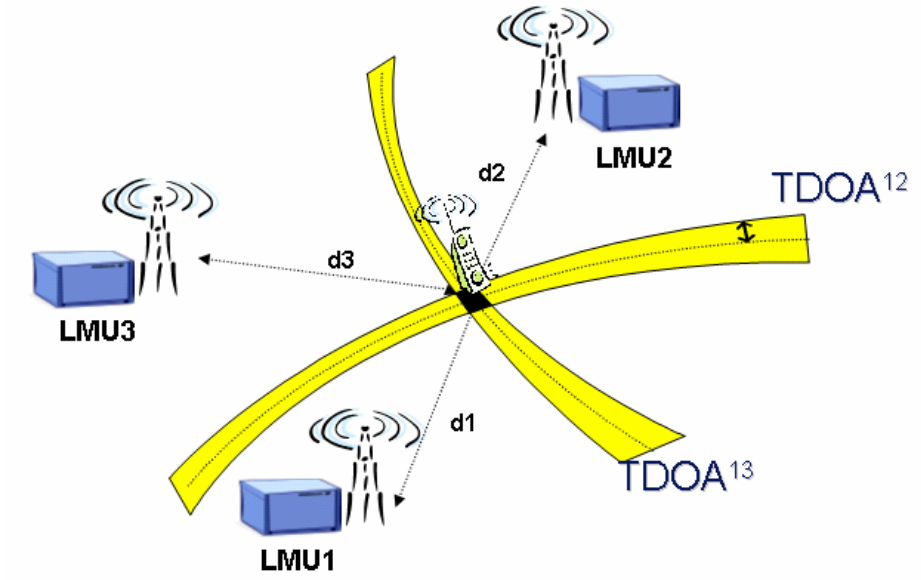
Από τη στιγμή που η μέθοδος Γωνίας Λήψης Σήματος χρειάζεται LOS συνθήκες μετάδοσης, προκειμένου να επιτευχθεί αποδεκτή προσέγγιση θέσεως, γίνεται φανερό ότι δεν θα ήταν η επιλογή μας, στην περίπτωση πυκνοκατοικημένων αστικών περιοχών, όπου σπάνια απαντώνται συνθήκες LOS μεταξύ δύο ΣΒ. Στη παραπομπή [SAK92], με τη μέθοδο της ρίζας των ελαχίστων τετραγώνων, παρατηρήθηκε λάθος προσδιορισμού θέσεως περίπου 300μ. με δύο (2) ΣΒ και 200μ. με τρεις (3) ΣΒ, σε αστικό περιβάλλον. Παρόλα αυτά, η τεχνική Γωνίας Λήψης Σήματος, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε αγροτικές και προαστιακές περιοχές, όπου το εφικτό επίπεδο ακρίβειας είναι υψηλότερο, με το πλεονέκτημα του προσδιορισμού θέσεως ΚΤ, χρησιμοποιώντας δύο ΣΒ.

Σημαντικό εμπόδιο στην εφαρμογή της μεθόδου Γωνίας Λήψης Σήματος στα υπάρχοντα δίκτυα 2^{ης} γενιάς, είναι η ανάγκη ύπαρξης κεραιοσυστοιχίας σε κάθε ΣΒ. Θα ήταν βέβαια εξαιρετικά δαπανηρή η δημιουργία ενός "δικτύου" αισθητήρων Γωνίας Λήψης Σήματος στα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Παρόλα αυτά, από τη στιγμή που είναι μέθοδος βασισμένη στο δίκτυο υποστηρίζοντας κοινά ΚΤ, αναπτύσσεται από πολλές εταιρείες σαν μια λύση για την υπηρεσία E911. Στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς, μετρήσεις για τη Γωνίας Λήψης Σήματος θα παίρνονται χωρίς ξεχωριστό εξοπλισμό αν αναπτυχθούν ευρέως προσαρμόσιμες κεραίες των ΣΒ.

2.2.4. Μέθοδος Χρονικής Διαφοράς Αφίξεως Σήματος Ανερχόμενης Ζεύξης

Μετρήσεις σήματος με τη Μέθοδος Χρονικής Διαφοράς Αφίξεως Σήματος Ανερχόμενης Ζεύξης (uplink Time difference Of Arrival – TOA), οι οποίες πραγματοποιούνται είτε στους ΣΒ είτε στο ΚΤ, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό θέσεως. Σε περίπτωση που οι ΣΒ και το ΚΤ είναι πλήρως συγχρονισμένα, οι μετρήσεις TOA είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις

αποστάσεις ΣΒ και ΚΤ, ενώ τρεις μετρήσεις είναι απαραίτητες για μοναδικό προσδιορισμό θέσεως σε δύο διαστάσεις. Σε περίπτωση που το δίκτυο δεν είναι συγχρονισμένο, όπως τα δίκτυα GSM και UMTS FDD, οι μετρήσεις TOA μπορούν μόνο να χρησιμοποιηθούν με διαφορικό τρόπο. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, είναι απαραίτητη η ύπαρξη κοινού σημείου αναφοράς για τους ΣΒ. Δύο μετρήσεις TOA στη συνέχεια ορίζουν μια υπερβολή, και τέσσερις μετρήσεις χρειάζονται για σαφή προσδιορισμό θέσεως σε δύο διαστάσεις.



Σχήμα 2.4. Προσδιορισμός θέσεως με τη μέθοδο Χρονικής Διαφοράς Αφίξεως Σήματος Ανερχόμενης Ζεύξης

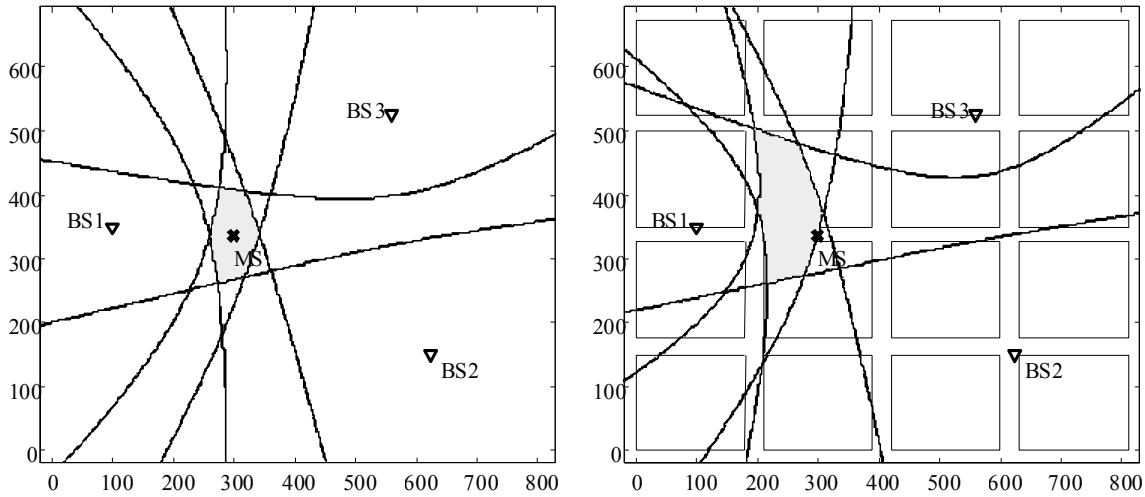
Σε περίπτωση που οι μετρήσεις πραγματοποιηθούν στους ΣΒ, μιλάμε για μια τεχνική βασισμένη στο δίκτυο. Η τεχνική αυτή έχει το εξής μειονέκτημα συγκρινόμενη με τη μέθοδο κατερχόμενης ζεύξης: πραγματοποίηση μετρήσεων είναι δυνατή μόνο όταν το ΚΤ βρίσκεται σε "ενεργή" κατάσταση σύνδεσης. Το πλεονέκτημα είναι ότι η εφαρμογή της TOA ανερχόμενης ζεύξεως που είναι βασισμένη στο δίκτυο, υποστηρίζει κοινά ΚΤ. Θεωρήθηκε σαν επιλογή για την υπηρεσία E911 κατά τη διαδικασία προτυποποίησης του GSM [LVL99]. Κατά την εφαρμογή της τεχνικής TOA ανερχόμενης ζεύξεως σε GSM, μια κοινή χρονική αναφορά, π.χ. χρήση GPS δέκτη, είναι απαραίτητη σε κάθε περιοχή ΣΒ. Ο προσδιορισμός θέσεως ενός ΚΤ κατά τη διάρκεια κλήσης υλοποιείται αναγκάζοντας το ΚΤ να κάνει αίτηση διαπομπής (handover) σε γειτονικούς ΣΒ. Ακολούθως το ΚΤ στέλνει ριπές πλήρους ισχύος και οι μετρήσεις TOA πραγματοποιούνται από αυτές τις ριπές.

2.2.5. Χρονικές Διαφορές Κατερχόμενης Ζεύξης

Στις τεχνικές Χρονικών Διαφορών Κατερχόμενης Ζεύξης (downlink observed time differences), το ΚΤ παρατηρεί τις χρονικές διαφορές σημάτων γειτονικών ΣΒ. Τα σήματα αυτά συνήθως είναι

σήματα καναλιών ελέγχου και για το λόγο αυτό, το ΚΤ μπορεί να πραγματοποιεί μετρήσεις τόσο σε "ανενεργή" όσο και σε "ενεργή" κατάσταση σύνδεσης. Οι διαφορές των χρονικών μηχανισμών των ΣΒ μπορούν να επιλυθούν έχοντας ένα δέκτη αναφοράς σε γνωστή θέση, μετρώντας συνεχώς τις παρατηρούμενες χρονικές διαφορές. Ο τρόπος αυτός είναι απλούστερος και πολύ οικονομικότερος από το να συγχρονιστούν όλες οι εκπομπές ΣΒ.

Η ακρίβεια όλων των τεχνικών βασισμένων σε χρονικές διαφορές (τόσο ανερχόμενης όσο και κατερχόμενης ζεύξης) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η ακρίβεια συγκεκριμένης μέτρησης χρονικής διαφοράς εξαρτάται από το εύρος του φάσματος σήματος, όπως και από το φυσικό κανάλι πολλαπλών διαδρομών. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 2.4 με περιθώριο λάθους για κάθε μέτρηση χρονικής διαφοράς.



Σχήμα 2.5. Προσδιορισμός θέσεως βασισμένος σε μετρήσεις χρονικών διαφορών σε ύπαιθρο (αριστερά) και αστικό περιβάλλον (δεξιά)

Σε αστικό περιβάλλον, το περιθώριο λάθους είναι μεγάλο, από τη στιγμή που οι κορεσμένες πολλαπλές διαδρομές, κάνουν δυσκολότερη την εύρεση του χρόνου άφιξης της πρώτης ηχούς. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν συνθήκες LOS μεταξύ του ΚΤ και των εμπλεκόμενων ΣΒ, οι προσεγγίσεις θέσεως θα αποκλίνουν (σχήμα 2.5). Το πρόβλημα αυτό απαντάται ειδικά στις αστικές περιοχές. Στην ύπαιθρο η γεωμετρία των ΣΒ γύρω από το ΚΤ ενδεχομένως να δημιουργήσει λάθος κατά την εκτίμηση θέσεως, το οποίο περιγράφεται από τη σφάλμα γεωμετρίας μετρητών (geometrical dilution of precision - GDOP). Μια ευνοϊκή γεωμετρία ακολουθεί την ομοιόμορφη κατανομή των ΣΒ γύρω από το ΚΤ. Επίσης ο αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων επιδρά στο επίπεδο ακριβείας. Γενικά, είναι καλύτερο να έχουμε όσο το δυνατόν περισσότερες μετρήσεις.

Οι τεχνικές χρονικών διαφορών κατερχόμενης ζεύξης είτε υποβοηθούνται είτε βασίζονται στο ΚΤ. Στις εφαρμογές των τεχνικών υποβοηθούμενων από το ΚΤ, το τελευταίο στέλνει τα αποτελέσματα

των μετρήσεων χρονικών διαφορών σε ένα κέντρο προσδιορισμού θέσεως, όπου υπολογίζεται η θέση βασισμένη στις παραπάνω μετρήσεις όπως και στις μετρήσεις από το δέκτη αναφοράς. Στις εφαρμογές των τεχνικών χρονικών διαφορών κατερχόμενης ζεύξης, βασιζόμενες στο ΚΤ, οι συντεταγμένες των ΣΒ, όπως επίσης και τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τους δέκτες αναφοράς, μεταδίδονται στο ΚΤ. Κατά την τυποποίηση των δικτύων GSM και UMTS, οι τεχνικές αυτές καλούνται Enhanced Observed Time Differences (E-OTD) και Observed Time Difference of Arrival (OTDOA), αντιστοίχως (βλέπε [3G01]).

2.2.6. Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσεως (GPS)

2.2.6.1. Συμβατικό GPS

Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσεως (Global Positioning System – GPS) είναι ένα σύστημα δορυφορικής ραδιοπλοήγησης, χρηματοδοτούμενο και ελεγχόμενο από το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών (DoD) [A93]. Παρόλη τη μεγάλη βάση των εκατομμυρίων πολιτικών χρηστών του συστήματος παγκοσμίως, το σύστημα σχεδιάστηκε και λειτουργεί από προσωπικό του Στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών. Το GPS παρέχει ειδικά κωδικοποιημένα δορυφορικά σήματα τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν μόνο δέκτες GPS, κάνοντας δυνατό τον προσδιορισμό της θέσεως του δέκτη, καθώς και της ταχύτητάς του. Τέσσερα δορυφορικά σήματα GPS είναι αρκετά για τον υπολογισμό της θέσεως σε τρεις διαστάσεις, καθώς και το άγνωστο χρονικό αντιστάθμισμα (offset) στο ρολόι του δέκτη.

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στους δορυφόρους GPS. Ένα πλήθος εικοσι-τεσσάρων (24) LEO-SV δορυφόρων Χαμηλής Γήινης τροχιάς (Low Earth Orbit - Satellite Vehicles) είναι τοποθετημένο σε τέτοιες τροχιές ώστε να μπορούν να καλύψουν ολόκληρη την επιφάνεια της γης, ενώ σε κάθε χρονική στιγμή 4 με 6 δορυφόροι βρίσκονται σε τροχιά αναμονής, προκειμένου να αντικαταστήσουν κάποιον άλλο δορυφόρο σε περίπτωση βλάβης του τελευταίου. Οι δορυφόροι αυτοί ολοκληρώνουν μια πλήρη περιστροφή γύρω από τη γη κάθε δώδεκα (12) ώρες. Παρόλη την αναγκαιότητα του συστήματος αυτού σαν σύστημα πλοήγησης για χρήση τόσο από τη ναυτιλία όσο και από την αεροπλοΐα, το σύστημα δεν είναι τόσο καλά προσαρμοσμένο για αστική χρήση καθώς χρειάζεται να έχει άμεση ορατότητα (συνθήκες LOS) με τους χρησιμοποιούμενους, για τον υπολογισμό θέσεως, δορυφόρους. Η προϋπόθεση αυτή άμεσα εξαιρεί τη χρήση του μέσα σε κτίρια ή ακόμα και σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές.

Τρεις τυπικές περιπτώσεις μπορούμε να διακρίνουμε κατά την εκκίνηση λειτουργίας της υπηρεσία GPS:

α. Cold Start - 12 λεπτά

β. Warm Start – περίπου 1 λεπτό

γ. Hot Start – περίπου 15 λεπτά (τελευταία εκτίμηση το πολύ πριν από 1 λεπτό)

Τα επίπεδα ακριβείας ανάλογα με τη περιοχή δίνονται από το παρακάτω πίνακα:

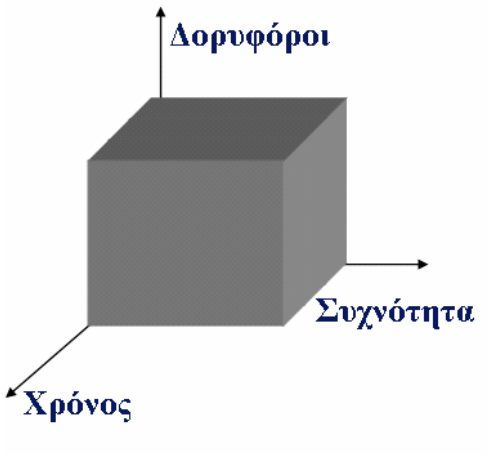
Πίνακας 2.5.

Επίπεδα ακριβείας της μεθόδου GPS

Ύπαιθρος	Ημιαστική	Αστική	Εσωτερικός χώρος
10m	~20m	30-100m	Δεν καλύπτει

Γενικότερα η υπηρεσία αυτή δε δουλεύει αποδοτικά όταν ο ουρανός είναι συννεφιασμένος, ενώ ο χρόνος προσδιορισμού θέσεως είναι μεγάλος, εκτός και αν η συσκευή μας εντοπίζει διαρκώς δορυφόρους.

Προκειμένου να βελτιωθούν οι υπηρεσίες προσδιορισμού θέσεως που παρέχονται στους πολίτες, έχουν παρουσιαστεί τεχνικές γνωστές ως Διαφορικό (Differential) GPS και Υποβοηθούμενο (Assisted) GPS (A-GPS) . Ειδικά το A-GPS υπόσχεται αποτελεσματική βελτίωση των παραμέτρων απόδοσης, όπως ακρίβεια, χρονική καθυστέρηση (τη πρώτη φορά που επιχειρεί προσδιορισμό θέσεως) (παράμετρος time-to-first-fix) αλλά και κάλυψη, ειδικά στη περίπτωση που το σύστημα χρησιμοποιείται σε πυκνοκατοικημένα αστικά περιβάλλοντα, προς παροχή πληροφορίας θέσεως και ΥΠΘ.



Σχήμα 2.6. Συμβατικό GPS

Μέχρι και πριν από λίγο καιρό, το περιορισμένο μερίδιο της αγοράς μονάδων λήψης GPS οφειλόταν τόσο στο μικρό αριθμό εταιρειών που δραστηριοποιούντο στο χώρο όσο και στο σχετικά, υψηλό κόστος τους, καθιστώντας την αγορά τους ασύμφορη. Η πραγματικότητα αυτή όμως έχει πλέον αλλάξει. Οι νέες γενιές αυτόνομων μονάδων λήψης GPS έχουν αισθητά μικρότερο μέγεθος, καθώς

και χαμηλότερο κόστος, ενώ επιπρόσθετα παρέχουν αυξημένη αξιοπιστία, χαρακτηριστικά που εξασφαλίζουν ευκολία χρήσης ακόμα και στα πιο 'δύσκολα' περιβάλλοντα.

2.2.6.2. Υποβοηθούμενο GPS (A-GPS)

Οι μέθοδοι A-GPS έχουν σαν στόχο να βοηθήσουν το ΚΤ στον προσδιορισμό της θέσεώς του, χρησιμοποιώντας το σύστημα GPS. Τέτοιες τεχνολογίες – ήδη διαθέσιμες στην αγορά – κάνουν δυνατή τη λήψη δορυφορικών σημάτων GPS ακόμα και πολύ χαμηλής ισχύος, επιτρέποντας σε ορισμένες περιπτώσεις τον προσδιορισμό της θέσεως των χρηστών, ακόμα και όταν ο χρήστης είναι σε εσωτερικό χώρο. Οι περισσότερες μέθοδοι απαιτούν ένα επιπλέον κύκλωμα στο ΚΤ καθώς και έναν ειδικό εξυπηρετητή. Το ΚΤ περνά τις κωδικοποιημένες μετρήσεις GPS στον εξυπηρετητή, ο οποίος προσεγγίζει τη θέση του καλώντος. Μια παραλλαγή της μεθόδου αυτής αυτόματα ενημερώνει τον – ενσωματωμένο στο ΚΤ – δέκτη GPS, χρησιμοποιώντας πληροφορία εφημερίδος (ephemeris), της τελευταίας ώρας.

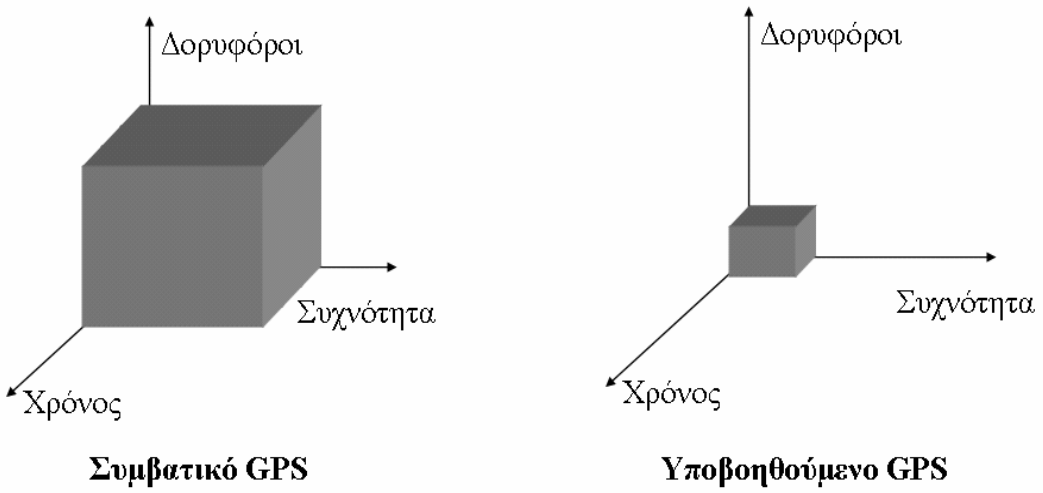
Η μέθοδος A-GPS βελτιστοποιεί τις παρακάτω παραμέτρους της μεθόδου GPS:

α. Χρόνος προσδιορισμού πρώτης φοράς (Time To First Fix)

β. Χρόνος ζωής μπαταρίας

γ. Ευαισθησία

δ. Κόστος



Σχήμα 2.7. Βελτίωση στο χρόνο του TTFF

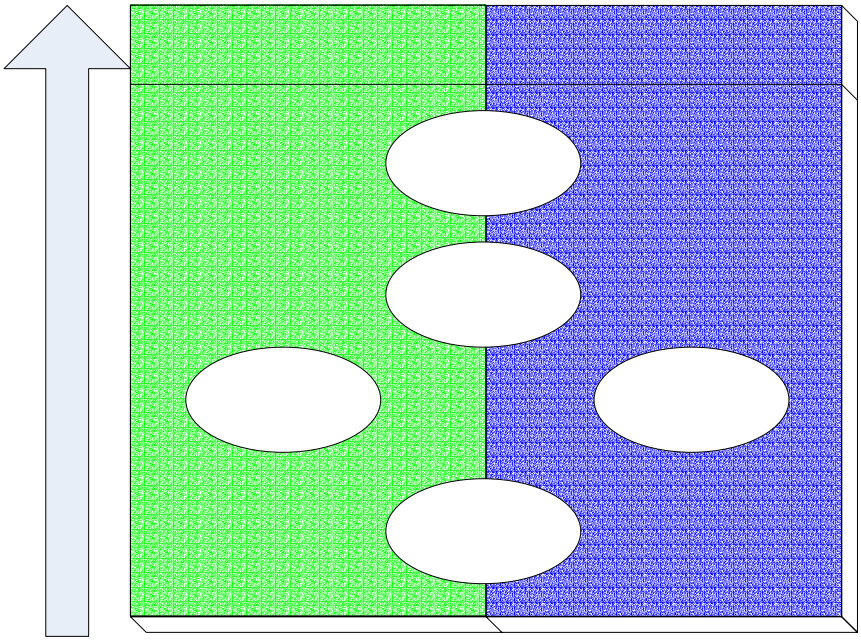
2.2.6.3. Άλλα συστήματα δορυφορικού προσδιορισμού θέσεως

Το Ρωσικό αντίστοιχο του GPS ονομάζεται “GLONASS”. Το σύστημα παρέχει υψηλή ακρίβεια, ωστόσο η παρεχόμενη υπηρεσία δεν είναι αξιόπιστη, από τη στιγμή που το σύστημα μπορεί να

ξεκινάει και να σταματάει τη λειτουργία του χωρίς προειδοποίηση. Επιπλέον το GLONASS είναι επιρρεπές στις βλάβες των δορυφόρων, ενώ η πενιχρή χρηματοδότηση δυσκολεύει σε συνηθισμένες αντικαταστάσεις δορυφόρων.

Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency – ESA) αναπτύσσει το δικό της σύστημα, το οποίο ονομάζεται GALILEO. Στόχος του GALILEO είναι η επίτευξη αρχής λειτουργίας (Initial Operation Capability) μέσα στο 2006, περίπου 20 χρόνια μετά το IOC του GPS οπότε και αναμένεται να τεθεί σε τροχιά ο πρώτος από τους συνολικά τριάντα (30) δορυφόρους του συστήματος GALILEO. Σκοπός μεταξύ άλλων του πρώτου αυτού δορυφόρου είναι να διασφαλίσει τις δεσμευμένες ραδιοσυχνότητες για το σύστημα GALILEO ενώ θα ελέγξει όντας σε τροχιά, την απόδοση των δύο ατομικών ρολογιών του συστήματος των οποίων η λειτουργία κρίνεται κρίσιμη για κάθε σύστημα δορυφορικής πλοήγησης Επίσης θα ελεγχθούν πλήθος άλλων εξαρτημάτων, τα οποία και θα ενσωματωθούν στους δορυφόρους που θα ακολουθήσουν, προκειμένου να ολοκληρωθεί το δορυφορικό σύστημα GALILEO, περί το τέλος του 2010.

Τα συστήματα GPS, GALILEO και ενδεχομένως το GLONASS αναμένεται να σχηματίσουν το εδώ και καιρό αναμενόμενο παγκόσμιο σύστημα δορυφορικής πλοήγησης GNSS-2.



Σχήμα 2.8. Σχηματική αναπαράσταση της απόδοσης Υβριδικών και άλλων τεχνικών Προσδιορισμού Θέσης ΚΤ

2.2.7. Υβριδικές Μέθοδοι

Τεχνικές υβριδικού προσδιορισμού θέσεως συνδυάζουν πολλές από τις μεθόδους που περιγράφηκαν πρωτύτερα για παροχή προσεγγίσεων θέσεως με μεγαλύτερη ακρίβεια, αξιοπιστία και κάλυψη, περιλαμβάνοντας εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, αστικές περιοχές και ύπαιθρο. Οι υβριδικές τεχνικές δεν είναι τυποποιημένες, ενώ το απαραίτητο φορτίο σήματος μπορεί να μην είναι διαθέσιμο. Τα μειονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων είναι συνήθως μεγαλύτερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ για επεξεργασία καθώς και αυξημένο κόστος. Χρησιμοποιώντας μια υβριδική μέθοδο π.χ. περιλαμβάνοντας δύο τεχνικές, το κόστος θα ήταν τέτοιο όσο αν χρησιμοποιούσαμε δύο διαφορετικές λύσεις.

2.2.7.1. CGI + TA / CGI+ RTT

Η ακρίβεια της μεθόδου Αναγνώρισης Ταυτότητας Κυψέλης μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω περιλαμβάνοντας μέτρηση της προπορεία συγχρονισμού (Timing Advance – TA) σε δίκτυα GSM/GPRS ή του χρόνο πλήρους διαδρομής (Round Trip Time – RTT) σε δίκτυα UMTS. Οι μέθοδοι TA και RTT χρησιμοποιούν τη χρονική πληροφορία offset η οποία στέλνεται από το ΣΒ/Node B, προκειμένου να ρυθμιστεί ο σχετικός χρόνος μετάδοσης του ΚΤ και να ρυθμιστεί σωστά ο χρόνος, στον οποίο τα σήματα του ΚΤ φθάνουν στο ΣΒ. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της αποστάσεως του ΚΤ και του ΣΒ, μειώνοντας περαιτέρω το λάθος στον προσδιορισμό θέσεως.

Ακόμα και με τις βελτιώσεις αυτές, η τεχνολογία αυτή είναι μια από τις λιγότερο συνεπής και ακριβής σε σχέση με τις τεχνολογίες που συζητήθηκαν σε αυτή τη διατριβή. Είναι μία χαμηλού κόστους προσέγγιση, προκειμένου να εφαρμόσουμε μια λύση προσέγγισης θέσεως με μεγάλη απόκλιση λάθους. Γενικά, η ακρίβεια της παραπάνω μεθόδου είναι χαμηλή, ενώ η συνέπειά της μεταβάλλεται δραματικά, άμεσα εξαρτώμενη από τη πυκνότητα των κυψελών. Ιδιαιτέρως χαμηλή είναι στην ύπαιθρο όπου οι κυψέλες απέχουν μεγάλη απόσταση η μια από την άλλη. Όσον αφορά την εφαρμογή της, υποστηρίζει υπηρεσίες διαπομπής στις ίδιες διεπιφάνειες δικτύων χωρίς σημαντικές αλλαγές και είναι εύκολο στη συντήρηση, χωρίς να απαιτούνται υψηλές δαπάνες, προκειμένου να επεκτείνουμε το δίκτυο. Παρόλα τα πλεονεκτήματα, η παρεχόμενη ακρίβεια υποστηρίζει μόνο το ελάχιστο των πιθανών υπηρεσιών.

2.2.7.2. Angle of Arrival + Round Trip Time (AOA+RTT)

Μια πιθανή τεχνική προσδιορισμού θέσεως για δίκτυα UMTS ειδικά σε ανοιχτές ή προαστιακές περιοχές, όπου παρατηρείται συχνά το φαινόμενο LOS μεταξύ του ΚΤ και του εξυπηρετών ΣΒ , είναι η υβριδική τεχνική AOA-RTT, η οποία ακόμα και με ένα ΣΒ μπορεί να δώσει προσέγγιση θέσεως. Είναι εφαρμογή βασισμένη στο δίκτυο που αποφεύγει το “πρόβλημα ακουστικότητας” (hearability problem), όπου σήματα από μακρινούς ΣΒ “πνίγονται” από τα σήματα του

εξυπηρετούντος ΣΒ. Από τη στιγμή όμως που η εφαρμογή χρησιμοποιεί μόνο ένα ΣΒ, εφοδιασμένο με κεραιοσυστοιχία, που είναι σε θέση να πραγματοποιήσει τις απαραίτητες μετρήσεις, δεν υφίσταται πλέον το παραπάνω πρόβλημα.

Η ακρίβεια του προσδιορισμού θέσεως της τεχνικής αυτής περιορίζεται από το εύρος δέσμης της κεραιοσυστοιχίας και την ανάλυση του RTT. Χρησιμοποιώντας την AOA μέθοδο, το σφάλμα θέσεως αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης ΣΒ και ΚΤ.

2.2.7.3. OTDOA + AOA

Στα δίκτυα UMTS, οι μετρήσεις OTDOA θα είναι διαθέσιμες σε κάθε ΚΤ, ενώ η ανάπτυξη κεραιοσυστοιχιών θα καθιστούσε δυνατές τις μετρήσεις AOA χωρίς επιπλέον δαπάνες. Η απόδοση των OTDOA και AOA τεχνικών μειώνεται, λόγω των συνθηκών NLOS. Παρόλο που τα λάθη στις μετρήσεις AOA λόγω συνθηκών NLOS σχετίζονται με τα λάθη που επηρεάζουν τις χρονικές μετρήσεις οι οποίες αφορούν τον χρησιμοποιούμενο ΣΒ, θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα στο προσδιορισμό θέσεως. Στη παραπομπή [TCL01], έχει προσομοιωθεί χρήση TA-IPDL σε δίκτυο UMTS και τα αποτελέσματα δείχνουν βελτίωση της τάξεως του 20% έως 60% σε σφάλμα προσδιορισμού θέσεως, κατά τη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων AOA στοιχείων στην ύπαιθρο, σε προαστιακές και αστικές περιοχές, σε σενάρια κίνησης σε οδικό δίκτυο.

Χρησιμοποιώντας την υβριδική μέθοδο OTDOA-AOA ο προσδιορισμός θέσεως του ΚΤ ενδεχομένως να μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και σε συνθήκες υψηλού NLOS ή παίρνοντας μετρήσεις μόνο από δύο ΣΒ. Η ακρίβεια της υβριδικής μεθόδου είναι καλύτερη από των OTDOA ή AOA μόνο, ενώ η κάλυψη αυξάνεται αν δύο ΣΒ είναι αρκετοί για προσδιορισμό θέσεως. Επίσης, αποφεύγονται τα προβλήματα που προκαλούνται από την ύπαρξη συνθηκών υψηλού GDOP, π.χ. όταν ΣΒ είναι τοποθετημένοι κατά μήκος αυτοκινητόδρομου. Στη περίπτωση αυτή, προσδιορισμός θέσεως με χρήση AOA θα ήταν προβληματικός λόγω DOP.

2.2.7.4. A-GPS + CGI ή E-OTD / OTDOA

Η μέθοδος A-GPS παρέχει καλύτερη ακρίβεια από τις μεθόδους Αναγνώρισης Ταυτότητας Κυψέλης, E-OTD ή OTDOA, ενώ λειτουργεί σε συγχρονισμένα ή ασύγχρονα δίκτυα χωρίς την ανάγκη Μονάδας Μέτρησης Θέσεως (ΜΜΘ) (παρόλο που η πληροφορία ΜΜΘ μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν είναι διαθέσιμη). Εφαρμογή της μεθόδου A-GPS έχει σχεδόν αμελητέα επίδραση στην υποδομή δικτύου και μπορεί εύκολα να υποστηρίξει υπηρεσίες διαπομπής, αλλά απαιτεί την ύπαρξη κυκλώματος A-GPS μέσα στο τηλέφωνο, οπότε ΚΤ δεν μπορούν να την υποστηρίξουν χωρίς τροποποιήσεις.

Υβριδικές μέθοδοι βασισμένες στο A-GPS λειτουργούν σε δίκτυα GSM, GPRS και UMTS, παρόλο που η συμβατότητα εξαρτάται από την άλλη τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί παράλληλα με την

τεχνολογία A-GPS. Η υβριδική τεχνολογία προσδιορισμού θέσεως περιλαμβάνει A-GPS με άλλες τεχνικές εντοπισμού θέσεως, με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει τα δυνατά σημεία του ενός να αντισταθμίζουν τις αδυναμίες του άλλου, προκειμένου να διασφαλιστεί μια πιο αξιόπιστη λύση. Δεδομένου ότι το A-GPS είναι ανεξάρτητο από την διεπαφή του αέρα, μπορεί να συνδυαστεί με οποιαδήποτε από τις άλλες τεχνολογίες που συζητήθηκαν νωρίτερα στη διατριβή αυτή προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία οργάνωσης του δικτύου και των προσφερόμενων υπηρεσιών, καθώς και τους περιορισμούς λόγω προϋπολογισμού του παρόχου. Οι υβριδικές λύσεις είναι σχεδιασμένες προκειμένου να κάνουν χρήση της καλύτερης διαθέσιμης πληροφορίας από A-GPS ή επίγειες πηγές, είτε ξεχωριστά είτε σε συνδυασμό, προκειμένου να διασφαλιστούν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα θέσεως ακόμα και στην περίπτωση όπου λύσεις ανεξάρτητων δικτύων και μη υποβοηθούμενου GPS αποτύχουν.

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της υβριδικής τεχνολογίας για δίκτυα GSM, GPRS και UMTS είναι ο συνδυασμός A-GPS με Αναγνώριση Ταυτότητας Κυψέλης. Αυτό βελτιώνει την απόδοση, σε περιοχές όπου το A-GPS δεν μπορεί να παράξει πληροφορία θέσεως, ενώ δίνει το επίπεδο ακριβείας του A-GPS σε όλες τις άλλες περιπτώσεις. Η παρεχόμενη κάλυψη και ακρίβεια του A-GPS είναι τυπικά άριστη, σχεδόν οπουδήποτε μπορεί να κινηθεί ένας χρήστης, χάνοντας μόνο σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων ή σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές όπου η Αναγνώριση Ταυτότητας Κυψέλης μπορεί να προσδιορίσει τη θέση. Τυπικά, σε περιοχές όπου η πυκνότητα κυψελών είναι υψηλή, η μέθοδος Αναγνώρισης Ταυτότητας Κυψέλης μπορεί να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα, χωρίς να μπορεί να είναι όμως τόσο ακριβής όσο το A-GPS. Ο συνδυασμός των A-GPS και της μεθόδου Αναγνώρισης Ταυτότητας Κυψέλης ενοποιούν τα πλεονεκτήματα της υπηρεσίας διαπομπής, όπως ορίστηκαν για τη μέθοδο Αναγνώρισης Ταυτότητας Κυψέλης και του A-GPS, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυα υψηλών πληθυσμιακά κοινών ΚΤ. Η μέθοδος Αναγνώρισης Ταυτότητας Κυψέλης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια τεχνολογία προσδιορισμού θέσεως για κοινά ΚΤ αλλά και ως δίχτυ ασφαλείας, σε περιβάλλοντα όπου χάνει την αποτελεσματικότητά του το A-GPS.

Εναλλακτικός τρόπος του συνδυασμού των A-GPS και της μεθόδου Αναγνώρισης Ταυτότητας Κυψέλης, είναι ο συνδυασμός του A-GPS με E-OTD ή OTDOA. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί μόνο τοπική εφαρμογή του E-OTD ή OTDOA, επιτρέποντας στο A-GPS να χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των δικτύων, προκειμένου να παραχθεί η βάση για το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας θέσεως. Η υβριδική προσέγγιση γενικά βελτιώνει την απόδοση, ενώ επιτρέπει τη στήριξη των περισσοτέρων από τις υπηρεσίες θέσεως.

2.2.8. Συσχετισμός Βάσεως

Η βασική ιδέα είναι η αποθήκευση της πληροφορίας σήματος που μετράται από το ΚΤ, σε όλη την καλυπτόμενη επιφάνεια του συστήματος προσδιορισμού θέσεως, σε μία βάση δεδομένων που

χρησιμοποιείται από το κέντρο προσδιορισμού θέσεως. Η βάση δεδομένων περιέχει δείγματα πληροφορίας σήματος, που καλούνται αποτυπώματα, με ανάλυση συγκρινόμενη με το βαθμό ακριβείας που μπορεί να επιτευχθεί ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται κάθε φορά, ενώ αυτή η ανάλυση ενδεχομένως να ποικίλει σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Προσοχή κατά την εφαρμογή τέτοιου τύπου μεθόδων απαιτεί η δημιουργία και η συντήρηση της βάσεως δεδομένων. Τα αποτυπώματα σήματος για τη βάση δεδομένων μπορούν να συλλεχθούν είτε από μετρήσεις σήματος, είτε από ένα υπολογιστικό εργαλείο σχεδιασμού δικτύου. Οι μετρήσεις σήματος είναι περισσότερο επίπονες αλλά παράγουν ακριβέστερα στοιχεία αποτυπωμάτων σήματος. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας συνδυασμός μετρήσιμων και υπολογίσιμων αποτυπωμάτων σήματος.

Το αντιστάθμισμα της προσπάθειας δημιουργίας της βάσεως δεδομένων είναι θεωρητικά η επίτευξη υψηλότερης ακρίβειας σε περιβάλλοντα όπου η υπόθεση της διάδοσης σε συνθήκες LOS δεν ισχύει, π.χ. σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές ή σε εσωτερικούς χώρους. Η μόνη υπόθεση είναι ότι η βάση δεδομένων περιέχει σύγχρονα στοιχεία. Ωστόσο, μικρές αλλαγές στο δίκτυο ή συνθήκες διάδοσης σε διαφορετικό περιβάλλον, π.χ. νέα κτίρια, μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα χαμηλότερου επιπέδου ακρίβεια στην περίπτωση που η βάση δεδομένων δεν είναι ενημερωμένη. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρόμοια πληροφορία που περιέχεται στη βάση δεδομένων χρειάζεται εξίσου και στο σχεδιασμό δικτύου. Για το λόγο αυτό, η δημιουργία και η συντήρηση της βάσεως δεδομένων βοηθά και στο σχεδιασμό δικτύου.

2.2.8.1. ΜΣΒ (Μέθοδος Συσχετισμού Βάσεως)

Η Μέθοδος Συσχετισμού Βάσεως (ΜΣΒ) [LLN01] είναι μια γενική μέθοδος προσδιορισμού θέσεως, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, βασισμένη στην αρχή συσχετισμού βάσεως με αποτυπώματα σήματος. Ανάλογα με το σύστημα κινητής τηλεφωνίας, τα αποτυπώματα σήματος θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν ισχύ σήματος, καθυστέρηση σήματος, ή ακόμα και κρουστική απόκριση φυσικού καναλιού (channel impulse response). Κάθε πληροφορία σχετική με θέση η οποία μπορεί να μετρηθεί από το κινητό, είναι χρήσιμη για την τεχνική ΜΣΒ. Επίσης, είναι δυνατή η χρήση μετρήσεων καταγεγραμμένων τόσο από το δίκτυο όσο και από το κινητό. Σε περίπτωση που το κινητό χρειάζεται να εντοπιστεί, οι απαραίτητες μετρήσεις γίνονται και μεταδίδονται στο κέντρο προσδιορισμού θέσεως. Το κέντρο αυτό υπολογίζει τη θέση του ΚΤ συγκρίνοντας τα εκπεμπόμενα αποτυπώματα σήματος με τα αποτυπώματα σήματος της βάσεως δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνική ΜΣΒ μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε ασύρματο σύστημα, αρκεί το κινητό να είναι σε θέση να μεταδώσει το αποτύπωμα σήματος στο κέντρο προσδιορισμού θέσεως. Το αποτύπωμα σήματος περιέχει μετρήσεις σήματος από δίκτυα GSM, UMTS και GPS. Το κέντρο προσδιορισμού θέσεως πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό για να

εξυπηρετήσει όλες τις αιτήσεις προσδιορισμού θέσεως σε εύλογο χρονικό διάστημα. Εφαρμογή της τεχνικής αυτής σε μεγάλη κλίμακα, απαιτεί κατανεμημένη επεξεργασία.

2.2.8.2. Αναγνώριση Πρότυπου Σήματος

Οι υπάρχουσες διαθέσιμες τεχνικές εντοπισμού θέσεως ΚΤ, απαιτούν σημαντικές αλλαγές στα στοιχεία δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των ΚΤ. Ένα άλλο θέμα το οποίο δείχνει να είναι σημαντικό είναι το επιπλέον φορτίο σηματοδοσίας, το οποίο συνδυάζεται με την τοπική ζήτηση υπηρεσιών από χρήστες. Για το λόγο αυτό, μέθοδοι εντοπισμού οι οποίες θα βασιστούν σε πληροφορία υπαρχόντων δικτύων, θα προτιμούνται στο μέλλον. Στη συνέχεια θα εξεταστεί η αξιοποίηση της μεθόδου Αναγνώρισης Προτύπου Σήματος, έχοντας σαν βάση τη μοντελοποίηση με χρήση Κρυφών Μαρκοβιανών αλυσίδων (HMM). Η προσέγγιση αυτή, η οποία θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 3, αξιοποιεί τις αναφορές μετρήσεων, οι οποίες έγιναν από το ΚΤ και τις συγκρίνει με "προ-εκπαιδευμένα" μοντέλα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα ακριβείας κατά τον υπολογισμό ταχύτητας ΚΤ ενώ δεν επιβαρύνεται το δίκτυο με επιπλέον φόρτο σηματοδοσίας.

2.2.8.3. Μέθοδος Σύγκρισης Προτύπου (RadioCamera)

Ο προσδιορισμός θέσεως ΚΤ με τη μέθοδο της Σύγκρισης Προτύπου είναι παρόμοια με τη ΜΣΒ, η οποία περιγράφτηκε στη παράγραφο 2.2.8.1. Απαιτεί ένα κλιμακωτό τρόπο μέτρησης προκειμένου να συλλεχθούν πρότυπα πολλαπλών διαδρομών από την εξεταζόμενη περιοχή, καθώς και μια βάση δεδομένων των προτύπων στο κέντρο προσδιορισμού θέσεως. Παρόλα αυτά, σε αυτή την τεχνική του προτύπου πολλαπλών διαδρομών (π.χ. πίνακα συνδιασποράς σήματος ή γωνιακή κατανομή ισχύος) οι μετρήσεις γίνονται στο ΣΒ χρησιμοποιώντας μια κεραιοσυστοιχία [WH95]. Είναι μια εφαρμογή βασιζόμενη στο δίκτυο, όπου μπορεί να εντοπίσει κοινά ΚΤ χρησιμοποιώντας ένα μόνο ΣΒ.

2.3. Μέθοδοι Προσδιορισμού Ταχύτητας Κινητού Τερματικού

2.3.1. Εισαγωγή

Η εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ μπορεί να εκτελεσθεί χρησιμοποιώντας τις διαδοχικές εκτιμήσεις θέσης ΚΤ όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα (βλέπε παράγραφο 2.2.). Διάφορες μέθοδοι απαντώνται στη βιβλιογραφία αναφορικά με εκτιμητές ταχύτητας ΚΤ, που δεν βασίζονται στις διαδοχικές εκτιμήσεις θέσης. Κύριος λόγος για αυτόν είναι ότι η πληροφορία της ταχύτητας ΚΤ μπορεί να βελτιώσει δραστικά την απόδοση των υπαρχόντων αλγορίθμων διαπομπής. Το κόστος σηματοδοσίας όμως κατά την υιοθέτηση τέτοιων μεθόδων είναι υψηλό. Ένα άλλο κριτήριο για την επιλογή μεθόδου για τον υπολογισμό της ταχύτητας ΚΤ είναι η άμεση εφαρμογή της μεθόδου, η οποία προϋποθέτει όσο το δυνατόν μικρότερες αλλαγές στην υποδομή του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, τόσο σε υλικό όσο και σε λογισμικό. Αντίθετα από ότι είδαμε κατά την υλοποίηση των προτεινόμενων μεθόδων στη βιβλιογραφία, η δική μας μέθοδος δεν προϋποθέτει καμία απολύτως αλλαγή, δεδομένου ότι στηρίζεται στην επεξεργασία σηματοδοσίας του υπάρχοντος δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται μέθοδοι προσδιορισμού ταχύτητας ΚΤ που απαντώνται στη βιβλιογραφία, όπως, εκτιμητές βασισμένους στην πρώτη ροπή της στιγμιαίας συχνότητας (IF) του λαμβανόμενου σήματος ή στη διάδοση Doppler, χρήση του ρυθμού υπέρβασης στάθμης (level crossing rate) ή του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GPS), καθώς και εκτιμητές βασισμένους στην αρχή αναγνώρισης προτύπου όπου και ακολουθούμε κατά τη μοντελοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου στη μελέτη αυτή.

2.3.2. Βιβλιογραφική αναφορά μεθόδων εκτίμησης ταχύτητας Κινητού Τερματικού

Προκειμένου να διαχειριστούμε τους περιορισμένους πόρους ασύρματου δικτύου αποτελεσματικά κατά τη διαδικασία διαπομπών, έχουν αναπτυχθεί προσεγγίσεις για την εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ. Η εκτιμούμενη ταχύτητα ΚΤ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποτελεσματικότερη διαπομπή μεταξύ των κυψελών [AK98], καθώς και για την επιλογή των κατάλληλων κυψελών σε κυψελοειδής αρχιτεκτονικές ασύρματων δικτύων [H92].

Η ταχύτητα του ΚΤ καθορίζει πόσο γρήγορα χρονικά γίνεται αισθητή η διάλειψη από το δέκτη, ενώ η γνώση αυτής στο ΣΒ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λόγους διαπομπής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέση στάθμη σήματος είναι συνήθως η παράμετρος που καθορίζει τη διαπομπή. Η ακριβής αλλά και γρήγορη εκτίμηση της τελευταίας κρίνει την ποιότητα της διαπομπής, η οποία με τη σειρά της, εξαρτάται από την ταχύτητα του ΚΤ [AS94].

Αντιστρέφοντας αυτήν την μεθοδολογία, μια αξιοσημείωτη μέθοδος για την εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ προτείνεται στη [A04]. Οι συγγραφείς προτείνουν έναν εκτιμητή ταχύτητας ΚΤ βασισμένη στους χρόνους εκτέλεσης των διαπομπών του ΚΤ, κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του στην εξεταζόμενη

διαδρομή. Η μέθοδος αυτή είναι ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο για ανάπτυξη διαδικασίας επαρκούς φιλτραρίσματος.

Ο εκτιμητής ταχύτητας ΚΤ που προτείνεται στη [ASB04], είναι βασισμένος στην πρώτη ροπή της στιγμιαίας συχνότητας (IF) του λαμβανόμενου σήματος. Οι συγγραφείς εξετάζουν τα αποτελέσματα της σκίασης και του πρόσθετου θορύβου στον προτεινόμενο εκτιμητή ταχύτητας. Παρά τα καλά αποτελέσματα κατά τη προσομοίωση, η απόδοση του IF εκτιμητή μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία πρόσθετου θορύβου.

Πολλοί εκτιμητές ταχύτητας είναι βασισμένοι στις συνιστώσες σε φάση και σε ορθογωνισμό του λαμβανόμενου σήματος ([TG01], [J95], [HS95]). Σε οδό με πολλές αντανακλούσες επιφάνειες, το λαμβανόμενο σήμα του ΚΤ είναι εξασθενημένο [J93]. Το σήμα παρουσιάζει διαλείψεις Rayleigh, σε περιβάλλον μακρο-κυψέλων και διαλείψεις Rician, σε περιβάλλον μικρο-κυψέλων. Αυτού του είδους οι διαλείψεις αναπαρίστανται ως διάδοση Doppler, χαρακτηριστικό γνώρισμα των ασύρματων καναλιών [B65]. Στη βιβλιογραφία συναντούμε διάφορες έρευνες εκτίμησης της διάδοσης Doppler σε σχέση με τη ταχύτητα, χρησιμοποιώντας ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του λαμβανόμενου σήματος, την ταχεία διάλειψη ([HS95], [KNF94], [L82]).

Στη [TG01] οι συγγραφείς υπολογίζουν τη μέγιστη διάδοση Doppler κατά τη διαδικασία εκτίμησης της βέλτιστης τιμής των παραμέτρων σε συστήματα που προσαρμόζονται σε συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες ραδιοδιαύλων. Στη [J95] οι συγγραφείς υπολογίζουν τη ταχύτητα του ΚΤ, βασιζόμενοι στην αρχή ότι η ταχύτητα του ΚΤ είναι ανάλογη προς τη μέγιστη συχνότητα Doppler του λαμβανόμενου σήματος. Επίσης στη [HS95], χρησιμοποιείται μέτρηση των τετραγωνικών αποκλίσεων των μετρήσεων δείγματος στάθμης σήματος, προκειμένου οι συγγραφείς να υπολογίσουν τη μέγιστη συχνότητα Doppler.

Επίσης, η μέθοδος προσέγγισης συνδιακύμανσης έχει προταθεί και εφαρμοστεί σε περιβάλλοντα διαλείψεων Rician, όπως και σε περιβάλλοντα μικρο-κυψελών ([AS94], [HS95]). Δεδομένου ότι περιβάλλοντα μικρο-κυψελών χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, η εκτίμηση ταχύτητας σε τέτοιους χώρους, είναι πολύ χρήσιμη. Μέθοδοι εκτίμησης ταχύτητας σε περιβάλλοντα διαλείψεων Rayleigh έχουν αναλυθεί κατά την εφαρμογή τους σε περιβάλλοντα διαλείψεων Rician ([AS94], [HS95]). Εντούτοις, η εκτίμηση ταχύτητας βασιζόμενη στη συνιστώσα ταχείας διάλειψης του σήματος, επηρεάζεται σημαντικά από τον παρασιτικό θόρυβο, ενώ η εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ κινούμενου με μικρή ταχύτητα επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό, σε σχέση με την περίπτωση που το ΚΤ είχε υψηλότερη ταχύτητα. Επομένως απαιτείται περαιτέρω έρευνα προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια της εκτίμησης ταχύτητας, βασισμένη σε χαρακτηριστικά ασύρματων ραδιοδιαύλων.

Ο ρυθμός υπέρβασης στάθμης (level crossing rate) έχει επίσης υιοθετηθεί στις μεθόδους εκτίμησης ταχύτητας ΚΤ ([AS94], [LSC02], [L97]). Στη [AS94] παρουσιάζονται και συγκρίνονται τρεις διαφορετικοί εκτιμητές ταχύτητας ως προς την ευαισθησία τους σε παράγοντες Rice, σε μη-

ισοτροπική διασπορά, σε πρόσθετο θόρυβο Gauss, καθώς και σε απόδοση κατά την ανάπτυξη προσαρμοστικού αλγορίθμου διαπομπής. Συγκρίνοντας κάθε έναν από τους παραπάνω εκτιμητές ταχύτητας σε ένα χαρακτηριστικό NLOS σενάριο διαπομπής, οι συγγραφείς διατήρησαν επιτυχώς καλή απόδοση διαπομπής κατά τη δοκιμασία τους για διαφορετικές τιμές ταχύτητας ΚΤ. Προβλήματα προκύπτουν σε περιπτώσεις όπου το ΚΤ στρίβει σε γωνία, αναγκάζοντας τη στάθμη σήματος κατερχόμενης ζεύξης να παρουσιάζει διακυμάνσεις των 30-40dB, σε θέσεις που απέχουν μόνο ένα κλάσμα του μήκους κύματος ([FST69]).

Στη [LSC02], η ταχύτητα ΚΤ υπολογίζεται από τις ιδιότητες παραγώγων και συσχετισμού της περιβάλλουσας λαμβανόμενου κύματος σε περιβάλλοντα με πρόσθετο θόρυβο και διαλείψεων Rayleigh. Η προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης ξεπερνά σε ακρίβεια τη μέθοδο εκτίμησης, που στηρίζεται στο ρυθμό υπέρβασης στάθμης, όταν υπάρχει παρασιτικός θόρυβος. Εντούτοις για μικρές τιμές ταχύτητας του ΚΤ, καθώς επίσης και για ορισμένες τιμές SNR χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση λόγω ανακριβών αποτελεσμάτων που παρουσιάζει η προτεινόμενη μέθοδος. Μια αξιόλογη προσέγγιση παρουσιάζεται στη [L97]. Σε αυτή, χρησιμοποιείται το πλήθος των τομών της περιβάλλουσας με τη μέση στάθμη σήματος προκειμένου να υπολογιστεί η ταχύτητα του ΚΤ.

Μια άλλη μέθοδος για την εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ είναι η χρήση του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσεως (GPS), που προσδιορίζει τη θέση και την ταχύτητα ΚΤ με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας τα σήματα από GPS δορυφόρους [G93]. Ένας δέκτης GPS μπορεί να προσδιορίσει τη θέση του με ακρίβεια της τάξεως μερικών μέτρων, υπό την προϋπόθεση της αδιάλειπτης επαφής του με δορυφόρους GPS. Η ταχύτητα του δέκτη GPS μπορεί να προσδιοριστεί κατά την αλλαγή θέσης του δέκτη σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ένα ΚΤ με κύκλωμα δέκτη GPS είναι σε θέση να γνωρίζει τόσο τη θέση του, όσο και τη ταχύτητά του σε πραγματικό χρόνο. Εντούτοις, το πρόσθετο κύκλωμα δέκτη GPS αλλά και η κατανάλωση ισχύος που απαιτείται για την επεξεργασία των σημάτων GPS είναι τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής. Επιπλέον, σε μια πυκνή οδό στο κέντρο της πόλης, ενδεχομένως να είναι δύσκολο να ληφθούν τα σήματα GPS επειδή τα περιβάλλοντα υψηλά κτήρια μπορεί να εμποδίσουν τη λήψη των σημάτων.

Η χρήση του χρόνου παραμονής κυψέλης του ΚΤ έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ταχύτητας ΚΤ. Ο χρόνος παραμονής κυψέλης του ΚΤ είναι κατά προσέγγιση αντιστρόφως ανάλογος προς την ταχύτητα του ΚΤ. Στη [YN97] η ταχύτητα του ΚΤ καθορίζεται από το πλήθος των κυψελών που διέσχισε το ΚΤ, κατά τη διάρκεια χρονικού διαστήματος. Στη [SW94] το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ της έναρξης της κλήσης και της πρώτης διαπομπής χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας ΚΤ. Η προσέγγιση βασισμένη στο χρόνο παραμονής κυψέλης είναι απλή, προκειμένου να εφαρμοστεί. Εντούτοις, είναι ανακριβής ενώ χρειάζεται αρκετό χρόνο για να υπολογίσει τη ταχύτητα. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον

υπολογισμό της μέσης ταχύτητας διαδρομής μεγάλης διάρκειας αλλά ανακριβής για υπολογισμό της ταχύτητας διαδρομής, σχετικά σύντομου χρονικού διαστήματος.

Στην [KK02] η προτεινόμενη μέθοδος είναι βασισμένη σε μετρήσεις ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης. Σε βάση δεδομένων αποθηκεύονται τα πρότυπα επιπέδου ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν τη θέση του ΚΤ. Ο χαρακτηρισμός αυτός έχει περιγραφεί από τους συγγραφείς διφορούμενος, περιέχει όμως αρκετές πληροφορίες για τη διαδικασία του εντοπισμού. Προκειμένου να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα ακρίβειας, οι συγγραφείς προτείνουν χρήση του GPS.

Η αρχή αναγνώρισης προτύπου έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως τόσο για την εκτίμηση θέσης ΚΤ, όσο και για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του τελευταίου. Στις ([NGH02], [MK99], [K94], [K942], [HMS97]) η αρχή της αναγνώρισης προτύπου έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση θέσης ΚΤ σε δίκτυα GSM. Στη [NGH02] η προτεινόμενη εκτίμηση θέσης βασίζεται στη σύγκριση στοιχείων βάσης δεδομένων μετρήσεων ευαίσθητων παραμέτρων θέσης. Πιο συγκεκριμένα γίνεται χρήση της channel impulse response (CIR) μαζί με τη μέθοδο Kalman προκειμένου να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα ακρίβειας προσδιορισμού θέσης. Οι συγγραφείς πάντως αναφέρουν την ανάγκη χρήσης πιο εξελιγμένων τεχνικών αναγνώρισης προτύπου, όπως επεξεργασία με HMM μοντελοποίηση.

Στην [MK99], η εκτίμηση θέσης του ΚΤ είναι το αποτέλεσμα μιας υβριδικής μεθόδου, βασισμένη στην αναγνώριση προτύπου, χρησιμοποιώντας μοντελοποίηση HMM. Σύνολα κατάλληλων HMM μοντέλων δημιουργούνται με κριτήριο τη προπορεία συγχρονισμού (TA). Το επίπεδο ανάλυσης σχετίζεται άμεσα με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στις ([K94], [K942]) προσαρμοσμένα σχήματα βασισμένα σε μοντελοποίηση HMM έχουν υλοποιηθεί για την εκτίμηση θέσης ΚΤ, με σχετικά καλά αποτελέσματα. Ο εκτιμητής ταχύτητας στην [HMS97] απαιτεί γνώση της μέσης τιμής ισχύος σήματος για όλες τις πιθανές θέσεις.

Αλγόριθμοι βασισμένοι στην αρχή αναγνώρισης προτύπου έχουν χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις διαπομπής ([WC00], [WC01]). Το πρόβλημα αλλαγής κατεύθυνσης του ΚΤ μελετάται από τους συγγραφείς. Στο δίλημμα μεταξύ του πλήθους περιττών διαπομπών και της καθυστέρησης απόφασης για τη πραγματοποίηση μιας διαπομπής, ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο βασισμένο σε μετρήσεις ισχύος σήματος. Προβλήματα λόγω της ύπαρξης σκίασης έχουν επιλυθεί μερικώς υπολογίζοντας το μέσο όρο των μετρημένων δειγμάτων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος διαπομπής δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ενώ έχει χαμηλές απαιτήσεις αποθήκευσης δεδομένου ότι η υπολογιστική του πολυπλοκότητα δεν είναι υψηλή.

Στη μελέτη μας η αναγνώριση προτύπου έχει βασιστεί σε μοντελοποίηση HMM. Στόχος μας είναι να μετατρέψουμε τα οχήματα με ΚΤ σε ερευνητικά οχήματα, υπολογίζοντας έτσι βασικές παραμέτρους κυκλοφοριακής κίνησης. Σε αντίθεση με την έρευνα που έχει ήδη διεξαχθεί στον ερευνητικό αυτό τομέα ([NGH02], [MK99]), δεν υπολογίζουμε τη ταχύτητα ΚΤ χρησιμοποιώντας

εκτιμήσεις θέσης ΚΤ αλλά χρησιμοποιούμε την ακολουθία μετρήσεων στάθμης σήματος κατερχόμενης ζεύξης, τις οποίες πραγματοποιεί το ΚΤ, κατά τη διάρκεια της διαδρομής του σε συγκεκριμένα οδικά τμήματα. Έχοντας έναν επαρκή αριθμό τέτοιων ερευνητικών οχημάτων, μπορούμε να υπολογίσουμε βασικές παραμέτρους κυκλοφοριακής κίνησης όπως την πυκνότητα κυκλοφορίας, ροή και ταχύτητα.

Στην ερευνητική αυτή περιοχή έχουν εμπλακεί ενεργά αρκετές εταιρείες. Ξεχωρίζουμε από αυτές την SnapTrack και την Decell. Η εταιρεία SnapTrack είναι μια επιχείρηση τηλεπικοινωνιών με έδρα τη Καλιφόρνια, έχοντας αναπτύξει εφαρμογές προσδιορισμού θέσης, βασισμένες στο ΚΤ, αντί λύσεων βασισμένες στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Όταν ενεργοποιείται η παραπάνω υπηρεσία, το ασύρματο δίκτυο στέλνει μια εκτίμηση της θέσης του ΚΤ στον αντίστοιχο εξυπηρετητή. Ο εξυπηρετητής ενημερώνει το ΚΤ ποιοι δορυφόροι GPS είναι στην περιοχή του, και το ΚΤ καταγράφει ένα "στιγμιότυπο" του σήματος GPS, υπολογίζει στη συνέχεια την απόστασή του από όλους τους δορυφόρους με LOS και στέλνει αυτές τις πληροφορίες πίσω στον εξυπηρετητή. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με τη θέση και την ταχύτητα του ΚΤ.

Η εταιρεία Decell με έδρα το Ισραήλ, προτείνει μια μέθοδο βασισμένη στη συλλογή πληροφοριών από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας σε πραγματικό χρόνο. Η βασισμένη στο δίκτυο αυτή μέθοδος εξετάζει με τυχαίο τρόπο ανώνυμα ΚΤ, ευρισκόμενα μέσα σε κινούμενα οχήματα, επιτρέποντας τη δημιουργία χάρτη κυκλοφοριακής κίνησης σε πραγματικό χρόνο. Φαίνεται ότι η λύση αυτή στηρίζεται στις μετρήσεις της ταυτότητας κυψέλης. Η εταιρεία δεν δημοσιεύει τα αποτελέσματα των δοκιμών που έχει κάνει. Για το λόγο αυτό είναι δύσκολο να κατανοηθεί η επεκτασιμότητα της προτεινόμενης λύσης.

Αξιοσημείωτη είναι η προσπάθεια της Triangle Software η οποία έχει αναπτύξει το σύστημα Beat-The-Traffic, ένα σύστημα πρόγνωσης κυκλοφοριακής κίνησης ικανό πρόβλεψης κυκλοφοριακών συνθηκών για τις επόμενες επτά (7) ημέρες. Το παραπάνω σύστημα συνδυάζει πληροφορία από συμβατικούς αισθητήρες κίνησης, ιστορικά δεδομένα, καιρικές συνθήκες, ατυχήματα, εργασίες στο δρόμο όπως επίσης και ορισμένα ημερολογιακά γεγονότα όπως αργίες ή αθλητικές διοργανώσεις. Θεωρούμε πως η χρήση πληροφορίας και από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, θα αύξανε την ακρίβεια του συστήματος.

Τέλος, τρία ερευνητικά προγράμματα ([I02], [YD00]) και [KK02] αξίζει να αναφερθούν λόγω της πρωτότυπης προσέγγισής τους. Στο πρόγραμμα SERTI ([I02], [YD00]) υπολογίζεται ο χρόνος ταξιδιού κατά μήκος συγκεκριμένης διαδρομής σε δρόμο ταχείας κυκλοφορίας. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη πληροφορία της διεπαφής Abis, των ΚΤ, που ταξιδεύουν κατά μήκος της εξεταζόμενης οδού σε δίκτυα GSM, καθώς και επιπλέον σηματοδοσία, εξάγοντας έτσι πληροφορία για τη θέση τους και πιο συγκεκριμένα πληροφορία για την ΤΑ ζώνη που βρίσκεται το ΚΤ. Έπειτα,

υπολογίζεται η μέση ταχύτητα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ακολουθίας μετρήσεων θέσης. Η ακρίβεια αυτής της προσέγγισης μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, όπως έχει σημειωθεί από τους συγγραφείς.

Στο πρόγραμμα Lol@ ([KK02]), η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε μετρήσεις ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης. Δείγματα ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων, τα οποία και χρησιμοποιούνται προκειμένου να χαρακτηριστεί η θέση του ΚΤ. Ο χαρακτηρισμός αυτός περιγράφεται από τους συγγραφείς ασαφής, περιέχει όμως αρκετή πληροφορία για τον εντοπισμό της θέσης του ΚΤ. Προκειμένου να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα ακριβείας, προτείνεται χρήση GPS.

Τέλος ένα πιλοτικό πρόγραμμα το οποίο σαν στόχο έχει τη συλλογή δεδομένων κυκλοφοριακής κίνησης ξεκίνησε στα μέσα του 2004 στην Αμβέρσα. Στόχος του προγράμματος είναι η παροχή σε πραγματικό χρόνο ροής κίνησης οδικού δικτύου κατά την επεξεργασία δείγματος θέσεως ΚΤ ανώνυμων χρηστών σε κινούμενα οχήματα. Το πρόγραμμα αυτό είναι το πρώτο τέτοιου είδους στο Βέλγιο ενώ δείγματα της αποτελεσματικότητας της παραπάνω προσέγγισης αναμένεται να έχουμε στα μέσα του 2006. Κλειδί στην επιτυχία του πιλοτικού προγράμματος φαίνεται να είναι ο πάροχος κινητής τηλεφωνίας Proximus, ο οποίος και κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο στη τηλεπικοινωνιακή αγορά κινητής τηλεφωνίας του Βελγίου. Στις επόμενες παραγράφους εξετάζουμε λεπτομερέστερα μερικές από τις μεθόδους που έχουν υιοθετηθεί κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των εκτιμητών ταχύτητας.

2.3.3. Στιγμιαία συχνότητα λαμβανομένου σήματος (Instantaneous Frequency)

Αρκετοί εκτιμητές ταχύτητας που απαντώνται στη βιβλιογραφία έχουν στηριχτεί στην Στιγμιαία Συχνότητα (IF) [B92]. Μια απλοποιημένη μορφή ενός τέτοιου εκτιμητή θα παρουσιάσουμε στη παράγραφο αυτή. Ο εκτιμητής αυτός βασίζεται στο κλασσικό τύπο συνεχούς χρόνου για FM διευκρινιστές [B92]. Ακολουθώντας τη προσέγγιση αυτή, η IF δοθέντος σήματος $z(t)$ μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

$$f_{in,z}(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{z_i(t)z_q'(t) - z_i'(t)z_q(t)}{z_i^2(t) + z_q^2(t)} \quad (1),$$

όπου "i" and "q" απεικονίζουν τις συνιστώσες σε φάση και σε ορθογωνισμό, αντίστοιχα. Ο παράγων Ricean K υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον εκτιμητή μεθόδου στιγμής που περιγράφεται στις [TG01] και [GME99] και δίνεται από το τύπο (2):

$$\hat{K} = \frac{\sigma_y^4 - c_{|y|^2}(0) + \sigma_y^2\sqrt{\sigma_y^4 - c_{|y|^2}(0)}}{c_{|y|^2}(0)} \quad (2),$$

όπου $c_{|y|^2}(t)$ είναι η συνδιακύμανση του $|y(t)|^2$ και σ_y^2 είναι η στάθμη λαμβανομένου σήματος. Δεδομένου ότι τα $c_{|y|^2}(0)$ και σ_y^2 μπορούν να εκτιμηθούν από τη λαμβανομένη στάθμη σήματος στο ΚΤ, η εξίσωση (2) μας δίνει μια εκτίμηση του παράγοντα Ricean K.

Όπως έχει περιγραφεί στην [ASB04], ο προτεινόμενος εκτιμητής ταχύτητας ΚΤ είναι βασισμένος στην πρώτη ροπή της στιγμιαίας συχνότητας (IF) του λαμβανόμενου σήματος. Οι συγγραφείς υποθέτουν ότι σήμα που λαμβάνεται από το ΚΤ, παρουσία πρόσθετου θορύβου, ακολουθεί τη μοντελοποίηση Ricean που δίνεται από την [AS94]:

$$y(t) = s(t) + n(t)$$

$$= (x_i(t) + m_i)\cos 2\pi f_c t - (x_q(t) + m_q)\sin 2\pi f_c t + n(t) \text{, (3)}$$

όπου f_c είναι η συχνότητα φέροντος και $n(t)$ αντιπροσωπεύει τον πρόσθετο θόρυβο. Οι μέσες τιμές m_i και m_q οφείλονται στη παρουσία πιθανής line-of-sight (LoS) συνιστώσας. Κατά την απουσία τέτοιας LoS συνιστώσας , το μοντέλο της εξίσωσης (3) παίρνει τη μορφή:

$$y(t) = x(t) + n(t),$$

όπου $x(t) = x_i(t)\cos 2\pi f_c t - x_q(t)\sin 2\pi f_c t$,

αντιπροσωπεύει τις συνιστώσες διασποράς λαμβανομένου σήματος και είναι το αποτέλεσμα σύνθεσης και διάσπασης αλλεπάλληλων επίπεδων κυμάτων στην κεραία του ΚΤ. Στην [ASB04], ο προτεινόμενος εκτιμητής έχει βασιστεί στην IF του $y(t)$. Η IF του $y(t)$ δίνεται στην [B92]:

$$f_{in,y}(t) = \frac{1}{2\pi}\psi(t) \text{ (4).}$$

Στην ιδανική περίπτωση της απουσία σκίασης, πρόσθετου θορύβου και ισοτροπικής διασποράς, η πρώτη ροπή του $|f_{in,y}(t)|$ είναι:

$$E\left[\left|f_{in,y}\right|\right] = E\left[\left|f_{in,s}\right|\right] = \frac{\upsilon}{\sqrt{2}\lambda} I_0\left(\frac{K}{2}\right) e^{\frac{-K}{2}} \text{ (5)}$$

όπου $E[\ ]$ και $|\ |$ αναπαριστούν τη μέση και απόλυτη τιμή, αντίστοιχα, $f_{in,s}$ είναι η IF συνιστώσα πολλαπλής διαδρομής $s(t)$ και K είναι ο παράγοντας Rice. Ο προτεινόμενος εκτιμητής λαμβάνεται από τη (5) ως εξής:

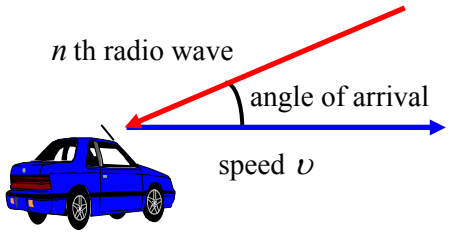
$$\hat{\upsilon} = \lambda\sqrt{2} I_0^{-1}\left(\frac{\hat{K}}{2}\right) e^{\frac{\hat{K}}{2}} \left\langle \hat{f}_{in,y}(t) \right\rangle \text{ (6)}$$

όπου $\left\langle \hat{f}_{in,y}(t) \right\rangle = \frac{1}{T}\int_T \left| \hat{f}_{in,y}(t) \right| dt$

είναι ο μέσος χρόνος της εκτίμησης της IF λαμβανομένου σήματος κατά τη χρονική διάρκεια T και $\hat{K}$ είναι ο εκτιμούμενος παράγοντας Ricean. Η εξίσωση (6) φανερώνει ότι εκτίμηση της ταχύτητας ΚΤ προϋποθέτει εκτίμηση τόσο της IF λαμβανομένου σήματος όσο και του K παράγοντα Ricean.

2.3.4. Μετατοπίσεις Doppler

Έστω ότι κεραία ταξιδεύει με σταθερή ταχύτητα υ. Τέτοιου είδους κίνηση της κεραίας οδηγεί σε μετατοπίσεις φάσης δημιουργούμενες από μεμονωμένα ανακλώμενα κύματα, έχοντας επίπτωση στο πλάτος του προκύπτοντος σήματος. Θεωρούμε σήμα με διαλείψεις Rayleigh. Έστω το n-οστό ανακλώμενο κύμα με πλάτος c_n και φάση ϕ_n φθάνουν υπό γωνία a_n σε σχέση με την κατεύθυνση κίνησης της κεραίας (σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9 ΚΤ κινούμενο με ταχύτητα υ

Η μετατόπιση Doppler αυτού του κύματος είναι:

$$\Delta f_n = \frac{\upsilon}{\lambda}\cos a_n ,$$

όπου υ είναι η ταχύτητα της κεραίας.

Συχνά υποθέτουμε ότι η παραπάνω γωνία είναι κατανεμημένη ομοιόμορφα στο διάστημα [0, 2π]. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της συχνότητας των λαμβανομένων κυμάτων. Υποθέτοντας ότι το πλήθος των κυμάτων είναι πολύ μεγάλο, είναι προφανές το φάσμα Doppler του λαμβανομένου σήματος.

Η ταχύτητα υ του ΚΤ είναι ανάλογη της μέγιστης εξάπλωσης Doppler ω_D από την εξίσωση $\omega_D = \frac{(2\pi\upsilon f_c)}{c}$, όπου f_c είναι η συχνότητα φέροντος και c η ταχύτητα διάδοσης. Με αυτό το τρόπο, δοθέντων των παραμέτρων του συστήματος, εκτίμηση του υ είναι ισοδύναμη με την

εκτίμηση του ω_D. Σε πολλές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές όπως προσαρμοστική κωδικοποίηση, διαμόρφωση, διαφορισμό κεραίας και έλεγχος στάθμης σήματος, η γνώση της ω_D είναι εξαιρετικής σημασίας κατά τη προσαρμογή των παραμέτρων του συστήματος σε νέες συνθήκες διαύλων ([HEDH99], [CS00]). Στην πραγματικότητα, όταν η κατανομή της γωνίας πρόσπτωσης είναι ομοιόμορφη και απουσιάζει η LOS συνιστώσα, τότε η ω_D είναι η μοναδική παράμετρος που καθορίζει το φάσμα Doppler ([J74]). Καθώς όμως η ανάγκη για υψηλότερη φασματική απόδοση αυξάνεται, η χρήση κατευθυντικών κεραιών είναι επιβεβλημένη προκειμένου να αποφύγουμε παρεμβολές.

2.3.5. Στατιστικές αναπαραστάσεις κατά τη μοντελοποίηση διάδοσης

Στατιστικές αναπαραστάσεις όπως ο Ρυθμός Υπέρβασης Στάθμης (Level Crossing Rate - LCR) και η Μέση Διάρκεια Διάλειψης (Average Fade Duration - AFD) έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να αναπαραστήσουν δυναμικά, χρονικώς μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης του ΚΤ. Οι παραπάνω αναπαραστάσεις χρησιμοποιούνται επίσης προκειμένου να αξιολογήσουμε τη διαδρομή διάδοσης. Επίσης εξαρτώνται από τη παρουσία σκίασης, ταχύτητας του ΚΤ, σχετική διεύθυνση της πηγής, καθώς και σχεδίαση της κεραίας [BS85]. Στις επόμενες παραγράφους θα περιγράψουμε τις αρχές και τη σημασία των παραπάνω αναπαραστάσεων.

2.3.5.1. Ρυθμός Υπέρβασης Στάθμης (LCR)

Ο Ρυθμός Υπέρβασης Στάθμης ορίζεται ως ο αναμενόμενος ρυθμός με τον οποίο η περιβάλλουσα τέμνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο στάθμης σήματος R, έχοντας θετική πρώτη παράγωγο στο σημείο τομής σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.10. Η αναλυτική περιγραφή του LCR δίνεται στη [L85]:

$$LCR(R) = \int_0^\infty \dot{r} p(R, \dot{r}) d\dot{r} \text{ (τομές ανά δευτερόλεπτο) (7)}$$

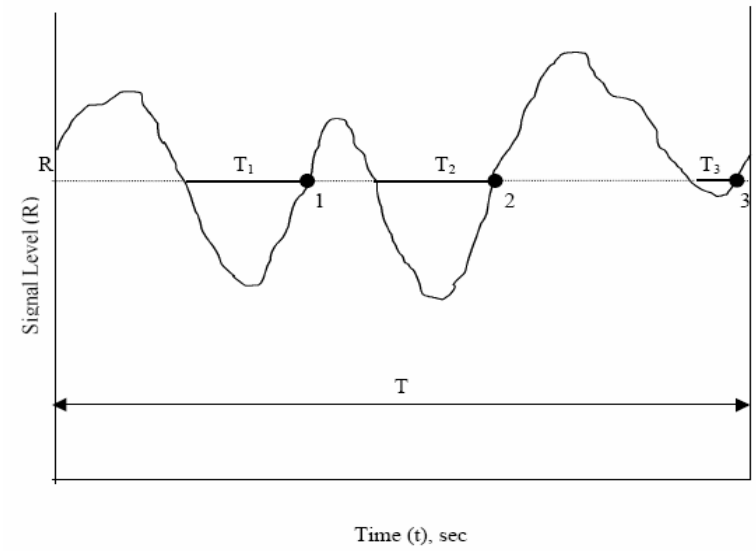
όπου r είναι η στάθμη λαμβανομένου σήματος, $\dot{r}$ είναι ο ρυθμός αλλαγής της περιβάλλουσας και $p(R, \dot{r})$ είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των $\dot{r}$ και r για $r = R$. Στο σχήμα 2.10 απεικονίζεται η αρχή του LCR. Υπάρχουν τρεις θετικές τομές (στα σημεία 1, 2, 3) σε χρονικό διάστημα T δευτερολέπτων. Έτσι το LCR για στάθμη σήματος R για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι:

$$LCR(R) = \frac{3}{T} \text{ (8)}$$

Επίσης η Μέση Διάρκεια Διάλειψης είναι:

$$AFD = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}$$

Ο LCR μπορεί να κανονικοποιηθεί με τη χρήσης μέγιστης συχνότητας μετατόπισης maximum Doppler προκειμένου να εξαλειφθεί η εξάρτηση από την ταχύτητα του οχήματος. Ο κανονικοποιημένος LCR δίνεται στην [L85]:



Σχήμα 2.10 Διάγραμμα στάθμης σήματος όπου απεικονίζεται ο Ρυθμός Υπέρβασης Στάθμης και η Μέση Διάρκεια Διάλειψης

Επίσης ο κανονικοποιημένος LCR ορίζεται ως:

$$LCR'(R) = \frac{LCR(R)}{f_m}$$ (τομές ανά μήκος κύματος) (9),

όπου η μέγιστη συχνότητα μετατόπισης Doppler f_m ορίζεται ως:

$$f_m = \frac{\upsilon}{\lambda}$$ [Hz] (10),

όπου υ είναι η ταχύτητα του οχήματος και λ είναι το μήκος κύματος.

2.3.5.2. Μέση Διάρκεια Διάλειψης (AFD)

Η Μέση Διάρκεια Διάλειψης ορίζεται ως η μέση διάρκεια μιας διάλειψης για δοθέν κατώτατο όριο. Η αναλυτική διατύπωση για το AFD δίνεται στη [STA12]:

$$AFD(R) = \frac{CFD(R)}{LCR(R)} = \frac{1}{LCR(R)} \int_0^R p(r)dr$$ [δευτερόλεπτα] (11),

όπου $CFD(R) = \int_0^R p(r)dr$ είναι η πιθανότητα η περιβάλλουσα σήματος να είναι κάτω από τη στάθμη σήματος R. Όπως φαίνεται στην (11), το γινόμενο των AFD και LCR μας δίνει το CFD. Η AFD μπορεί επίσης να κανονικοποιηθεί προκειμένου να εξαλείψουμε την εξάρτηση με την ταχύτητα του οχήματος. Η κανονικοποιημένη AFD δίνεται στην [L85]:

$AFD'(R) = AFD(R) \cdot f_m$ [μήκος κύματος] (12),

όπου f_m έχει οριστεί στην (10).

Τέλος, στο σχήμα 2.10 απεικονίζεται η αρχή της AFD. Υπάρχουν τρία διαστήματα διαλείψεων (T1, T2, T3) σε χρονικό διάστημα T δευτερολέπτων. Έτσι η AFD για στάθμη σήματος R στο παραπάνω σχήμα θα είναι:

$$AFD(R) = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_i}{N} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \text{ [δευτερόλεπτα] (13),}$$

όπου N είναι το πλήθος των διαστημάτων διαλείψεων σε χρονικό διάστημα T δευτερόλεπτα.

Παραπομπές

[3G01] 3GPP, "*Technical Specification Group Radio Access network, Stage 2 Functional Specification of UE Positioning in UTRAN*" (3G TS 25.305 version 5.0.0), 2001.

[A04] Michael Alger, "Real time traffic monitoring using mobile phone data", white paper, Vodafone Pilotentwicklung GmbH.

[A93] Anon, "Global *Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Signal Specification*", Dept. of Defense, Dec. 1993.

[AK98] A. Abdi and M. Kaveh, "A new velocity estimator for cellular systems based on higher order crossings," in Proc. 32nd Asilomar Conf. Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, Nov. 1—4, 1998, pp. 1423-1427.

[AS94] Mark Austin, Gordon Stuber, "Velocity Adaptive Handoff Algorithms for Microcellular Systems", IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.43, no.3, August 1994.

[ASB04] Ghasem Azemi, Bouchra Senadji, Boualem Boashash, "Mobile Unit Velocity Estimation Based on the Instantaneous Frequency of the Received Signal", IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.53, no.3, May 2004.

[B52] D. S. Berry, "*Evaluation of Techniques for Determining Over-All Travel Time*" In *Proceedings*. Highway Research Board, National Research Council, Volume 31, 1952, pp. 429-439.

[B65] P.A. Bello, Some techniques for the instantaneous real-time measurement of multipath and Doppler spread, IEEE Transactions on Communications 13(3) (September 1965) 285-292.

[B92] B. Boashash, “Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal-Part 2: Algorithms and applications”, Proc. IEEE, vol.80, pp. 539-568, April 1992.

[BS85] W. S. Bradley and W. L. Stutzman, “Propagation modeling for land mobile satellite communications,” Virginia Tech Report EE Satcom 85-3, performed for JPL sponsored by NASA under contract 956512, August 1985.

[CS00] M. J. Chu and W. E. Stark, "Effect of mobile velocity on communications in fading channels," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 49, pp. 202-210, Jan. 2000.

[FST69] W.Figel, N. Shepherd and W. Trammell, “Vehicle location by a single attenuation method”, IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.VT-18, pp.105-110, November 1969.

[G93] I.A. Getting, The Global Positioning System, IEEE Spectrum (December 1993) 36-47.

[GME99] D.G.Greenstein, L.J. Michelson and V.Erceg, “Moment-method estimation of the Ricean K-factor”, IEEE Commun. Lett. Vol.3, pp.175-176, June 1999.

[H92] P. Hoher, "A statistical discrete-time model for the WSSUS multipath channel," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 41, pp. 461-168, Nov. 1992.

[HEDH99] S. Hu, T. Eyceoz, A. Duel-Hallen, and H. Hallen, "Transmitter antenna diversity and adaptive signaling using long range prediction for fast fading DS/CDMA mobile radio channels," in Proc. WCNC '99, vol. 2, New Orleans, LA, 1999, pp. 824-828.

[HMS97] M. Hellebrandt, R. Mathar and M. Scheibenbogen, “Estimation Position and velocity of mobiles in a cellular radio network”, IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.46, pp. 65-71, February 1997.

[HS95] J. M. Holtzman and A. Sampath, “Adaptive Averaging Methodology for handoffs in cellular systems”, IEEE Transactions On Vehicular Technology, 44(1), pp.59-66, Feb. 1995.

[I02] Jean Luc Ignace, “Travel Time Estimates From Cellular Phone Positioning”, Mobile Venue’02, Athens, Greece, May 30-31, 2002.

[J74] W. C. Jakes, Microwave Mobile Communications. New York: IEEE Press, 1974.

[J93] W.C. Jakes, Microwave Mobile Communications (IEEE Press, 1993).

[J95] W. C. Jakes, Ed., Microwave Mobile Communications, New York: Wiley, 1974. Republished by IEEE Press.

[K94] O. Kennemann, “Continuous location of moving GSM mobile stations by pattern recognition techniques”, in Proc. 5th Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Sept. 1994, pp.630-634.

[K942] O. Kennemann, “Pattern recognition by hidden Markov models for supporting handoff decisions in the GSM system”, in Proc. 6th Nordic Seminar on Digital Mobile Radio Communication, Stockholm, Sweden, June 1994, pp.195-202.

[KK02] H. Kunczier, A. Kuchar, “Network measurement based handset localization”, white paper, Forschungszentrum Telekommunikation Wien, Juli 2002.

[KNF94] K. Kawabata, T. Nakamura and E. Fukuda, Estimating velocity using diversity reception, IEEE VTC (1994) 371-374.

[L82] W.C.Y. Lee, Mobile Communications Engineering (McGraw-Hill, 1982).

[L85] C. Loo, “A statistical model for a land mobile satellite link,” IEEE Trans. Vech. Technol., vol VT-34, pp. 122-127, Aug. 1985.

[L97] W. C. Y. Lee, “Mobile Communications Engineering”, New York, McGraw Hill, 2nd edition, 1997.

[LLN01] H. Laitinen, J. Lähteenmäki and T. Nordström, "*Database correlation method for GSM location*," IEEE VTC 2001 Spring Conference, Rhodes, May 2001.

[LSC02] Dong-Jun Lee, Byung-Cheol Shin, Dong-Ho Cho, "Speed Estimation of Mobile Station in Additive Noise and Rayleigh Fading Environments", Wireless Networks vol.8, pp.541-548, 2002, Kluwer Academic Publishers.

[LVL99] L. Lopes, E. Villier, and B. Ludden, "*GSM Standards Activity on Location*," IEE Colloquium on Novel Methods of Location and Tracking of Cellular Mobiles and Their System Applications, London, May 1999.

[M90] May, A.D. "*Traffic Flow Fundamentals*", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

[MR90] W. R. McShane, R.P. Roess. "*Traffic Engineering*", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

[MK99] S. Mangold, S. Kyriazakos, "Applying Pattern Recognition Techniques based on Hidden Markov Models for Vehicular Position Location in Cellular Networks", 50th IEEE Vehicular Technology Confererence, VTC 1999-Fall, pp 780-784.

[NGH02] T. Nypan, K. Gade, O. Hallingstad, "Vehicle Positioning by Database Comparison Using The Box-Cox Metric And Kalman Filtering", IEEE 55th VTC Spring 2002, pp. 1650 -1654.

[PR95] R. K. Patel, E. Rowe. "*An Overview of ITS Standards and Protocols*" ITE Journal. Institute of Transportation Engineers. Washington, DC, December 1995.

[R94] H. D. Robertson, editor, "*Manual of Transportation Engineering Studies*", Institute of Transportation Engineers, Washington, DC, 1994.

[SAK92] Sakagami S., Aoyama S., Kuboi K., Shirota S., and Akeyama A., "*Vehicle position estimates by multibeam antennas in multipath environments*", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 41, No.1, pp.63-68, Feb.1992.

[S03] Theodore S. Stamoulakatos, Efstathios D. Sykas, "*A review on Cellular Location Methods targeting Location Based Services"*, IASTED International Conference on Communication Systems and Networks (CSN 2003), pp.118-124, Benalmadena, Spain, September 8-10, 2003.

[SW94] C.W. Sung and W.S. Wong, User speed estimation and dynamic channel allocation in hierarchical cellular system, IEEE VTC (1994) 91-95.

[TG01] Cihan Tepedelenlioglu, Georgios Giannakis, "On Velocity Estimation and Correlation Properties of Narrow-Band Mobile Communication Channels", IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.50, no.4, July 2001.

[TCL01] N. J. Thomas, D. G. M. Cruickshank, D. I. Laurenson, "*Performance of a TDOA-AOA Hybrid Mobile Location System*", Conf. Pub. No. 477, IEE 3G MCT2001, 2001.

[TG01] Cihan Tepedelenlioglu, Georgios Giannakis, "On Velocity Estimation and Correlation Properties of Narrow-Band Mobile Communication Channels", IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.50, no.4, July 2001.

[WC00] Daniel Wong, Donald Cox, "A Pattern Recognition System for Handoff Algorithms", IEEE Journal On Selected Areas In Communications, vol.18, no.7, July 2000.

[WC01] Daniel Wong, Donald Cox, "Two-State Pattern-Recognition Handoffs for Corner-Turning Situations", IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.50, no.2, March 2001.

[WH1] Shawn Turner, William Eisele, Robert Benz, and Douglas Holdener, Travel Time Data Collection Handbook, Report No. FHWA-PL-98-035, Texas Transportation Institute, March 1998.

[WH95] M. Wax, and O. Hilsenrath, "*Signature matching for location determination in wireless communication systems*", U.S. Patent 6,112,095.

[YD00] Jean-Luc Ygnace, Chris Drane, and al., "Travel Time Estimation on the San Francisco Bay Area Network Using Cellular Phones as Probes". U.C. Berkeley PATH working paper, Sep. 2000.

[YN97] K.L. Yeung and S. Nanda, Channel management in microcell/macrocell cellular radio systems, IEEE Transactions on Vehicular Technology 45(4) (November 1997) 601-612.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

3.0. Εισαγωγή

Το μοντέλο που περιγράφεται στη διατριβή αυτή είναι βασισμένο σε τεχνικές αναγνώρισης προτύπου σήματος. Πρόβλημα θεμελιώδους ενδιαφέροντος, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η διαδικασία κατηγοριοποίησης προτύπων σημάτων. Αυτοί οι τύποι σημάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αιτιοκρατικά πρότύπα και στοχαστικά πρότυπα. Τα αιτιοκρατικά πρότυπα εκμεταλλεύονται γενικά μερικές γνωστές συγκεκριμένες ιδιότητες του σήματος, όπως το ότι τα σήματα είναι ένα κύμα ημιτονοειδούς μορφής ή ένα εκθετικό άθροισμα, κτλ. Η δεύτερη ευρεία κατηγορία προτύπων σημάτων είναι ένα σύνολο στατιστικών προτύπων, στα οποία γίνεται προσπάθεια να χαρακτηριστούν επίσης οι στατιστικές ιδιότητες του σήματος. Παραδείγματα τέτοιου είδους στατιστικών προτύπων περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, Poisson και Μαρκοβιανά μοντέλα. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής, εφαρμόζουμε τεχνικές αναγνώρισης προτύπου σήματος σε μετρήσεις σήματος κινητής τηλεφωνίας και πιο συγκεκριμένα επεξεργαζόμαστε τις πληροφορίες που εξάγονται από τις διεπαφές Abis και Iub σε δίκτυα GSM και UMTS.

Στη βιβλιογραφία έχουν βρεθεί διάφορες τεχνικές, οι οποίες βασίζονται στο υπάρχων φορτίο σήματος για αποτελεσματικό υπολογισμό της θέσεως του ΚΤ στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Λόγω της ασάφειας καθώς και της υποβάθμισης ποιότητας σήματος, η εκτίμηση θέσης από τη διαδικασία σύγκρισης πρέπει να φιλτραριστεί. Κατά συνέπεια, είναι ουσιαστικό να χρησιμοποιηθεί ένα αποτελεσματικό φίλτρο για τη σύγκριση βάσεων δεδομένων που περιέχουν μετρήσεις ευαίσθητων "παραμέτρων" θέσης. Δύο διαφορετικές τεχνικές είναι κατάλληλες για τέτοιο φιλτράρισμα:

1. Τεχνική βασισμένη σε Κρυφά Μαρκοβιανά Μοντέλα (HMM) ([R93])
2. Τεχνική βασισμένη στη μέθοδο Kalman (KF) ([BH97])

Συγκρίνοντας την HMM με την KF θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι παράμετροι της HMM είναι λιγότερες και πιο εύκολο να υπολογιστούν, ενώ ο εκτιμητής HMM φαίνεται να είναι λιγότερο ευαίσθητος στα λάθη κατά τη διάρκεια προσδιορισμού των παραμέτρων του πρότυπου. Η παράλληλη επεξεργασία πολλών σεναρίων της HMM είναι πολύ απλούστερη. Τέλος, στην τεχνική KF, η λανθασμένη εκτίμηση των παραμέτρων του προτύπου θα μπορούσε να οδηγήσει την εκτίμηση θέσης σε ακραίες τιμές.

Κατά συνέπεια η επιλογή της HMM είναι καταλληλότερη για τη διαδικασία επεξεργασίας σήματος, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σύγκρισης βάσεων δεδομένων. Επίσης η μελέτη που διενεργήθηκε

με επίκεντρο τη σύγκριση αυτή, έδειξε ότι καλύτερη απόδοση επιτεύχθηκε με τη χρησιμοποίηση της HMM από ότι της Kalman ([NH02]).

3.0.1. Φιλτράρισμα με τη χρήση τεχνικής HMM (Hidden Markov Models)

Τα HMM φίλτρα φαίνεται πως είναι κατάλληλα για την εκτίμηση θέσης αντλώντας στοιχεία από βάσεις δεδομένων που περιέχουν μετρήσεις ευαίσθητων "παραμέτρων" θέσης. Η ασάφεια μέτρησης οδηγεί στους αλγορίθμους εντοπισμού πολλαπλών υποθέσεων, οι οποίοι είναι αρκετά εύκολοι κατά την υλοποίησή τους λόγω της πιθανοθεωρητικής φύσεώς τους. Αξιολογώντας τα HMM φίλτρα, θα μπορούσαμε να πούμε πως παρέχουν υψηλή (τοπική) ακρίβεια, με υψηλή μέση κάλυψη ενώ το κόστος εγκατάστασης του συστήματος είναι χαμηλό.

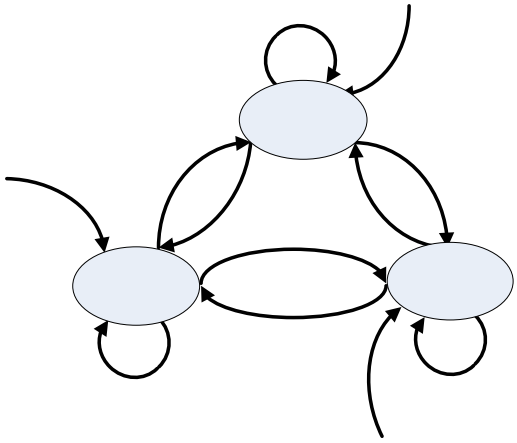
3.0.2. Φιλτράρισμα με τη χρήση τεχνικής Kalman

Τα KM φίλτρα συνδυάζουν αρχικές εκτιμήσεις θέσης γραμμικά, χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο δυναμικής κίνησης του οχήματος. Δεν είναι κατάλληλες για την εκτέλεση δευτεροβάθμιας εκτίμησης των θέσεων από την διαδικασία σύγκρισης βάσεων δεδομένων, ειδικά χωρίς μετρήσεις ταχύτητας. Όταν βασιζόμαστε στα KF φίλτρα, η ασάφεια μέτρησης στους αλγορίθμους εντοπισμού πολλαπλών υποθέσεων μεγαλώνει. Αξιολογώντας τα KF φίλτρα, θα μπορούσαμε να πούμε πως παρέχουν μέση (τοπική) ακρίβεια με χαμηλή κάλυψη, ενώ το κόστος εγκατάστασης του συστήματος είναι χαμηλό.

3.1. Μοντέλα Κρυφών Μαρκοβιανών Αλυσίδων (HMM)

Τα μοντέλα HMM έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για τη λεκτική αναγνώριση (speech recognition) [HK01], καθώς επίσης και για άλλες εφαρμογές που είναι βασισμένες στη σύγκριση και την ανίχνευση προτύπου αναγνώρισης σήματος. Μια διακριτή Μαρκοβιανή διαδικασία χαρακτηρίζεται από έναν πεπερασμένο ή μη-αριθμήσιμο άπειρο πλήθος καταστάσεων $S_1, S_2, S_3, ..., S_N$ (σχήμα 3.1).

Ένα μοντελοποιημένο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ότι ευρισκόμενο σε μία από τις πιθανές καταστάσεις μεταβάλει τη κατάστασή του μεταξύ των πιθανών καταστάσεων σε ίσα και διακριτά διαστήματα, σύμφωνα με την πιθανότητα μετάβασης κατάστασης a_{ij}, που συνδέεται με κάθε κατάσταση. Στην περίπτωση μιας Μαρκοβιανής αλυσίδας πρώτης τάξεως που χρησιμοποιείται στα πλαίσια αυτής της διατριβής, η πιθανότητα μετάβασης κατάστασης δεν εξαρτάται από το ιστορικό της διαδικασίας, αλλά μόνο από την τρέχουσα κατάσταση.



Σχήμα 3.1. Μαρκοβιανή αλυσίδα τριών (3) καταστάσεων

Κατά τη μοντελοποίησή μας, χρησιμοποιούμε μοντέλα στηριζόμενα σε κρυφές Μαρκοβιανές Αλυσίδες, παρά σε απλές Μαρκοβιανές. Δεδομένου ότι κατά τη μοντελοποίηση με τη χρήση απλών Μαρκοβιανών Μοντέλων, η αντιστοιχία καταστάσεων και παρατηρήσεων είναι ένα προς ένα, η μοντελοποίηση καθίσταται αυτομάτως πολύ περιοριστική για να δώσει επιτυχώς λύσεις σε πραγματικά προβλήματα. Επέκταση της αρχής του Μαρκοβιανού μοντέλου, περιλαμβάνει τη περίπτωση όπου η παρατήρηση είναι πιθανοθεωρητική συνάρτηση της καταστάσεως. Το μοντέλο στη περίπτωση αυτή θα καλείται Κρυφό Μαρκοβιανό Μοντέλο (Hidden Markov Model - HMM). Κάθε κατάσταση ενός HMM ανατίθεται σε όλες τις παρατηρήσεις, ενώ χρησιμοποιούνται οι μεμονωμένες πιθανότητες $b_j(k)$. Για την μοντελοποίηση που ακολουθεί, το N δείχνει τον αριθμό καταστάσεων, M το συνολικό αριθμό των διακριτών παρατηρήσεων και T το μήκος μιας ακολουθίας παρατηρήσεων. Το μοντέλο χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων. Η πιθανότητα μετάβασης κατάστασης a_{ij} μιας Markov διαδικασίας με $a_{ij} = P[q_t = S_j \mid q_{t-1} = S_i]$ είναι η πιθανότητα το μοντέλο να είναι στη κατάσταση S_j τη χρονική στιγμή $t+1$ αν βρισκόταν στη κατάσταση S_i τη χρονική στιγμή t. Η πιθανότητα της κατανομής των παρατηρήσεων για κάθε κατάσταση είναι $B = \{b_j(k)\}$, με $b_j(k)$ η πιθανότητα εμφάνισης της παρατήρησης u_k στη κατάσταση S_j. Η αρχική πιθανότητα π_i με $\pi_i = P[q_1 = S_i]$ είναι η πιθανότητα η κατάσταση S_i να εμφανιστεί στην αρχή της σειράς των παρατηρήσεων.

Για κάθε μοντέλο, οι ακόλουθες συνθήκες πρέπει να ισχύουν (1) – (4):

$$P[q_t = S_j \mid q_{t-1} = S_i, q_{t-2} = S_{k,} \ldots] = P[q_t = S_j \mid q_{t-1} = S_i] \qquad (1)$$

$\pi_i = P[i_1 = i], \quad 1 \le i \le N$ και $\pi_i \ge 0$ με

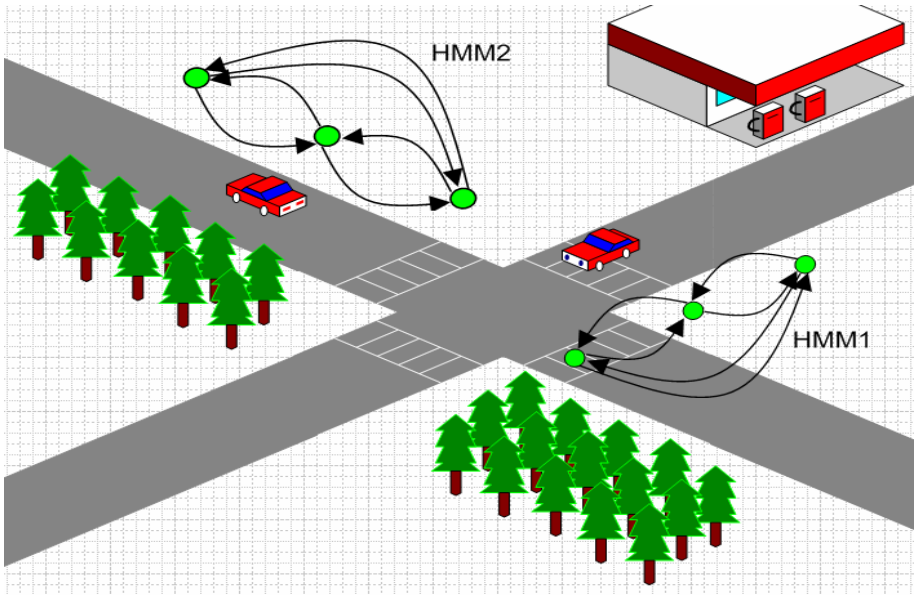
$$\sum_{i=1}^{N} \pi_i = 1 \tag{2}$$

$a_{ij} = P[q_t = S_j \mid q_{t-1} = S_i]$ και $1 \le i, j \le N,\ 1 \le t \le T,\ a_{ij} \ge 0$

$$\text{με} \sum_{j=1}^{N} a_{ij} = 1,\ 1 \le i \le N \tag{3}$$

$b_j(k) = P[u_k \text{ at } t \mid i_t = i]$ και $1 \le i, j \le N,\ 1 \le k \le M,\ b_j(k) \ge 0$

$$\text{Με} \sum_{k=1}^{M} b_j = 1,\ 1 \le j \le N \tag{4}$$



Σχήμα 3.2. Μοντελοποίηση οδών

Δοθέντων των παραμέτρων μιας HMM, τα ακόλουθα προβλήματα μπορούν να λυθούν ([R93]):

1. Δοθείσης μιας ακολουθίας παρατηρήσεων $O = O_1, O_2, O_3, ..., O_N$ και ενός μοντέλου $\lambda = \{A, B, \pi\}$, πώς υπολογίζουμε τη τιμή πιθανοφάνειας $P(O \mid \lambda)$ (ότι η ακολουθία παρατηρήσεων $O = O_1, O_2, O_3, ..., O_N$ προέκυψε από το μοντέλο $\lambda = \{A, B, \pi\}$); Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται ως πρόβλημα αξιολόγησης (evaluation problem).

2. Δοθείσης μιας ακολουθίας παρατηρήσεων $O = O_1, O_2, O_3, ..., O_N$ και ενός μοντέλου $\lambda = \{A, B, \pi\}$, πώς επιλέγουμε τη βέλτιστη ακολουθία καταστάσεων $I = I_1, I_2, I_3, ..., I_N$; Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται ως πρόβλημα αποκωδικοποίησης (decoding problem).

3. Δοθείσης μιας ακολουθίας παρατηρήσεων $O = O_1, O_2, O_3, ..., O_N$ πώς ρυθμίζουμε τις παραμέτρους του μοντέλου $\lambda = \{A, B, \pi)$, για να μεγιστοποιήσουν τη τιμή πιθανοφάνειας $P(O \mid \lambda)$; Αυτό το πρόβλημα αναφέρεται ως πρόβλημα εκμάθησης ή εκτίμησης (learning/estimation problem).

Η λύση αυτών των προβλημάτων είναι σημαντική για τη δημιουργία του μοντέλου. Όταν έχουμε πολλαπλές HMM και μια ακολουθία παρατηρήσεων, η λύση στο πρόβλημα αξιολόγησης χρησιμοποιείται για να καθορίσει το πιθανότερο πρότυπο για την περιγραφή των δεδομένων. Αφότου βρεθεί το μοντέλο που ταιριάζει καλύτερα στην ακολουθία παρατηρήσεων, η λύση του προβλήματος αποκωδικοποίησης βοηθά στην εμφάνιση της (ελλοχεύουσας) δομής του προβλήματος, δηλ. τις κρυμμένες καταστάσεις του μοντέλου. Η λύση στο πρόβλημα εκμάθησης χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των μοντέλων, που χρησιμοποιούνται στα προηγούμενα προβλήματα.

3.1.1. Λύση στο πρόβλημα αξιολόγησης

Η απλή λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι:

$$P(O \mid \lambda) = \sum_{all\ Q} P(O \mid Q, \lambda) P(Q \mid \lambda) = \sum_{q_1, q_2, ..., q_T} \pi_{q_1} b_{q_1}(O_1) a_{q_1 q_2} b_{q_2}(O_2) ... a_{q_{T-1} q_T} b_{q_T}(O_T),$$ όπου $q_1, q_2, ..., q_T$

είναι ο συνδυασμός όλων των καταστάσεων ακολουθιών μήκους T. Το πρόβλημα με αυτήν την προσέγγιση είναι ο αριθμός υπολογισμών που απαιτούνται, ο οποίος είναι της τάξεως TN^T. Αυτό μπορεί να είναι απραγματοποίητο ακόμη και για μικρές τιμές του N και T.

Η διαδικασία Forward-Backward μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα αποτελεσματικότερα. Σε αυτόν τον αλγόριθμο υπολογίζεται η μεταβλητή forward $a_t(i)$ που ορίζεται ως:

$$a_t(i) = P(O_1 O_2 ... O_t, q_t = S_i \mid \lambda) \qquad (5)$$

Αυτή η μεταβλητή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλη τη διάρκεια της ακόλουθης διαδικασίας:

α. Αρχικοποίηση:

$a_1(i) = \pi_i b_i(O_1)$ ¨με $1 \le i \le N$

β. Επαγωγή:

$$a_{t+1}(j) = \left[\sum_{i=1}^{n} a_t(i) a_{ij} \right] b_j(O_{t+1})$$ ¨με $1 \le t \le T-1$, $1 \le j \le N$

γ. Τερματισμός:

$$P(O \mid \lambda) = \sum_{i=1}^{N} a_T(i).$$

Ο υπολογισμός αυτής της μεταβλητής περιλαμβάνει μόνο μια τάξη $N^2 T$ διαδικασιών. Αυτός ο αριθμός είναι εφικτός για εφαρμογή. Αυτή η διαδικασία είναι μια ειδική περίπτωση δυναμικού

προγραμματισμού ([B57], [SM90]), που είναι μια μαθηματική έννοια που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των διαδοχικών προβλημάτων απόφασης, βασισμένη στην αρχή της βελτιστοποίησης.

Ο υπολογισμός μιας backward μεταβλητής μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά παρόμοιο τρόπο [R89]. Αυτή η μεταβλητή ορίζεται ως:

$$\beta_t(i) = P(O_{t+1}, O_{t+2}, ..., O_T \mid q_t = S_i, \lambda) \qquad (6)$$

Και η forward και η backward μεταβλητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του πρώτου προβλήματος του HMM προτύπου.

3.1.2. Λύση στο πρόβλημα αποκωδικοποίησης

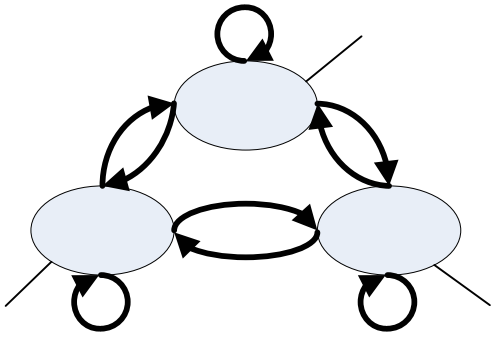
Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα αποκωδικοποίησης, η έννοια της βελτιστοποίησης πρέπει να καθοριστεί συγκεκριμένα. Η βελτιστοποίηση μπορεί να καθοριστεί με διάφορους τρόπους, μεταξύ των οποίων:

α. η ακολουθία καταστάσεων στην οποία κάθε κατάσταση είναι q_t χωριστά πιο πιθανή.

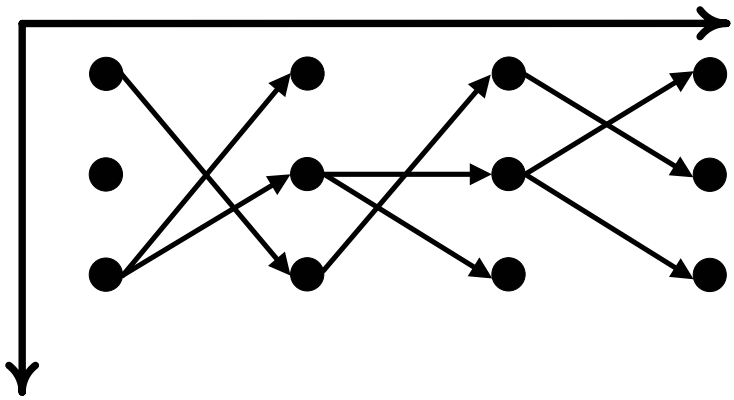
β. η ακολουθία καταστάσεων, η οποία μεγιστοποιεί τον αναμενόμενο αριθμό σωστών ζευγών καταστάσεων.

γ. η ακολουθία καταστάσεων, η οποία μεγιστοποιεί τον αναμενόμενο αριθμό σωστών τριπλετών καταστάσεων.

Το ευρύτατα χρησιμοποιημένο κριτήριο για βελτιστοποίηση, είναι να βρεθεί η μοναδική βέλτιστη ακολουθία καταστάσεων (μονοπάτι), δηλ. η μεγιστοποίηση της $P(Q \mid O, \lambda)$. Ο αλγόριθμος επίλυσης αυτού του προβλήματος καλείται αλγόριθμος Viterbi και είναι μια μορφή του προηγουμένως περιγεγραμμένου δυναμικού προγραμματισμού, για ένα στοχαστικό σύστημα ([V67], [F73]).



Σχήμα 3.3.α.: Μαρκοβιανό μοντέλο 3 καταστάσεων



Σχήμα 3.3.β.: Διάγραμμα Trellis για την εκτίμηση της ακολουθίας του μοντέλου του σχήματος 3.3.α.

Ο αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί απλά ως ένας αλγόριθμος που βρίσκει την πλέον πιθανή πορεία μέσω trellis (κρυσταλλικής διατάξεως), δεδομένου ενός συνόλου παρατηρήσεων. Το σχήμα 3.3 παρουσιάζει ένα παράδειγμα του Viterbi αλγορίθμου.

Ο αλγόριθμος Viterbi βρίσκει την μοναδική βέλτιστη ακολουθία καταστάσεων $I = I_1, I_2, I_3, ..., I_N$ χρησιμοποιώντας την ακόλουθη ποσότητα:

$\delta_t(i) = \max P(q_1 q_2, ..., q_t = i, O_1 O_2 ... O_t \mid \lambda)$.

π.χ. $\delta_t(i)$ δίνει την υψηλότερη πιθανότητα κατά μήκος ενός μοναδικού μονοπατιού, σε χρόνο t, ο οποίος αποτελείται από τις πρώτες t παρατηρήσεις και τελειώνει στη κατάσταση S_i. Με επαγωγή έχουμε:

$\delta_{t+1}(i) = [\max_i \delta_t(i) a_{ij}] b_j(O_{t+1})$ (7)

Προκειμένου να ανακτήσουμε την ακολουθία καταστάσεων, το ίχνος της μεταβλητής το οποίο μεγιστοποιεί την (7), πρέπει να αποθηκευτεί. Αυτό γίνεται μέσω του βοηθητικού πίνακα $\psi_t(j)$. Η πλήρης διαδικασία δηλώνεται ως εξής:

α. Αρχικοποίηση:

$\delta_1(i) = \pi_i b_i(O_1)$, $1 \le i \le N$

$\psi_1(i) = 0$

Επαγωγή:

$\delta_t(j) = \max_{1 \le i \le N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] b_j(O_t)$, $2 \le t \le T$ $1 \le j \le N$

$\psi_t(j) = \arg\max_{1 \le i \le N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}]$, $2 \le t \le T$ $1 \le j \le N$

β. Τερματισμός:

κατάσταση ΑΒΓ

$P^* = \max_{1 \le i \le N}[\delta_T(i)]$.

$q_t^* = \arg\max_{1 \le i \le N}[\delta_T(i)]$.

γ. Μονοπάτι (ακολουθία καταστάσεων) backtracking:

$q_t^* = \psi_{t+1}(q_{t+1}^*)$, $t = T-1, T-2, ..., 1$.

3.1.3. Λύση στο πρόβλημα εκμάθησης / εκτίμησης

Αυτό το πρόβλημα περιλαμβάνει την εύρεση του μοντέλου λ που μεγιστοποιεί τη τιμή πιθανοφάνειας $P(O \mid \lambda)$, δοθείσης μιας σταθερής ακολουθίας παρατηρήσεων $O = O_1, O_2, O_3, ..., O_N$. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να περιγραφεί, επομένως, ως πρόβλημα εύρεσης του ολικού μεγίστου της συνάρτησης likelihood (ML). Δεν υπάρχει γνωστός τρόπος αναλυτικού υπολογισμού του γενικού μεγίστου της συνάρτησης πιθανότητας. Είναι δυνατό εντούτοις ο υπολογισμός τοπικών μεγίστων της παραπάνω συνάρτησης με τη χρήση των ακόλουθων αλγορίθμων:

α. Ο αλγόριθμος Baum-Welch, γνωστός επίσης και ως EM (Expectation Modification) μέθοδος ([DLR77], [BP66], [W83], [B72]).

β. Ο αλγόριθμος Segmental K-Means ([LRS83], [JR90], [RWJ86]).

Ο αλγόριθμος Baum-Welch παρέχει μια εκτίμηση η οποία μεγιστοποιεί τοπικά τη συνάρτηση πιθανότητας δεδομένης ακολουθίας παρατηρήσεων ενώ ο αλγόριθμος Segmental K-Means παρέχει μια εκτίμηση που μεγιστοποιεί τοπικά την κοινή πιθανότητα της ακολουθίας παρατηρήσεων και της περισσότερο πιθανής ακολουθίας καταστάσεων.

3.1.3.1. Ο αλγόριθμος Baum-Welch

Προκειμένου να δημιουργήσουμε τον αλγόριθμο επανεκτίμησης Baum-Welch, πρώτα ορίζουμε την $\xi_t(i, j)$, η οποία είναι η πιθανότητα το μοντέλο να είναι στη κατάσταση S_i τη χρονική στιγμή t και στη κατάσταση S_j τη χρονική στιγμή $t+1$, δοθέντων του προτύπου και της ακολουθίας παρατηρήσεων, δηλ.

$\xi_t(i, j) = P(q_t = S_i, q_{t+1} = S_j \mid O, \lambda)$.

Ο ορισμός αυτός μπορεί να δοθεί διαφορετικά χρησιμοποιώντας τους ορισμούς των μεταβλητών forward και backward (5) και (6) αντιστοίχως:

$$\xi_t(i, j) = \frac{a_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{P(O \mid \lambda)} = \frac{a_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} a_t(i) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}.$$

Η πιθανότητα το μοντέλο να είναι στη κατάσταση S_i τη χρονική στιγμή t, δοθέντων της ακολουθίας παρατηρήσεων και του προτύπου, ορίζει το πρότυπο $\gamma_t(i)$ ως εξής:

$$\gamma_t(i) = P(q_t = S_i \mid O, \lambda) = \frac{a_t(i)\beta_t(i)}{P(O \mid \lambda)} = \frac{a_t(i)\beta_t(i)}{\sum_{i=1}^{N} a_t(i)\beta_t(i)} \quad (1)$$

και μπορεί να συσχετιστεί με το $\xi_t(i, j)$ ως:

$$\gamma_t(i) = \sum_{j=1}^{N} \xi_t(i, j).$$

Το άθροισμα των $\gamma_t(i)$ πέραν από το χρονικό όριο t, δίνει τον αναμενόμενο (κατά τη διάρκεια του χρόνου t), αριθμό επισκέψεων της καταστάσεως S_i, ή ισοδύναμα, ο αναμενόμενος αριθμός μεταβάσεων που γίνονται από τη κατάσταση S_i. Ομοίως, το άθροισμα των $\xi_t(i, j)$ κατά τη διάρκεια του χρόνου t μπορεί να ερμηνευθεί ως ο αναμενόμενος αριθμός μεταβάσεων από τη κατάσταση S_i στη κατάσταση S_j, το οποίο είναι:

$\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i)$, ο αναμενόμενος αριθμός μεταβάσεων από τη κατάσταση S_i

$\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i.j)$, ο αναμενόμενος αριθμός μεταβάσεων από τη κατάσταση S_i στη κατάσταση S_j

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω τύπους (και την έννοια της απαρίθμησης εμφάνισης γεγονότος), η μέθοδος για την επανεκτίμηση των παραμέτρων του HMM, δηλ. ένα σύνολο λογικών τύπων επανεκτίμησης για π, A και B είναι:

$$\bar{\pi}_i = \textit{αναμενόμενη συχνότητα (πλήθος μεταβάσεων) στη κατάσταση } S_i \textit{ τη χρονική στιγμή } (t = 1) = \gamma_1(i) \quad (2)$$

$$a_{ij} = \frac{\textit{αναμενόμενο πλήθος μεταβάσεων από } S_i \textit{ σε } S_j}{\textit{αναμενόμενο πλήθος μεταβάσεων από } S_i} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \xi_t(i, j)}{\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_t(i)} \quad (3)$$

και

$$b_j = \frac{\textit{αναμενόμενο πλήθος μεταβάσεων στη κατάσταση } S_j \textit{ με σύμβολο παρατήρησης } v_k}{\textit{αναμενόμενο πλήθος μεταβάσεων στη κατάσταση } S_j} \quad (4)$$

$$= \frac{\sum_{t=1, O_t = v_k}^{T} \gamma_t(j)}{\sum_{t=1}^{T} \gamma_t(j)}.$$

Αν το τρέχων πρότυπο είναι $\lambda = (A, B, \pi)$, τότε το μοντέλο επανεκτίμησης είναι $\bar{\lambda} = (\bar{A}, \bar{B}, \bar{\pi})$, το οποίο προέρχεται από τις εξισώσεις (2)-(4). Μπορεί να αποδειχθεί ([BP66], [W83]) ότι:

Το αρχικό πρότυπο λ καθορίζει ένα κρίσιμο σημείο της λειτουργίας πιθανότητας, οπότε σε αυτή την περίπτωση $\bar{\lambda} = \lambda$.

Το πρότυπο $\bar{\lambda}$ είναι πιθανότερο από το πρότυπο λ υπό την έννοια ότι $P(O \mid \bar{\lambda}) > P(O \mid \lambda)$, δηλ. το νέο πρότυπο $\bar{\lambda}$, είναι πιθανότερο να παραγάγει την ακολουθία παρατηρήσεων.

Βασιζόμενοι στη παραπάνω διαδικασία, η πιθανότητα εμφάνισης της ακολουθίας παρατηρήσεων $O = O_1, O_2, O_3, ..., O_N$ από το μοντέλο μπορεί να βελτιωθεί έως ενός σημείου. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας επανεκτίμησης καλείται εκτίμηση μέγιστης πιθανότητας του HMM. Κατά την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας σε περίπτωση συνεχών παρατηρήσεων, η επανεκτίμηση του πίνακα μετάβασης A, καθώς και η κατανομή της αρχικής καταστάσεως είναι ίδια με αυτήν που χρησιμοποιείται κατά την περίπτωση διακριτών παρατηρήσεων (εξισώσεις (2)-(4)).

Η διαδικασία επανεκτίμησης των πιθανοτήτων κατά την περίπτωση συνεχών παρατηρήσεων έχει ως ακολούθως:

$$\bar{c}_{jk} = \frac{\sum_{t=1}^{T} \gamma_t(j,k)}{\sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{M} \gamma_t(j,k)}$$

$$\bar{\mu}_{jk} = \frac{\sum_{t=1}^{T} \gamma_t(j,k)\, O_t}{\sum_{t=1}^{T} \gamma_t(j,k)}$$

και

$$\bar{U}_{jk} = \frac{\sum_{t=1}^{T} \gamma_t(j,k)\, (O_t - \mu_{jk})'(O_t - \mu_{jk})}{\sum_{t=1}^{T} \gamma_t(j,k)}$$

Όπου $\gamma_t(j,k)$ είναι η πιθανότητα το μοντέλο να βρίσκεται στη κατάσταση j τη χρονική στιγμή t με τον k -οστό μικτό (mixture) όρο, προσμετρώντας για το O_t, π.χ.,

$$\gamma_t(j,k) = \left[\frac{\alpha_t(j)\beta_t(j)}{\sum_{i=1}^{N} \alpha_t(i)\beta_t(i)} \right] \left[\frac{c_{jk} P(O_t, \mu_{jk}, U_{jk})}{\sum_{m=1}^{M} c_{jm} P(O_t, \mu_{jm}, U_{jm})} \right] \tag{5}$$

Ο παραπάνω ορισμός μπορεί να γενικευθεί ως $\gamma_t(j)$ στην περίπτωση ενός απλού μίγματος (simple mixture), δηλ. M = 1, επαναδιατυπωμένος ακριβώς όπως στην εξίσωση (1). Ο δεύτερος όρος κατά τον ορισμό της εξίσωσης (5) είναι ομοίως 1.

3.1.3.2. Ο αλγόριθμος Segmental K-Means

Ο αλγόριθμος Segmental K-Means ([RWJ86]) αρχίζει με ένα σύνολο παρατηρήσεων εκμάθησης / εκτίμησης (το ίδιο απαιτείται για την εκτίμηση παραμέτρου) και μιας αρχικής εκτίμησης όλων των παραμέτρων του μοντέλου. Αφότου αρχικοποιηθεί το μοντέλο, το σύνολο παρατηρήσεων εκμάθησης / εκτίμησης χωρίζεται σε καταστάσεις, με κριτήριο το τρέχον μοντέλο λ. Η κατάτμηση αυτή επιτυγχάνεται με την εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας καταστάσεων, πρώτα με τη χρήση του Viterbi αλγορίθμου και έπειτα, οπισθοδρομώντας (back-tracking) κατά μήκος του βέλτιστου μονοπατιού. Οι ακολουθίες παρατήρησης κάθε καταστάσεως S_j ομαδοποιούνται σε ένα σύνολο M ομάδων. Κατά την ομαδοποίηση αυτή, εξάγεται ένα σύγχρονο σύνολο των παραμέτρων του μοντέλου.

Με βάση την κατάτμηση σε καταστάσεις, σύγχρονες εκτιμήσεις των συντελεστών a_{ij} μπορούν να ληφθούν με τον υπολογισμό του αριθμού μεταβάσεων από τη κατάσταση i στη κατάσταση j και τη διαίρεση του τελευταίου με τον αριθμό μεταβάσεων από τη κατάσταση i σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση. Ένα σύγχρονο πρότυπο $\bar{\lambda}$ λαμβάνεται από τις νέες παραμέτρους του προτύπου και η γνωστή διαδικασία επανεκτίμησης χρησιμοποιείται προκειμένου να επανεκτιμηθούν όλες οι παράμετροι του προτύπου. Το συνακόλουθο πρότυπο συγκρίνεται έπειτα με το προηγούμενο πρότυπο (με τον υπολογισμό του "βαθμού απόστασης" που απεικονίζει τη στατιστική ομοιότητα των μοντέλων HMM, βασισμένη στις συναρτήσεις πιθανότητας των παραμέτρων). Εάν ο "βαθμός απόστασης" υπερβαίνει ένα κατώτατο όριο, τότε το παλαιό πρότυπο λ αντικαθίσταται από το (επανεκτιμημένο) πρότυπο $\bar{\lambda}$, και ο γενικός βρόχος εκμάθησης / εκτίμησης επαναλαμβάνεται. Σε περίπτωση που ο "βαθμός απόστασης" δεν υπερβεί το κατώτατο όριο, τότε θεωρούμε ότι το πρότυπο συγκλίνει και κρατούνται οι τελικές παράμετροι του μοντέλου. Η σύγκλιση αυτού του αλγορίθμου είναι εγγυημένη ([CT91]) όπως και στη περίπτωση του αλγορίθμου Baum-Welch.

3.2. Μέθοδοι Κατάτμησης / Ομαδοποίησης

Τόσο ο αλγόριθμος Baum-Welch όσο και ο αλγόριθμος Segmental K-Means αρχικοποιούνται με ένα αρχικό μοντέλο λ (αρχικοποίησης). Η αρχικοποίηση είναι κρίσιμη για τα αποτελέσματα των αλγορίθμων, λόγω των προβλημάτων τοπικών μέγιστων / ελάχιστων των προαναφερθέντων αλγορίθμων. Ο υπολογισμός του αρχικού προτύπου συνήθως πραγματοποιείται από μία τεχνική κατάτμησης.

Η ανάλυση κατάτμησης είναι μια τεχνική ομαδοποίησης στοιχείων, καθώς και εύρεσης δομών στα στοιχεία. Η πιο κοινή εφαρμογή τεχνικών κατάτμησης είναι ο διαχωρισμός ενός συνόλου στοιχείων σε ομάδες ή κατηγορίες, όπου παρόμοια στοιχεία ανατίθενται στην ίδια συστάδα / ομάδα, ενώ ανόμοια στοιχεία σε διαφορετικές συστάδες / ομάδες. Σε πραγματικές εφαρμογές πολύ συχνά, δεν υπάρχει ξεκάθαρο όριο μεταξύ των συστάδων, δημιουργώντας την ανάγκη για την ανάπτυξη διαφορετικών προσεγγίσεων για την επίλυση του προβλήματος κατάτμησης.

Οι τεχνικές κατάτμησης / ομαδοποίησης μπορούν κατά προσέγγιση να ταξινομηθούν στις ιεραρχικές και τις μη-ιεραρχικές τεχνικές. Η μη-ιεραρχικές τεχνικές μπορούν επίσης να διαιρεθούν σε τέσσερις κατηγορίες: στις μεθόδους διαίρεσης, στις μεθόδους πυκνότητας, στις μεθόδους πλέγματος και στις μεθόδους προτύπων ([JMF99]).

Οι ιεραρχικές τεχνικές επεξεργάζονται διαδοχικά είτε με τη συγχώνευση των μικρότερων συστάδων στις μεγάλες συστάδες, είτε με το διαχωρισμό των μεγαλύτερων συστάδων. Οι τεχνικές αυτές παράγουν ένα δενδροδιάγραμμα ή ένα δέντρο συστάδων που αντιπροσωπεύει πώς συσχετίζονται οι συστάδες. Οι μη-ιεραρχικές τεχνικές παράγουν k το πλήθος αρχικές συστάδες K και βελτιώνουν τη σύνθεση των συστάδων αυτών, με επαναλαμβανόμενο διαχωρισμό των στοιχείων μεταξύ των k συστάδων. Το πλήθος k καθώς και το πλήθος των επαναλήψεων εξαρτάται από το χρήστη. K-Means (KM), K-medoids (Partitioning Around Medoids (PAM) καθώς και Clustering LARge Applications (CLARA)) [JMF99] ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Η μέθοδος Self-Organizing Map (SOM), ως μέθοδος μοντέλων, αναπτύχθηκε για εφαρμογές καλύτερης λεκτικής αναγνώρισης ([K00], [KBC88]). Η τεχνική Fuzzy C-means (FCM) ως τεχνική μοντέλων, αναπτύχθηκε από τον Bezdek ([BP92], [HY01]) γενικεύοντας την ιδέα του Dunn ([D74]).

Ελκυστικές τεχνικές για την κατάτμηση τιμών στάθμης σήματος κατερχόμενης ζεύξης θεωρούνται οι τεχνικές κατάτμησης KM και FCM, από τον τομέα της στατιστικής, καθώς και οι μέθοδοι Kohonen self-organizing map (SOM) και fuzzy adaptive resonance theory (ART), από τον τομέα των τεχνιτών νευρωνικών δικτύων. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής επικεντρωνόμαστε στις στατιστικές τεχνικές κατάτμησης.

3.2.1. K-Means

Η τεχνική κατάτμησης ΚΜ μπορεί καλύτερα να περιγραφεί ως τεχνική ομαδοποίησης. Η τεχνική ΚΜ διαχωρίζει τις παρατηρήσεις σε στοιχεία σε K το πλήθος αμοιβαίως αποκλειόμενες ομάδες, και επιστρέφει ένα διάνυσμα των δεικτών που δείχνουν σε ποια από τις k ομάδες έχει ανατεθεί η κάθε παρατήρηση. Σε αντίθεση με τις ιεραρχικές τεχνικές κατάτμησης, η τεχνική ΚΜ δεν δημιουργεί μια δενδροδομή για να περιγράψει τις ομαδοποιήσεις των στοιχείων, αλλά δημιουργεί ένα ενιαίο επίπεδο συστάδων.

Μια άλλη διαφορά είναι ότι η τεχνική ΚΜ χρησιμοποιεί τις πραγματικές παρατηρήσεις από τα επεξεργαζόμενα στοιχεία, και όχι απλά τις προσεγγίσεις τους. Οι διαφορές αυτές αναδεικνύουν την τεχνική ΚΜ ως την καταλληλότερη για ομαδοποίηση μεγάλου όγκου στοιχείων.

Κάθε ομάδα κατά το διαχωρισμό καθορίζεται από τα αντικείμενα, που είναι μέλη της καθώς και από το κέντρο τους. Το κέντρο κάθε συστάδας είναι το σημείο στο οποίο το άθροισμα των αποστάσεων, από όλα τα υπόλοιπα αντικείμενα σε εκείνη την συστάδα, ελαχιστοποιείται. Η τεχνική ΚΜ υπολογίζει τα κέντρα συστάδων, προκειμένου να ελαχιστοποιήσει το άθροισμα σε σχέση με το μέτρο απόστασης. Η τεχνική ΚΜ χρησιμοποιεί έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, ο οποίος ελαχιστοποιεί το άθροισμα των αποστάσεων κάθε αντικειμένου από το κέντρο της συστάδας στην οποία ανήκει. Ο αλγόριθμος αυτός κινεί τα αντικείμενα μεταξύ των συστάδων, έως ότου το προαναφερθέν άθροισμα αποστάσεων να μη μπορεί να μειωθεί περαιτέρω.

Η τεχνική ΚΜ συνοψίζεται ως εξής:

Έστω $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ ένα σύνολο δοθέντων στοιχείων, όπου κάθε σημείο $x_k\,(k = 1,...,n)$ είναι ένα διάνυσμα, το οποίο ανήκει στο σύνολο $\Re^p$, $U_c = (u_1, u_2, ..., u_c)$ είναι ένας πίνακας αγνώστων κέντρων συστάδων (πρωτότυπων) $u_i \in \Re^p$ όπου $i = 1,...,c$ και c είναι ακέραιος όπου $2 \le c < n$. Έτσι, ο χώρος κατάτμησης ΚΜ για το σύνολο X είναι ένα σύνολο $M_{Kc} = \{U_c \in U : u_{ik} \in [0,1]\}$

με $\sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1$ και $0 < \sum_{i=1}^{c} u_{ik} < n$

όπου u_{ik} είναι μια τιμή μέλους του x_k στη συστάδα i (i=1,…,c).

Πίνακας μέλους: $u_{ik} = \begin{cases} 1, if\ \|x_k - u_i\|^2 \le \|x_k - u_j\|^2 \\ 0, otherwise \end{cases}$

όπου:

$\|x\|$ είναι η Ευκλείδεια νόρμα του x.

Περιορισμοί:

α. Κάθε συστάδα U_i καλύπτει το σύνολο του χώρου κατάτμησης U

$$\bigcup_{i=1}^{c} U_i = U$$

β. Οι συστάδες δεν αλληλοκαλύπτονται:

$$U_i \cap U_j = \emptyset \quad for\ all\ i \neq j$$

γ. Μια συστάδα U_i δεν είναι ποτέ άδεια και είναι πάντοτε μικρότερη από το σύνολο του χώρου κατάτμησης U

$$\emptyset \subset U_i \subset U \quad for\ all\ i$$

δ. Πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 2 συστάδες σε κατάτμηση με τη μέθοδο ΚΜ και το πολύ τόσες, όσες ο αριθμός των σημείων x_k

$2 \leq c \leq k$ όπου $k = 1,...,n$.

Αντικειμενική συνάρτηση:

Min(J);

$$J = \sum_{i=1}^{c} J_i = \sum_{i=1}^{c} \left(\sum_{x_k, u_k \in U_i} \left\| x_k - u_i \right\|^2 \right).$$

3.2.2. Fuzzy C Means

Η ανάλυση κατάτμησης τύπου Fuzzy έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση εικόνας και την αναγνώριση προτύπων. Στα πλαίσια αυτής της διατριβής ερευνήσαμε την τεχνική FCM ([B00], [CLF00]). Η τεχνική FCM είναι μία από τις ευρύτατα χρησιμοποιημένες τεχνικές κατά κατάτμηση τύπου Fuzzy. Η τεχνική FCM είναι στην πραγματικότητα μια γενίκευση της τεχνικής ΚΜ, δεδομένου ότι μπορεί να ληφθεί από την τεχνική ΚΜ, στην περίπτωση που ο γενικευμένος μέσος όρος συμπίπτει με τον αριθμητικό μέσο όρο (επικάλυψη). Βασιζόμενοι στις ίδιες υποθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον ορισμό της ΚΜ, η τεχνική FCM συνοψίζεται ως εξής:

Ο χώρος κατάτμησης FCM για το σύνολο X είναι το σύνολο $M_{Fc} = \{U_c \in U : u_{ik} \in [0,1]\}$

με $\sum_{i=1}^{c} u_{ik} = 1$ και $0 < \sum_{i=1}^{c} u_{ik} < n$

όπου u_{ik} είναι η τιμή μέλους x_k στη συστάδα i (i=1,…,c).

Πίνακας μέλους: $u_{ik} = \left[\sum_{j=1}^{c} \left(\frac{\left\| x_k - u_i \right\|^2}{\left\| x_k - u_j \right\|^2} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1}$

Περιορισμοί:

α. Όλες οι συστάδες U_i καλύπτουν το σύνολο του χώρου κατάτμησης U

$$\bigcup_{i=1}^{c} U_i = U$$

β. Οι συστάδες αλληλοκαλύπτονται:

$U_i \cap U_j \neq \emptyset$ για όλα τα $i \neq j$

γ. Μια συστάδα U_i δεν μπορεί να είναι ποτέ άδεια και είναι πάντοτε μικρότερη από το σύνολο του χώρου κατάτμησης U

$\emptyset \subset U_i \subset U$ για όλα τα i

δ. Πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 2 συστάδες σε κατάτμηση με τη τεχνική FCM και το πολύ τόσες, όσες ο αριθμός των σημείων x_k

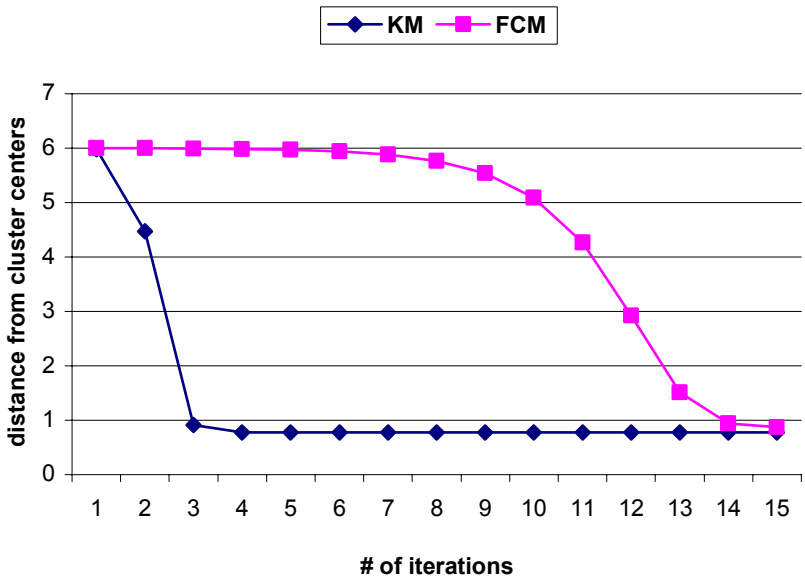
$2 \leq c \leq k$ όπου $k = 1,...,n$.

Αντικειμενική Συνάρτηση:

Min(J);

$$J = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} (u_{ik})^m \left\| x_k - u_i \right\|^2$$

και $m \in [1, \infty)$ είναι ο εκθέτης στάθμισης (μια σταθερά που επηρεάζει τις τιμές μέλους).



Σχήμα 3.3. Σύγκριση τεχνικών κατάτμησης KM και FCM

Στα πλαίσια της διατριβής μεταξύ των προαναφερθέντων δύο τεχνικών κατάτμησης KM και FCM, η KM επελέγη για την κατάτμηση λόγω της ταχύτερης σύγκλισης, εξετάζοντας το ίδιο σύνολο στοιχείων και συνθηκών αρχικοποίησης (βλέπε σχήμα 3.3).

3.2.3. PAM

Παρόλο ότι δεν υπάρχει γενικός ορισμός της συστάδας, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι για τη δημιουργία διαφορετικών ειδών συστάδων: σφαιρική, γραμμική, και άλλες. Στις [KR87] και [S85] αναλύονται λεπτομερώς τα παραπάνω ζητήματα. Μεταξύ των υπαρχόντων αλγορίθμων κατάτμησης, οι μέθοδοι K-medoid έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για κατάτμηση δεδομένων. Οι λόγοι είναι αρκετοί. Κατ' αρχάς, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους κατάτμησης, οι μέθοδοι K- medoid είναι ανεπηρέαστες από την ύπαρξη σημείων που βρίσκονται αρκετά μακρύτερα από τα υπόλοιπα στοιχεία του εξεταζόμενου συνόλου. Δεύτερον, οι συστάδες που δημιουργούνται με χρήση των μεθόδων K-medoid δεν εξαρτώνται από τη σειρά εξέτασης των στοιχείων του εξεταζόμενου συνόλου. Τέλος, πειράματα έδειξαν ότι οι μέθοδοι K-medoid που περιγράφονται ακολούθως, μπορούν να χειριστούν αποτελεσματικά πολύ μεγάλα σύνολα στοιχείων. Στη [KR90] παρουσιάζεται μια πιο λεπτομερή σύγκριση των μεθόδων K- medoid με άλλες μεθόδους κατάτμησης.

Η μέθοδος PAM (Partitioning Around Medoids) αναπτύχθηκε από τους Kaufman και Rousseeuw ([KR90]). Προκειμένου να βρεθούν οι k συστάδες, κατά την προσέγγιση PAM αναζητείται ένα αντιπροσωπευτικό στοιχείο για κάθε συστάδα. Αυτό το αντιπροσωπευτικό στοιχείο, το αποκαλούμενο και ως medoid, προορίζεται να είναι το κεντρικότερα τοποθετημένο αντικείμενο μέσα στη συστάδα. Μόλις επιλεχτούν τα medoids, κάθε μη-επιλεγμένο στοιχείο ομαδοποιείται με το medoid με το οποίο ταιριάζει περισσότερο. Ακριβέστερα, εάν O_j είναι ένα μη-επιλεγμένο στοιχείο και το O_i είναι ένα (επιλεγμένο) medoid, τότε λέμε ότι το O_j ανήκει στη συστάδα που αντιπροσωπεύεται από το O_i, εάν $d(O_j, O_i) = \min_{O_e} d(O_j, O_e)$ όπου $\min_{O_e}$ ορίζεται ως το ελάχιστο μεταξύ όλων των medoids O_e, ενώ ως $d(O_a, O_b)$ ορίζεται η ανομοιότητα ή η απόσταση μεταξύ των στοιχείων O_a και O_b. Όλες οι τιμές ανομοιότητας εισάγονται στον αλγόριθμο PAM. Τέλος, η ποιότητα της κατάτμησης (δηλ. η ποιότητα της ομάδας των επιλεγμένων medoids), μετριέται από τη μέση τιμή απόστασης μεταξύ ενός στοιχείου και του medoid της συστάδας του.

Προκειμένου να βρεθούν τα k σε πλήθος medoids, ο αλγόριθμος PAM αρχίζει με μια τυχαία επιλογή k στοιχείων. Κατόπιν σε κάθε βήμα, πραγματοποιείται μια ανταλλαγή μεταξύ ενός επιλεγμένου στοιχείου O_i και ενός μη-επιλεγμένου O_h, εφ' όσον η παραπάνω ανταλλαγή θα οδηγούσε σε βελτίωση της ποιότητας της κατάτμησης. Ειδικότερα, προκειμένου να υπολογιστεί η

επίδραση μιας τέτοιας ανταλλαγής μεταξύ των O_i και O_h, ο αλγόριθμος PAM υπολογίζει τα κόστη C_{jih} για όλα τα μη-επιλεγμένα στοιχεία O_j. Ανάλογα σε ποια εκ των ακόλουθων περιπτώσεων ανήκει το O_j, το κόστος C_{jih} καθορίζεται από μια από τις ακόλουθες εξισώσεις:

Πρώτη περίπτωση: έστω ότι το στοιχείο O_j ανήκει στη συστάδα, αντιπροσωπευόμενη από το στοιχείο O_i. Επιπλέον, έστω ότι $d(O_j, O_h) \geq d(O_j, O_{j,2})$, όπου $O_{j,2}$ είναι το δεύτερο πιο κοντινό medoid στο O_j. Κατά συνέπεια, εάν το στοιχείο O_i το αντικαθιστούσαμε από το O_h ως medoid, το στοιχείο O_j θα άνηκε στη συστάδα αντιπροσωπευόμενη από το $O_{j,2}$. Ως εκ τούτου, το κόστος της ανταλλαγής όσον αφορά το O_j είναι:

$$C_{jih} = d(O_j, O_{j,2}) - d(O_j, O_i) \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) δίνει πάντα μη αρνητικό κόστος C_{jih}, (μη αρνητικό κόστος προκύπτει κατά την αντικατάσταση του O_i με το O_h).

Δεύτερη περίπτωση: Το στοιχείο O_j ανήκει στη συστάδα που αντιπροσωπεύεται από το στοιχείο O_i. Τη φορά αυτή όμως ισχύει $d(O_j, O_h) < d(O_j, O_{j,2})$. Έτσι, αν το στοιχείο O_i αντικατασταθεί από το O_h, τότε το στοιχείο O_j θα ανήκει στη συστάδα που αντιπροσωπεύεται από το στοιχείο O_h. Κατά συνέπεια, το κόστος για το στοιχείο O_j δίνεται από την εξίσωση (2):

$$C_{jih} = d(O_j, O_h) - d(O_j, O_i) \quad (2)$$

Σε αντίθεση με την εξίσωση (1), το κόστος C_{jih} εδώ μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό, ανάλογα με εάν το στοιχείο O_j είναι πιο κοντά στο O_i ή στο O_h.

Τρίτη περίπτωση: έστω ότι το στοιχείο O_j ανήκει σε μια συστάδα διαφορετική εκείνης που αντιπροσωπεύεται από το στοιχείο O_i. Έστω $O_{j,2}$ το αντιπροσωπευτικό στοιχείο αυτής της συστάδας. Επιπλέον, έστω ότι το στοιχείο O_j βρίσκεται πιο κοντά στο $O_{j,2}$ από ότι στο O_h. Κατόπιν ακόμα κι αν το στοιχείο O_i αντικατασταθεί από το O_h, το O_j θα παρέμενε στη συστάδα, αντιπροσωπευόμενη από το $O_{j,2}$. Κατά συνέπεια, το κόστος δίνεται από την εξίσωση (3):

$$C_{jih} = 0 \quad (3)$$

Τέταρτη περίπτωση: έστω ότι το στοιχείο O_j ανήκει στη συστάδα αντιπροσωπευόμενη από το $O_{j,2}$. Αλλά το στοιχείο O_j έχει μεγαλύτερη απόσταση από το $O_{j,2}$ παρά από το O_h. Κατόπιν, η

αντικατάσταση του στοιχείου O_i από το O_h θα προκαλούσε τη μετάβαση του στοιχείου O_j στη συστάδα του O_h και όχι σε εκείνη του $O_{j,2}$. Κατά συνέπεια, το κόστος δίνεται από την εξίσωση:

$$C_{jih} = d(O_j, O_h) - d(O_j, O_{j,2}) \quad (4)$$

και είναι πάντα αρνητικό. Συνδυάζοντας τις παραπάνω τέσσερις περιπτώσεις, το συνολικό κόστος της αντικατάστασης του O_i με το O_h δίνεται από:

$$TC_{ih} = \sum_j C_{jih} .$$

Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση του αλγορίθμου PAM:

1. Επιλέξτε τυχαία k το πλήθος, αντιπροσωπευτικά στοιχεία.

2. Υπολογίστε το κόστος TC_{ih} για όλα τα ζεύγη στοιχείων O_i, O_h, όπου έχει επιλεγεί το στοιχείο O_i ενώ το στοιχείο O_h δεν είναι επιλεγμένο.

3. Επιλέξτε το ζευγάρι O_i, O_h το οποίο αντιστοιχεί στο $\min_{O_i,O_h} TC_{ih}$. Εάν το ελάχιστο κόστος TC_{ih} είναι αρνητικό, αντικαταστήστε το στοιχείο O_i με το O_h, και επιστρέψτε στο βήμα (2).

4. Διαφορετικά, για κάθε μη-επιλεγμένο στοιχείο, βρείτε το στοιχείο που αντιπροσωπεύει συστάδα και το οποίο απέχει τη μικρότερη απόσταση.

5. Τερματισμός.

Αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αλγόριθμος PAM λειτουργεί ικανοποιητικά για σύνολα στοιχείων με μικρό πλήθος (π.χ. 100 στοιχεία σε 5 συστάδες [KR90]). Δεν είναι όμως, αποτελεσματικό όσον αφορά σύνολα στοιχείων μεσαίου ή μεγάλου πλήθος. Αυτό δεν μας εκπλήσσει εάν εκτελούμε ανάλυση πολυπλοκότητας στον αλγόριθμο PAM. Στα βήματα (2) και (3), υπάρχουν συνολικά $k(n-k)$ ζευγάρια των O_h και O_i. Για κάθε ζευγάρι, ο υπολογισμός του κόστους TC_{ih} απαιτεί την εξέταση των $(n-k)$ το πλήθος μη-επιλεγμένων στοιχείων. Κατά συνέπεια, τα βήματα (2) και (3) σε συνδυασμό δίνουν πολυπλοκότητα της τάξεως των $O(k(n-k)^2)$. Και αυτή είναι η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, για μόνο μια επανάληψη. Κατά συνέπεια, είναι προφανές ότι ο αλγόριθμος PAM έχει αυξημένη πολυπλοκότητα για μεγάλες τιμές των n και k.

Η παραπάνω ανάλυση δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης του αλγορίθμου CLARA.

3.2.4. CLARA

Σχεδιασμένος από τους Kaufman και Rousseeuw προκειμένου να εφαρμοστεί σε σύνολα με μεγάλο πλήθος στοιχείων, ο αλγόριθμος CLARA (Clustering LARge Applications) στηρίζεται στη δειγματοληψία [KR90]. Αντί της εύρεσης των αντιπροσωπευτικών αντικειμένων για ολόκληρο το σύνολο στοιχείων, ο αλγόριθμος CLARA δειγματοληπτεί επί του συνόλου των στοιχείων, εφαρμόζει τον αλγόριθμο PAM στο παραπάνω δείγμα και βρίσκει τα medoids του δείγματος. Εάν η δειγματοληψία γίνει με αρκετά τυχαίο τρόπο, τα medoids του δείγματος θα προσεγγίζουν τα medoids ολόκληρου του συνόλου στοιχείων. Προκειμένου να επιτευχθούν καλύτερες προσεγγίσεις, ο αλγόριθμος CLARA πραγματοποιεί πολλαπλές δειγματοληψίες δίνοντας τη καλύτερη κατάτμηση ως αποτέλεσμα. Τέλος, η ποιότητα μιας κατάτμησης μετριέται βασισμένη στη μέση απόσταση των στοιχείων σε ολόκληρο το σύνολο, και όχι μόνο εκείνων των στοιχείων που βρίσκονται στα δείγματα.

Πειράματα που αναφέρονται στην [KR90] φανερώνουν ότι 5 δείγματα μεγέθους 40 + 2k δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση του αλγορίθμου CLARA:

Για i = 1 έως 5, επαναλάβετε τα ακόλουθα βήματα:

1. Πάρτε ένα δείγμα 40 + 2k στοιχείων, τυχαία από ολόκληρο το σύνολο στοιχείων και χρησιμοποιείστε τον αλγόριθμο PAM για να βρείτε τα k το πλήθος medoids του δείγματος.

2. Για κάθε αντικείμενο O_j σε ολόκληρο το σύνολο στοιχείων, καθορίστε ποιο από τα k το πλήθος medoids έχει τη μικρότερη απόσταση από το O_j.

3. Υπολογίστε τη μέση απόσταση της κατάτμησης που λάβατε στο προηγούμενο βήμα. Εάν η τιμή αυτή είναι μικρότερη από την ελάχιστη τρέχουσα, χρησιμοποιήστε την τιμή αυτή ως την ελάχιστη τρέχουσα και διατηρήστε τα k, το πλήθος medoids, που βρέθηκαν από το βήμα (2) ως καλύτερο σύνολο medoids μέχρι τώρα.

4. Επιστρέψτε στο βήμα (1) για να αρχίσει η επόμενη επανάληψη.

Ο αλγόριθμος CLARA αποδίδει ικανοποιητικά για σύνολα με μεγάλο πλήθος στοιχείων (π.χ. 1000 στοιχεία σε 10 συστάδες). Όπως ήδη αναφέραμε, κάθε επανάληψη του αλγορίθμουPAM είναι $O(k(n-k)^2)$. Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου CLARA, μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμουPAM μόνο στα δείγματα, είναι της τάξεως των $O(k(40+k)^2 + k(n-k))$. Αυτό εξηγεί γιατί ο αλγόριθμος CLARA είναι αποδοτικότερος από τον αλγόριθμο PAM για μεγάλες τιμές του n.

3.2.3.Τεχνικές κατάτμησης χρησιμοποιούμενες στο HMM πρότυπο (μέτρο απόκλισης KL)

Η διαδικασία κατάτμησης δείγματος στοιχείων απαιτεί ένα μέτρο απόκλισης, το οποίο χρησιμοποιείται κατά την ταξινόμηση κάθε δείγματος στοιχείων στην συστάδα που ταιριάζουν. Βέλτιστο μέτρο μέτρησης για την περίπτωση γνωστών πιθανοτήτων παρατήρησης παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Για δοθείσα πολυδιάστατη διαδικασία, οι πιθανότητες είναι $q_1, q_2, ..., q_K$ όπου η q_i ακολουθεί κάποιου είδους κατανομής. Η παρατήρηση αυτής της διαδικασίας είναι $n_1, n_2, ..., n_K$ για κάθε σύμβολο χώρου. Προκειμένου να ταξινομήσουμε τις ακολουθίες παρατήρησης, η παρακάτω πιθανότητα υπολογίζεται:

$$P(n_1, n_2, ..., n_K \mid q_1, q_2, ..., q_K) \tag{6}$$

Η παρατήρηση της παραπάνω διαδικασίας παράγει N το πλήθος δοκιμές Bernoulli, όπου $N = \sum_{i=1}^{K} n_i$ (7)

Το μέτρο πιθανότητας της (6) είναι:

$$P(n_1, n_2, ..., n_K \mid q_1, q_2, ..., q_K) = \frac{N! \prod_{i=1}^{K} q_i^{n_i}}{\prod_{i=1}^{K} n_i!} \tag{8}$$

$$N! \approx \sqrt{2\pi N} \left(\frac{N}{e} \right)^N \tag{9}$$

Υπολογίζοντας το φυσικό αλγόριθμο και των δύο πλευρών της εξίσωσης, χρησιμοποιώντας παράλληλα και την προσέγγιση Stirling's παίρνουμε:

$$\log P(\overline{n} \mid \overline{q}) = N \log(N) - N - \sum_i n_i \log(n_i) + \sum_i n_i + \sum_i n_i \log(q_i) + o(N) \tag{10}$$

Από τις εξισώσεις (2) και (5) θα έχουμε:

$$\log P(\overline{n} \mid \overline{q}) = N \log(N) - \sum_i n_i \log(n_i) + \sum_i n_i \log(q_i) + o(N) \tag{11}$$

Ορίζουμε ένα νέο σύνολο παρατηρήσεων p_i ως:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \tag{12}$$

Εξίσωση (11) μπορεί να επαναδιατυπωθεί ως:

$$-\sum_i n_i \log(\frac{n_i}{N}) + \sum_i n_i \log(q_i) + o(N) = -N\left[\sum_i p_i \log\left(\frac{p_i}{q_i}\right)\right] o(N) \quad (13)$$

Το μέτρο πιθανότητας της (6) μπορεί να επαναδιατυπωθεί ως:

$P(\overline{n} \mid \overline{q}) \approx e^{-ND[p][q]}$ όπου $D[p][q]$ ορίζεται ως:

$$D[p][q] = \sum_{All\ x} p(x) \log\left(\frac{p(x)}{q(x)}\right) \quad (14)$$

Η εξίσωση (14) καλείται μέτρο απόκλισης Kullbak-Lieber (KL) ([K59]). Μπορεί επίσης να βρεθεί και ως "cross entropy" των κατανομών ([ME91]).

Το μέτρο απόκλισης KL μπορεί να θεωρηθεί σαν ποινή της προσπάθειας κωδικοποίησης του p(x) χρησιμοποιώντας το βέλτιστο κώδικα του q(x). Η ποινή αυτή είναι η διαφορά μεταξύ της διαφοράς της κωδικοποίησης p(x), χρησιμοποιώντας την q(x) (μη βέλτιστη) από τη διαφορά της κωδικοποίησης p(x), χρησιμοποιώντας τη σωστή βέλτιστη κωδικοποίηση.

Το μέτρο απόκλισης KL είναι πάντοτε μια μη αρνητική συνάρτηση και παίρνει τη τιμή 0 εάν και μόνο εάν τα δύο μέτρα p και q πιθανότητας είναι ίδια, αλλά δεν είναι απαραιτήτως συμμετρικό, δηλ.

$$D[p][q] \neq D[q][p] \quad (15)$$

Σε περίπτωση που η συνάρτηση μέτρου απόκλισης (divergence measure function) KL είναι συμμετρική, τότε το μέτρο απόκλισης KL ορίζεται από την Ευκλείδεια νόρμα μέτρησης.

3.2.4. Κατάτμηση των ακολουθιών μέτρησης RSS από τα επεξεργαζόμενα στοιχεία (ιδιότητα KL)

Η τεχνική K-Means και λιγότερο η τεχνική CLARA χρησιμοποιήθηκαν για την κατάτμηση των στοιχείων. Η αρχικοποίηση των παραπάνω τεχνικών, π.χ. η επιλογή του πρώτου συνόλου των παραμέτρων του προτύπου, έγινε με τυχαία επιλογή K, το πλήθος διανυσμάτων, από το χώρο των διανυσμάτων. Το σύνολο των παραμέτρων του μοντέλου, θα καλείται ως κεντροειδές του μοντέλου.

Η τεχνική K-means επιχειρεί την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης του συνολικού μέτρου απόκλισης, αλλά δυστυχώς μπορεί να επιτύχει μόνο τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης αυτής. Το γεγονός αυτό καθιστά τον αλγόριθμο εξαρτώμενο σε μεγάλο βαθμό των συνθηκών ελαχιστοποίησης, π.χ. τα κεντροειδή της πρώτης επανάληψης $\lambda_1^{(1)}, \lambda_2^{(1)}, ..., \lambda_K^{(1)}$, τα οποία επιλέγονται στο στάδιο 2 της τεχνικής K-Means. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, η εκτέλεση της τεχνικής επαναλαμβάνεται αρκετές φορές, ξεκινώντας από διαφορετικές αρχικές τιμές κεντροειδών. Ο αριθμός των επαναλήψεων εξαρτάται από τη σύγκλιση της συνάρτησης του μέτρου απόκλισης καθώς και των κεντροειδών που επιτεύχθηκαν. Κατά συνέπεια εάν το ίδια μέτρο απόκλισης και κεντροειδών επιτεύχθηκαν, τότε η τεχνική συνέκλινε. Πρώτα η τεχνική επαναλήφθηκε 9-10 φορές, με συνθήκη τερματισμού:

α. Κάθε επανάληψη παρήγαγε ένα μετρήσιμο αποτέλεσμα (η μέση απόκλιση των ακολουθιών παρατήρησης με τα αντίστοιχα κεντροειδή τους).

β. Τα αποτελέσματα διατάχτηκαν από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη τιμή απόκλισης.

γ. Εάν η μικρότερη τιμή απόκλισης δε υπερέβαινε ένα κατώτατο όριο, η διαδικασία τερματιζόταν. Το κατώτατο χρησιμοποιούμενο όριο ήταν 0.5.

δ. Η τεχνική επαναλήφθηκε 5 ακόμα φορές και όλα τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν αρχίζοντας από το βήμα No.1.

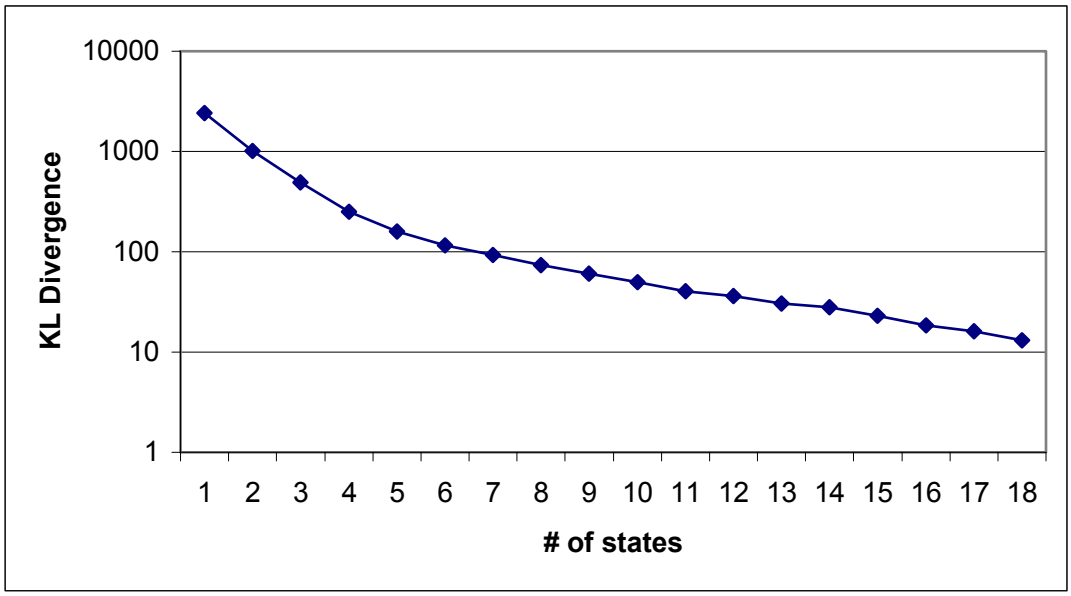
Ο αριθμός συστάδων K, το πλήθος, που χρησιμοποιήθηκαν στη τεχνική είναι καθορισμένος σε όλη τη διάρκεια μιας επανάληψης. Προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός, διάφορες τιμές εξετάστηκαν. Για κάθε μια από αυτές τις τιμές η τεχνική επαναλήφθηκε αρκετές φορές, προκειμένου να επιτευχθεί η σύγκλιση (όπως περιγράφεται ανωτέρω). Ο βέλτιστος αριθμός συστάδων υπολογίστηκε βασιζόμενος στις συναρτήσεις μέτρησης λάθους για τις διαφορετικές εξεταζόμενες τιμές, λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό συστάδων. Όσο ο αριθμός των συστάδων αυξάνεται, το μέτρο απόκλισης μειώνεται, αλλά είναι απαραίτητο να βρεθεί κάποια ισορροπία μεταξύ των δύο. Αυτή η ισορροπία υπολογίστηκε από το ποσοστό μείωσης: όταν ο αριθμός καταστάσεων είναι μικρός αυτή η μείωση είναι συνήθως λογαριθμική, ενώ όταν αυτός ο αριθμός αυξάνεται, αυτό το ποσοστό μείωσης γίνεται σχεδόν γραμμικό. Η ισορροπία ελήφθη στο σημείο όπου παρατηρείται η αλλαγή μεταξύ του λογαριθμικού ποσοστού μείωσης και του γραμμικού ποσοστού μείωσης. Ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4. Στο σχήμα αυτό δύο τμήματα μπορούν να παρατηρηθούν:

α. Αριθμός καταστάσεων από 1 έως 8, όπου η μείωση είναι σχεδόν λογαριθμική.

β. Αριθμός καταστάσεων από 9 έως 15, όπου η μείωση είναι σχεδόν γραμμική.

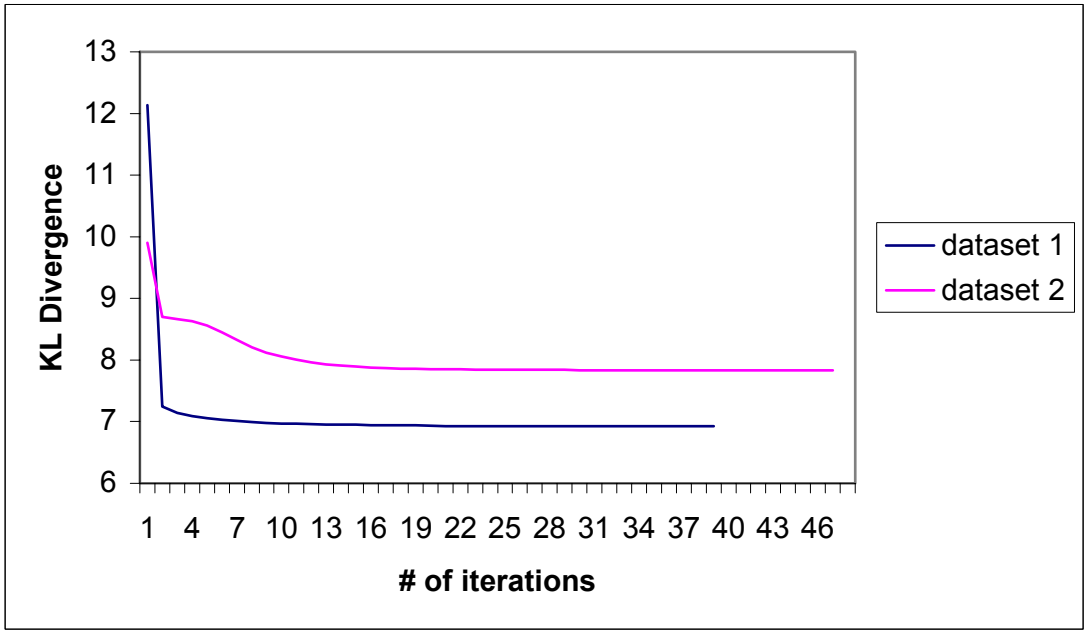
Το πλήθος των καταστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το παράδειγμα ήταν επομένως 8.

Ένα παράδειγμα της εκτέλεσης της τεχνικής κατάτμησης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5. Στο σχήμα αυτό το μέτρο λάθους παρουσιάζεται ως συνάρτηση της επανάληψης της τεχνικής. Η συμπεριφορά που παρουσιάζεται στη γραφική παράσταση είναι χαρακτηριστική αυτού του τύπου της τεχνικής: οι πρώτες επαναλήψεις μειώνουν τη συνάρτηση μέτρου απόκλισης εντυπωσιακά, ενώ οι τελευταίες επαναλήψεις είναι ο “λεπτός συντονισμός”. Αυτό είναι μια ειδική περίπτωση μιας μεθόδου αποκαλούμενης "διανεμητικής κατάτμησης" (distributional clustering), που αναπτύχθηκε πρόσφατα σε μια γενικότερη μορφή ([TP93]).



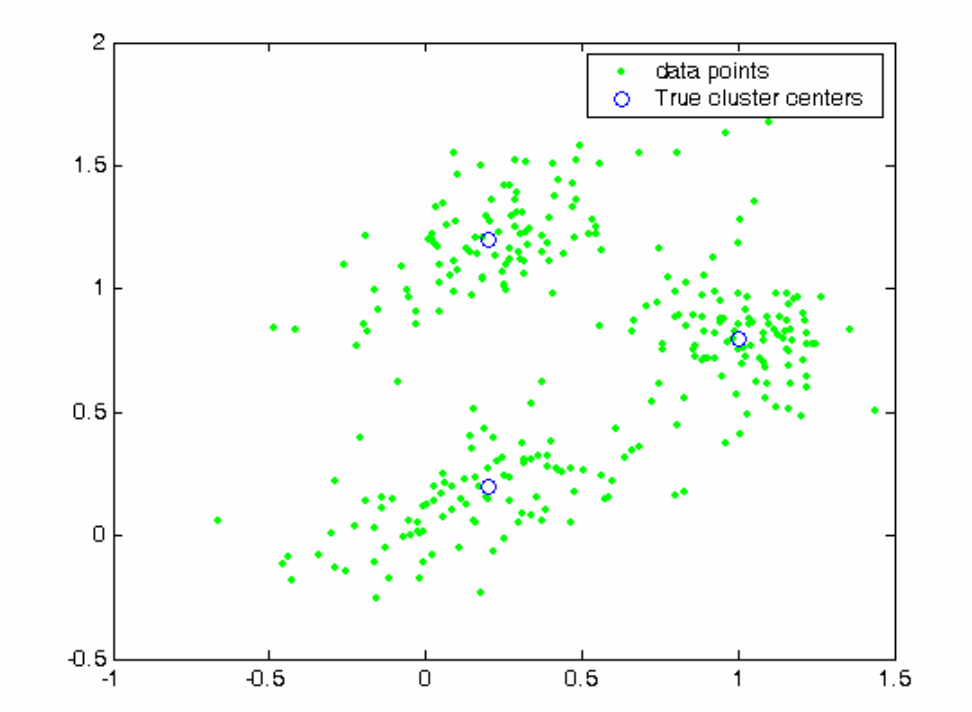
Σχήμα 3.4.

Ένα παράδειγμα εκτέλεσης της τεχνικής K-Means για διαφορετικό αριθμό καταστάσεων σε λογαριθμική κλίμακα, χρησιμοποιώντας το ίδιο σύνολο στοιχείων



Σχήμα 3.5.

Ένα παράδειγμα εκτέλεσης της τεχνικής K-Means για 2 διαφορετικές ακολουθίες στοιχείων



Σχήμα 3.6.

Ένα παράδειγμα μιας τυπικής κατάτμησης σε 3 συστάδες χρησιμοποιώντας την τεχνική K-Means

3.2.5. Διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων Baum-Welch και Segmental K-means (σε σχέση με τις τιμές πιθανότητας)

Τα αποτελέσματα των αλγορίθμων Baum-Welch και Segmental K-Means ήταν σχεδόν όμοια, με τον αλγόριθμο Baum-Welch να αποδίδει σε όλες τις περιπτώσεις λίγο καλύτερα από ότι ο αλγόριθμος Segmental K-Means. Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει τις τυπικές τιμές πιθανότητας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως υπολογίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες μεθόδους:

α. Τεχνική κατάτμησης K-means

β. Αλγόριθμος Segmental K-means

γ. Αλγόριθμος Baum-Welch

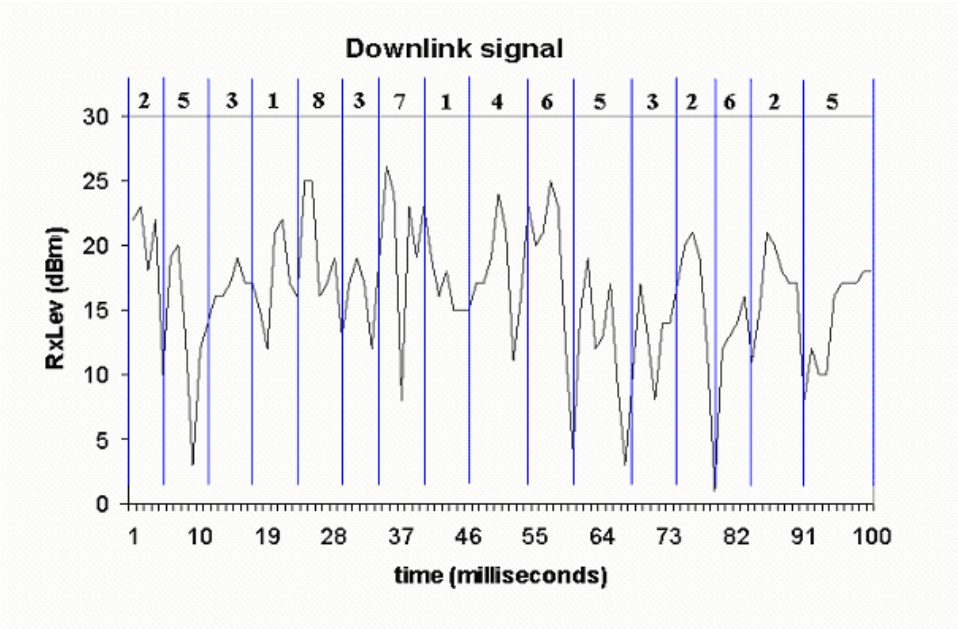
Οι τιμές που παρουσιάζονται είναι οι τιμές πιθανοφάνειας για κάθε δείγμα σήματος (όπως θα δούμε και στη παράγραφο 6.1).

Δείγμα σήματος (ακολουθία παρατηρήσεων)	**K-means**	**Segmental K-Means**	**Baum-Welch**
smp_022_sp04_TA0_W	-6.365679	-6.063802	-6.006602
smp_034_sp14_TA1_W	-5.453621	-5.021945	-4.525091
smp_021_sp05_TA0_E	-6.900001	-6.851161	-6.241454
smp_076_sp08_TA1_E	-4.491988	-4.411560	-4.411562
smp_100_sp21_TA0_E	-6.873265	-6.675425	-6.696273

Πίνακας 3.1.

Οι τιμές πιθανοφάνειας που επιτεύχθηκαν με διαφορετικούς αλγόριθμους

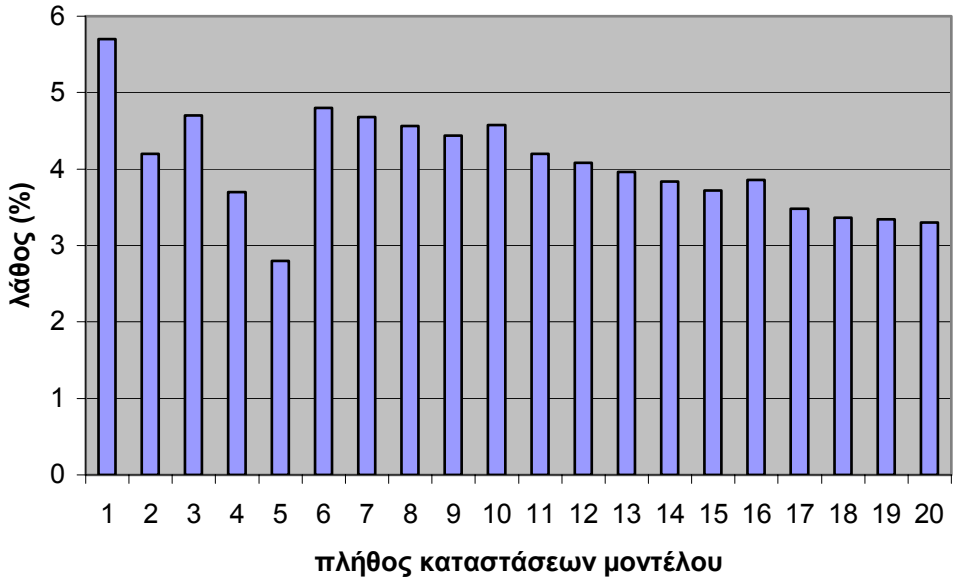
Αυτές οι τιμές πιθανοφάνειας παρουσιάζουν συνεχή συμπεριφορά, δηλ. οι αλλαγές μεταξύ των διαφορετικών υπολογισμών είναι μόνο δευτερεύουσες, συγκρινόμενες με τις συγκεκριμένες τιμές πιθανοφάνειας. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρήθηκε σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο υπολογισμός των αλγορίθμων No.2 και No.3 έγινε με τις ίδιες αρχικές τιμές που επιτεύχθηκαν στη τεχνική No.1.



Σχήμα 3.7.

Ένα παράδειγμα τυπικής κατάτμησης μιας ακολουθίας μετρήσεων RSS σήματος σε 8 συστάδες χρησιμοποιώντας τη τεχνική κατάτμησης K-Means

Τέλος στο σχήμα 3.8. απεικονίζεται το λάθος εκτίμησης (%) κατά τον υπολογισμό της κλάσης ταχύτητας συγκεκριμένης ακολουθίας μετρήσεων ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως για διαφορετικό πλήθος καταστάσεων. Παρατηρείται τοπικό ελάχιστο για N =6, αλλά γενικότερα το ποσοστό του λάθους παρουσιάζεται ανεπηρέαστο από το N ενώ οι λανθασμένες εκτιμήσεις είναι ιδιαίτερα χαμηλές αφού κυμαίνονται από 2.8% έως 5.7%.



Σχήμα 3.8.

Μέσο λάθος εκτίμησης για διαφορετικό πλήθος καταστάσεων

Παραπομπές

[B00] J. C. Bezdek, "*Pattern Recognition With Fuzzy Objective Function Algorithms*", Plenum Press, New York.

[B57] R.E.Bellman, "*Dynamic Programming*", Princeton University Press, 1957.

[B72] L.E. Baum, "*An inequality and associated maximization technique in statistical estimation of probabilistic functions of Markov processes*", Inequalities, vol.3 (1), pp.1-8, 1972.

[BH97] R. Brown, P.Hwang, "*Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*", 3 ed: John Wiley & Sons, 1997.

[BP66] L.E. Baum and T. Petrie, "*Statistical inference for probabilistic functions of finite state Markov chains*", Ann. Math. Stat., vol.37, pp.1554-1563, 1966.

[BP92] J. C. Bezdek, and S.K. Pal, "*Fuzzy Models For Pattern Recognition*", IEEE Press, New York, 1992.

[CLF00] Xiaoguang Chang; Wei Li; Farrell, J., "*A C-means clustering based fuzzy modeling method*", Fuzzy Systems, 2000, FUZZ IEEE 2000. The Ninth IEEE International Conference on , Volume: 2 , 2000, Page(s): 937 -940 vol.2.

[CT91] T.M.Cover and J.A.Thomas, "*Elements of Information Theory*", Wiley, 1991.

[D74] J. Dunn, "*Well Separated Clusters And Optimal Fuzzy Partitions*", Journal of Cybernetics, 4, pp. 95-104, 1974.

[DLR77] A.P. Dempster, N.M. Laird and D.B. Rubin, "*Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm*", J. Roy. Stat. Soc., vol.39 (1), pp.1-38, 1977.

[F73] G.D. Forney, "*The Viterbi algorithm*", In Proceedings of the IEEE, vol.61, pp.268-278, 1973.

[HK01] J. Han and M. Kamber, "*Data Mining: Concepts And Techniques*", San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

[JMF99] A. K. Jain and M. N. Murty and P. J. Flynn, "*Data Clustering: A Review*", ACM Computing Surveys, Vol. 31, No. 3, September 1999.

[JR90] B.H. Juang and L.R. Rabiner, "*The segmental k-means algorithm for estimating parameters of hidden markov models*", IEEE trans. on signal processing, ASSP vo.38 (9), pp.1639-1641, 1990.

[K00] T. Kohonen. "*Self-Organizing Maps*", Springer, New York, 3rd edition, 2000.

[K59] S.Kullback, "*Information theory and statistics*", Wiley & Sons, New York, 1959.

[KBC88] Kohonen, T., Barna, G., and Chrisley, R., "*Statistical pattern recognition with neural networks: Benchmarking studies*", In Proceedings of the International Conference on Neural Networks (ICNN), volume I, pages 61-68, Los Alamitos, CA. IEEE Computer Soc. Press, 1988.

[KR87] L. Kaufman and P.J. Rousueeuw, "*Clustering by means of medoids, Statistical Data Analysis based on the L1 Norm*", pp. 405-416. Elsevier/North Holland, Amsterdam, 1987.

[KR90] L. Kaufman and P.J. Rousueeuw, "*Finding Groups in Data: an Introduction to Cluster Analysis*", John Wiley & Sons, 1990.

[LRS83] S.E. Levinson, L.R. Rabiner and M.M. Sondhi, "*An introduction to the application of the theory of probabilistic functions of a Markov process to automatic speech recognition*", Bell Syst. Tech., vol.62 (4), pp.1035-1074, 1983.

[NH02] Trond Nypan, Oddvar Hallingstad, "*Cellular Positioning by Database Comparison and Hidden Markov Models*", 277-284, Personal Wireless Communications (PWC'2002), October 23-25, 2002, Singapore, IFIP Conference Proceedings, Kluwer, 2002.

[R89] L. Rabiner, "*A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition*", Proceedings of the IEEE, vol. 77, pp. 257–286, Feb. 1989.

[R93] L. Rabiner, B. Juang, "*Fundamentals of speech recognition*", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.

[RWJ86] L.R. Rabiner, J.P. Wilson and B.H. Juang, "*A segmental k-means training procedure for connected word recognition*", AT&T Tech, pp. 21-40, 1986.

[SM90] H.F.Silverman and D.P.Morgan, "*The application of dynamic programming to connected speech recognition*", IEEE ASSP Magazine, volume 7, pp.6-25, 1990.

[V67] A.J. Viterbi, "*Error bounds for convolutional codes asymptotically optimal decoding algorithm*", IEEE trans. Information Theory, IT vol.13, pp.260-269, 1967.

[W83] C.F.J. Wu, "*On the convergence properties of the EM algorithm*", Ann. Stat., vol.11 (1), pp.95-103, 1983.

[HY01] Ming-Chuan Hung; Don-Lin Yang, "*An efficient Fuzzy C-Means clustering algorithm, Data Mining, 2001*", ICDM 2001, Proceedings IEEE International Conference on , 2001, Page(s): 225 -232

[ME91] N.Merhav and Y.Ephraim, "*Hidden Markov Modeling using the most likely state sequence*", In Proc. ICASSP-91, volume 1, pages 469-472, 1991.

[TP93] N. Tishby and F. Pereira, "*Distribution Clustering*", Hebrew University Pre-print, 1993.

[S85] H. Spath. (1985) "*Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN programs, Examples*", Ellis Horwood Ltd.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

4.0. Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό ξεκινά περιγράφοντας τη μελέτη για τη βέλτιστη ρύθμιση των παραμέτρων του δικτύου κινητής τηλεφωνίας για την όσο το δυνατόν αποδοτικότερη συλλογή πληροφοριών, σχετικά με τα υπό εξέταση ΚΤ. Στη συνέχεια παρουσιάζονται έρευνες, οι οποίες συσχετίζουν τον όγκο κίνησης οδικού δικτύου με την κατανομή κλήσεων σε ΚΤ. Ακολούθως, βρίσκουμε το πλήθος των μετρήσεων που απαιτούνται για το χαρακτηρισμό οδικού δικτύου, ενώ από την κατανομή των ΚΤ σε οδικό δίκτυο χαρακτηρίζουμε το δείγμα οχημάτων. Κατά τη μοντελοποίηση της κίνησης σε οδικό δίκτυο διακρίνουμε δύο περιπτώσεις: α) στη μελέτη κίνησης ερευνητικού οχήματος και β) στη μελέτη κίνησης οχημάτων οδικού δικτύου και τις αναλύουμε. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παράθεση ποσοτικών τεχνικών, για την εξαγωγή των γραφικών παραστάσεων κατά τη δεύτερη περίπτωση κίνησης.

4.1. Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους του μοντέλου σύμφωνα με τον πάροχο κινητής τηλεφωνίας

Στα πλαίσια προσφοράς της προτεινόμενης υπηρεσίας στον πάροχο κινητής τηλεφωνίας, πρέπει να εξετάσουμε πώς μπορούμε να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του δικτύου προκειμένου να συμβάλλουν εποικοδομητικά στην προσπάθεια συλλογής πληροφοριών, που αφορά τα οχήματα που κινούνται στον υπό εξέταση δρόμο. Μια τέτοια παράμετρος είναι η διαδικασία αποκαλούμενη PLU (Periodic Location Update). Η τροποποίηση της παραμέτρου PLU θα μας επέτρεπε την παρακολούθηση των ΚΤ, ευρισκόμενη σε κατάσταση “μη ενεργούς” σύνδεσης. Για ΚΤ που είναι σε κατάσταση “ενεργούς” σύνδεσης, το πρόβλημα είναι διαφορετικό, επειδή το ΚΤ εκπέμπει πληροφορία θέσης κατά τη διάρκεια της κλήσης.

Η διαδικασία του LU συμβαίνει είτε με το συνήθη τρόπο, όπου το ΚΤ φθάνει σε μια νέα τοποθεσία οπότε και πρέπει να πληροφορήσει το δίκτυο, είτε με έμμεσο τρόπο όπου και χρησιμοποιείται μια διαδικασία αποκαλούμενη Periodic Location Update (PLU).

Για λόγους αξιοπιστίας, το δίκτυο GSM έχει μια περιοδική διαδικασία ενημέρωσης θέσης. Προκειμένου να μη προκληθεί υπερφόρτωση της βάσης δεδομένων κατά την ενημέρωσή της, κάθε φορά που προκύπτουν νέα PLU, ρυθμίζουμε το χρονικό διάστημα μεταξύ των περιοδικών ενημερώσεων, τα οποία ελέγχονται από τον πάροχο. Κατά αυτό το τρόπο θα μπορούσαμε να έχουμε

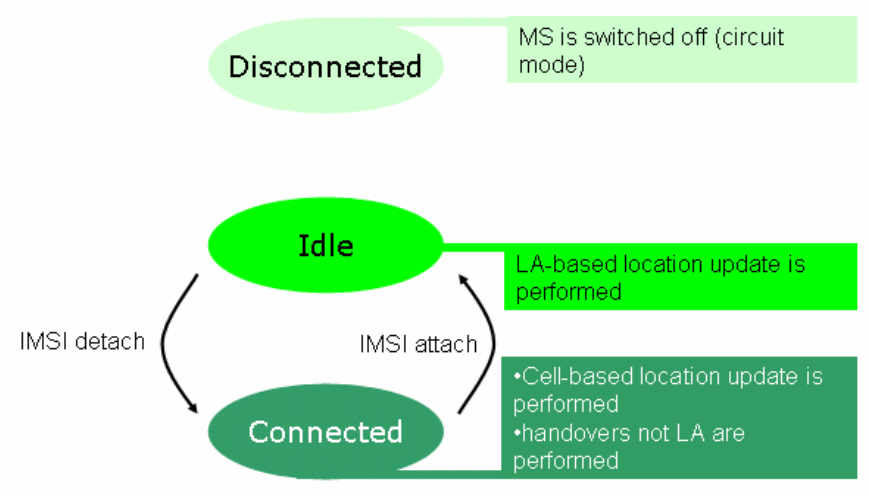
μια εξισορρόπηση μεταξύ του κυκλοφοριακού φόρτου σήματος και της ταχύτητας ανάκτησης πληροφορίας θέσεως.

Πολύ σημαντικός είναι ο προσδιορισμός του μεγέθους των περιοχών LA/RA. Σε περίπτωση που επιλεγεί μεγάλο μέγεθος περιοχών LA/RA τότε τα LU δεν είναι αναγκαία να γίνονται συχνά αλλά έχουμε πολύ υψηλό φόρτο δικτύου λόγω paging, οπότε και επηρεάζεται άμεσα η χωρητικότητα του συστήματος. Στην περίπτωση που επιλεγεί μικρό μέγεθος περιοχών LA/RA τότε έχουμε μικρό φόρτο δικτύου λόγω paging, αλλά τα LU πρέπει να γίνονται πολύ συχνά, οπότε και επηρεάζεται άμεσα το φορτίο δικτύου λόγω αυξημένης σηματοδοσίας.

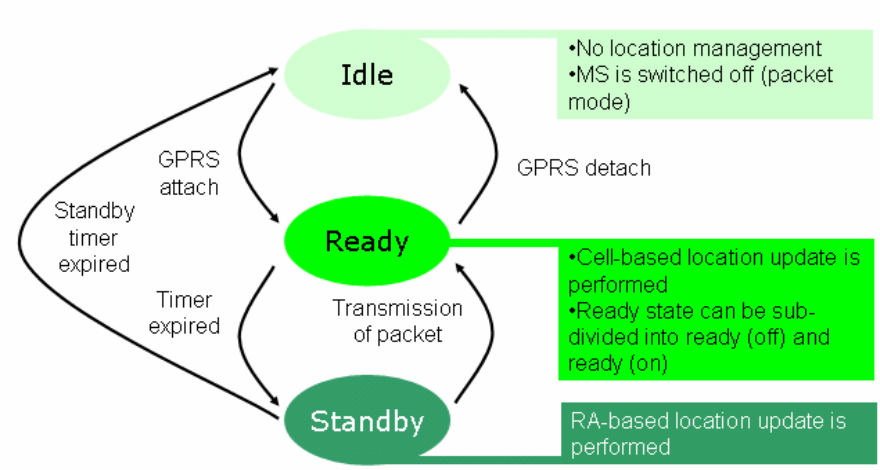
Η μείωση της παραμέτρου PLU στην περιοχή που καλύπτει την εξεταζόμενη διαδρομή, έχοντας περιοδικά πληροφορίες θέσης από τους χρήστες της συγκεκριμένης διαδρομής, θα βελτίωνε την απόδοση της λύσης μας. Κανονικά η τιμή της PLU ποικίλλει από 6 λεπτά έως 3 ώρες. Αυτό που είναι κρίσιμο, είναι η επίδραση που έχει η τροποποίηση της παραμέτρου PLU σε σχέση με το φόρτο σηματοδοσίας και ειδικότερα της υψηλής αύξησης στο κανάλι SDCCH.

Μπορούμε εύλογα να υποθέσουμε ότι κάθε συνδρομητής που κάνει περισσότερο από 4 PLU παραμένει για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα κάτω από την ίδια κυψέλη, ενώ δεν οδηγεί στον αυτοκινητόδρομο. Εντούτοις, δεν είναι σίγουρο ότι όλοι οι συνδρομητές που κάνουν λιγότερο από 4 PLU είναι στον αυτοκινητόδρομο. Κατά συνέπεια, μελετήθηκε η συμπεριφορά διάφορων συνδρομητών που κάνουν 1 PLU.

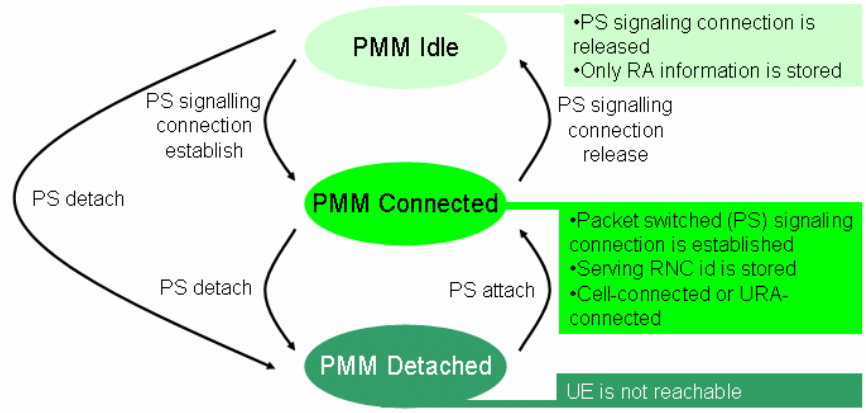
Η τροποποίηση της παραμέτρου PLU αναγκάζει το MT να πραγματοποιήσει ένα PLU κατά την εισαγωγή στη κυψέλη, της οποίας η τιμή της PLU είναι χαμηλή, και ένα PLU κατά την εισαγωγή στη γειτονική κυψέλη, της οποίας η τιμή της PLU είναι κανονικά υψηλή. Με αυτό τον τρόπο, εφαρμόζοντας ένα χρονικό μηχανισμό PLU με τιμή πολύ χαμηλότερη από τη συνήθη τιμή PLU στο δίκτυο, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια "πύλη", υποχρεώνοντας κάθε MT να πραγματοποιήσει δύο PLU. Αυτό θα μας επέτρεπε να τοποθετήσουμε πύλες στη διαδρομή σε περίπτωση που η δημιουργούμενη κίνηση από τα KT δεν είναι ικανοποιητική. Αφετέρου, αυτή η διαδικασία πρέπει να ρυθμιστεί προσεκτικά επειδή αυξάνει αρκετά την κίνηση σηματοδοσίας στο δίκτυο. Μια λανθασμένη ρύθμιση θα μπορούσε να έχει μια δραματική επίδραση στη λειτουργία του δικτύου. Εάν ένα KT δεν καταχωρηθεί μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ενημέρωσης, διαγράφεται. Υιοθετώντας τη λύση των “πυλών” πρέπει να λάβουμε υπόψη και τα διαφορετικά σενάρια “διαχείρισης κίνησης” σε δίκτυα GSM, GPRS και UMTS, όπως αυτά φαίνονται στα σχήματα 4.0.α., 4.0.β, 4.0.γ, 4.0.δ..



Σχήμα 4.0.α. Διαχείριση κινητικότητας σε δίκτυο GSM



Σχήμα 4.0.β. Διαχείριση κινητικότητας σε δίκτυο GPRS

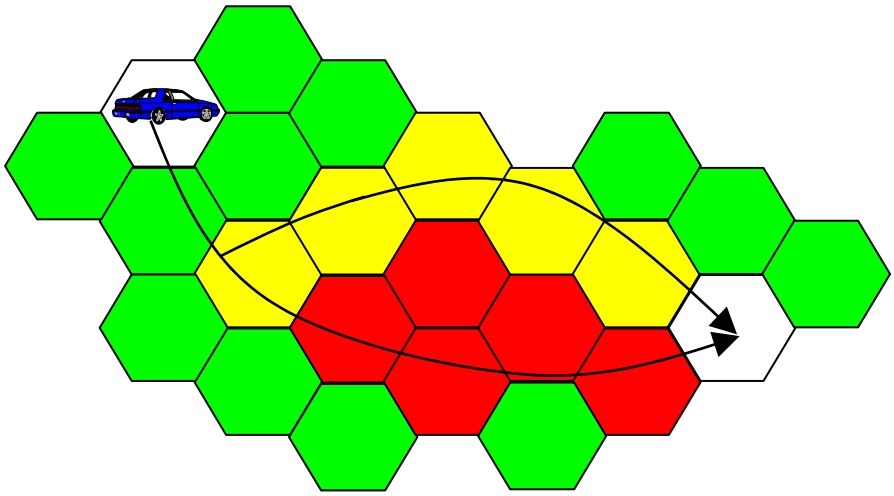


Σχήμα 4.0.γ. Διαχείριση κινητικότητας σε δίκτυο UMTS

	MSC/VLR			SGSN		UTRAN
	GSM	GPRS	UMTS	GPRS	UMTS	UMTS
Cell	Connected			Ready		PMM Connected
URA	–	–		–		PMM Connected
RA	–			Standby	PMM Idle	
LA	Idle	Idle	PMM Idle			

Σχήμα 4.0.δ. Δυνατότητα κάλυψης διαφορετικών ειδών περιοχών (cell, URA, RA, LA) ανάλογα με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας

Η χρήση των "πυλών" σε ευρεία κλίμακα, καλύπτει και ΚΤ, τα οποία βρίσκονται σε κατάσταση ανενεργούς σύνδεσης. Δίνεται με αυτό το τρόπο στον πάροχο κινητής τηλεφωνίας, η δυνατότητα να δημιουργήσει χάρτη κυκλοφοριακής συμφόρησης, οδικού δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, η παροχή ΥΠΘ γίνεται πλέον εφικτή (βλέπε σχήμα 4.0.ε.).

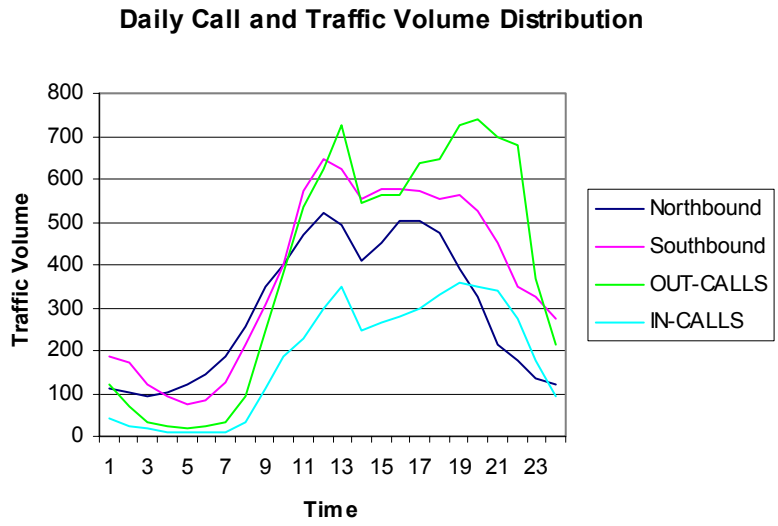


Σχήμα 4.0.ε. Κυκλοφοριακή κίνηση ανά κυψέλη

4.2. Έρευνα που έχει διεξαχθεί μέχρι σήμερα

4.2.1. Κατανομή καθημερινών κλήσεων και όγκου κίνησης οδικού δικτύου

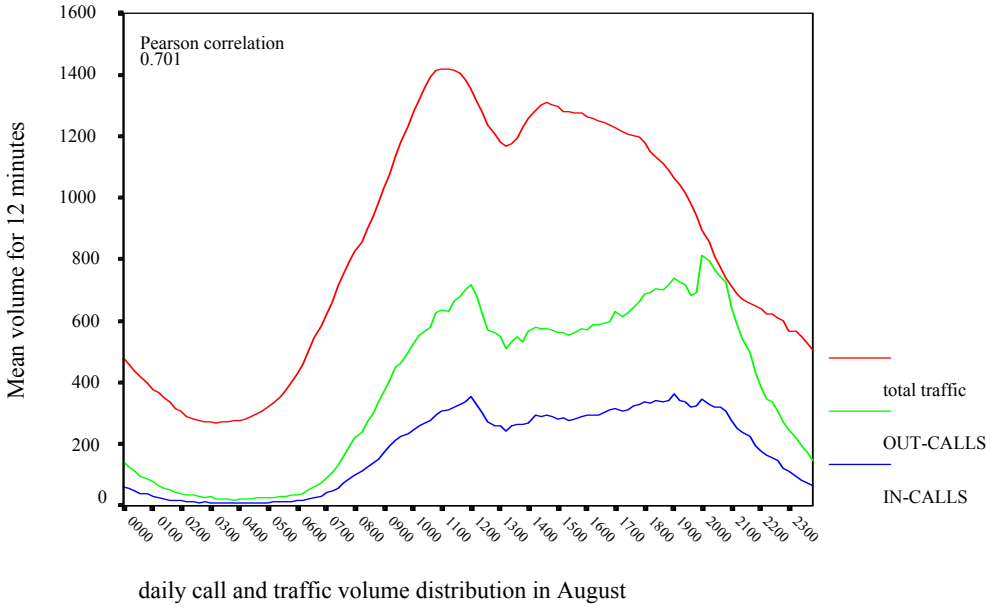
Η έρευνα που έχει διεξαχθεί μέχρι σήμερα σχετικά με την κατανομή των καθημερινών κλήσεων καθώς και του όγκου κίνησης οδικού δικτύου ([I02]), φανερώνει την ύπαρξη μιας άμεσης σχέσης μεταξύ των δύο τύπων κατανομών. Στο σχήμα 4.1, η κατανομή του μέσου αριθμού κλήσεων ανά χρονικά διαστήματα 12 λεπτών, κατά τη διάρκεια 60 ημερών είναι παρόμοια με την κατανομή των αυτοκινήτων για τις ίδιες χρονικές περιόδους.



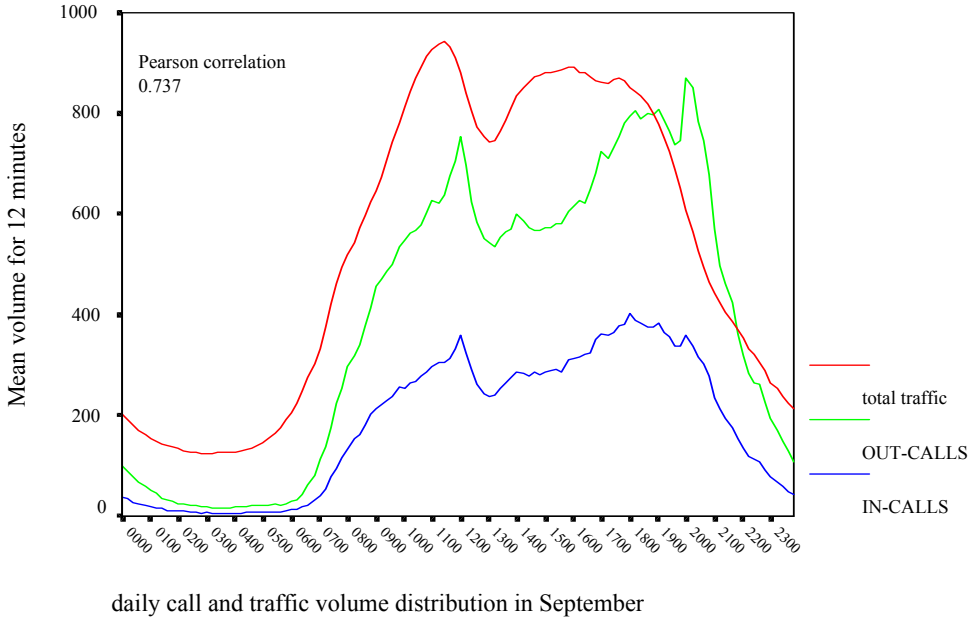
Σχήμα 4.1. Κατανομή καθημερινών κλήσεων και όγκου κίνησης οδικού δικτύου

Ο απόλυτος αριθμός τηλεφωνημάτων έχει πολλαπλασιαστεί με 10, προκειμένου να επιτρέψει σαφείς συγκρίσεις των γραφικών παραστάσεων. Η διαφορά των κατανομών παίρνει την υψηλότερη τιμή της, στις 4:00 μ.μ. και 20:00 μ.μ. όταν συνεχίζει να αυξάνει ο αριθμός των κλήσεων, ενώ ο αριθμός των οχημάτων μειώνεται.

Μερικά ακόμα αποτελέσματα της έρευνας [I02] που διεξήχθη κατά την ανάλυση στοιχείων μεταξύ του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και των φορτίων του οδικού δικτύου, παρουσιάζει ομοιότητες που δεν παρουσιάζουν μεγάλες αλλαγές κατά την εξέταση της περιόδου της μελέτης. Η έρευνα που διεξήχθη τον Αύγουστο και τον Σεπτέμβριο (σχήματα 4.2 και 4.3 αντίστοιχα) δείχνει ότι κατά τη διάρκεια του Αυγούστου ο όγκος κίνησης οδικού δικτύου είναι σχεδόν δύο φορές υψηλότερος από τον πλήθος των κλήσεων, αλλά ο συσχετισμός μεταξύ του δύο συνόλων στοιχείων είναι παρόμοιος (ο συντελεστής Pearson είναι της ίδιας διακύμανσης τιμών, ~ 0.7, SIG. 0.000).



Σχήμα 4.2. Κατανομή καθημερινών κλήσεων και όγκου κίνησης οδικού δικτύου τον μήνα Αύγουστο



Σχήμα 4.3. Κατανομή καθημερινών κλήσεων και όγκου κίνησης οδικού δικτύου τον μήνα Σεπτέμβρη

Τα στοιχεία που αντιστοιχούν στο μήνα Σεπτέμβριο αποδεικνύονται περισσότερο αντιπροσωπευτικά της μέσης κίνησης οδικού δικτύου κατά μήκος της εξεταζόμενης οδού.

4.2.2. Ανίχνευση περιστατικών και πλήθος κλήσεων

Έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει άμεση σύνδεση μεταξύ της ύπαρξης περιστατικού και της σημαντικής αύξησης του πλήθους των κλήσεων. Ένα περιστατικό θα μπορούσε να είναι ένα κοινωνικό γεγονός ή ένα φυσικό φαινόμενο, όπως ένας σεισμός. Κατά τη διάρκεια της ώρας που ακολούθησε το μεγάλο σεισμό στην Αθήνα στις 6 Σεπτεμβρίου του 2001, το πλήθος των κλήσεων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έφτασε περίπου 10 φορές περισσότερο από το σύνηθες πλήθος κλήσεων.

Κατά συνέπεια ο όγκος κλήσεων από συνδρομητές που μετακινούνται κατά μήκος κυρίων οδικών αρτηριών μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να ανιχνευθούν κυκλοφοριακά συμβάντα. Μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε ότι οι παραπάνω συνδρομητές, πραγματοποιούν ένα σημαντικά μεγαλύτερο πλήθος κλήσεων σε περίπτωση που κολλήσουν στη κυκλοφορία, λόγω κάποιου κυκλοφοριακού συμβάντος. Στο σχήμα 4.4 έχουμε την απεικόνιση μιας τέτοιας περιπτώσεως βασισμένης σε προηγούμενη έρευνα που διεξήχθη ([I02]).

Στο προαναφερθέν σχήμα φαίνονται καθαρά οι σχέσεις μεταξύ του μέσου αριθμού κλήσεων κινητής τηλεφωνίας (εισερχόμενες καθώς και εξερχόμενες κλήσεις) και του επιπέδου κυκλοφοριακών συμβάντων στην εξεταζόμενη διαδρομή. Ένα συμβάν το οποίο προκαλεί σημαντική καθυστέρηση σε έναν αυτοκινητόδρομο μπορεί να είναι τόσο απλό, όσο και ένα εκτός λειτουργίας όχημα σε μια λωρίδα του αυτοκινητοδρόμου. Μπορεί επίσης να είναι ένα κομμάτι ξυλείας το οποίο έπεσε από ένα φορτηγό, αναγκάζοντας τους αυτοκινητιστές να αλλάξουν άμεσα λωρίδα κυκλοφορίας. Τέτοια δευτερεύοντα γεγονότα, εάν ανιχνευτούν αμέσως, μπορούν να ξεπεραστούν γρήγορα, με μικρή επίπτωση στην κυκλοφορία των οχημάτων.

Κύρια οδικά συμβάντα από την άλλη, γενικά περιλαμβάνουν:

- Συντριβές μηχανοκίνητων οχημάτων που περιλαμβάνουν το σοβαρό προσωπικό τραυματισμό
- Μηχανοκίνητα οχήματα σε πυρκαγιά
- Πρόκληση συντριβής σε περίπτωση ανατροπής φορτίου
- Συντριβές οχημάτων που μεταφέρουν επικίνδυνο φορτίο
- Μοιραίες συντριβές
- Αναποδογυρισμένα αυτοκίνητα ή φορτηγά
- Πεσμένα ηλεκτροφόρα καλώδια κατά μήκος του οδοστρώματος
- Δομικές αστοχίες γεφυρών ή δρόμων

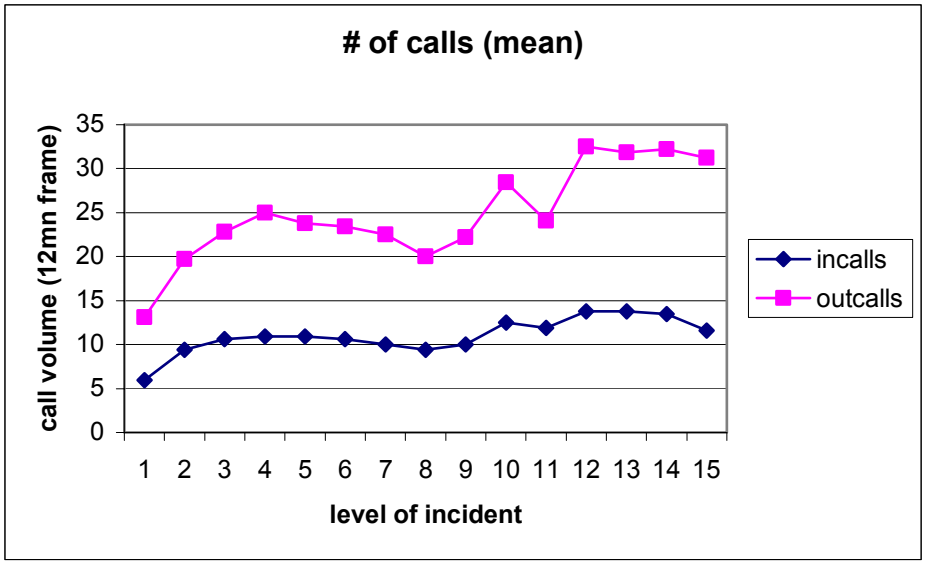
Τέτοια γεγονότα έχουν σαν αποτέλεσμα καθυστέρηση, δυσχέρεια, σπατάλη σε καύσιμα, απογοήτευση, και υψηλότερες δαπάνες για τους αυτοκινητιστές. Η σταματημένη κυκλοφορία μπορεί να προκαλέσει δευτερεύουσες συντριβές οχημάτων. Οι τοπικές οδοί μποτιλιάρονται σε περίπτωση που οι ήδη εγκλωβισμένοι οδηγοί προσπαθούν να αποφύγουν τη κίνηση.

Εξετάζοντας οδική αρτηρία με 14 διασταυρώσεις, ορίζουμε το επίπεδο γεγονότος ως ένα δείκτη που αθροίζει την κατάσταση των γεγονότων και ο οποίος μεταβάλλεται μεταξύ του επιπέδου 0, όπου δεν υπάρχει κανένα γεγονός (συμφόρηση, ατύχημα, και άλλα) και του επιπέδου 14 όπου και στις 14 διασταυρώσεις έχει καταγραφεί ένα γεγονός κατά τη διάρκεια χρονικής περιόδου 12 λεπτών.

Ως όγκος κλήσεων ορίζεται ο μέσος αριθμός κλήσεων (οι λαμβανόμενες καθώς και οι πραγματοποιούμενες κλήσεις) κατά τη διάρκεια χρονικής περιόδου 12 λεπτών, που αντιστοιχεί σε δεδομένο επίπεδο γεγονότος στον αυτοκινητόδρομο. Καταγράφηκε το πλήθος κλήσεων σε όλες τις κυψέλες, κατά μήκος της εξεταζόμενης οδού, αντιπροσωπεύοντας ένα αθροιστικό δείκτη κατάληψης του δικτύου κινητής τηλεφωνίας (μέσο πλήθος κλήσεων ανά κυψέλη κατά τη διάρκεια χρονικής περιόδου 12 λεπτών).

Τα αποτελέσματα δείχνουν έναν υψηλό συντελεστή συσχετισμού (0,263, pr = 0.001) μεταξύ του επιπέδου γεγονότος και του πλήθους των κλήσεων που πραγματοποιούνται μέσα από τα οχήματα. Αυτός ο συσχετισμός δεν είναι υψηλός για τις εισερχόμενες κλήσεις.

Ολοκληρώνοντας θα μπορούσαμε να πούμε ότι η διακύμανση των εξερχομένων κλήσεων είναι ένας καλός δείκτης του επιπέδου γεγονότος στην εξεταζόμενη διαδρομή. Οι συνδρομητές τείνουν να καλούν συχνότερα όταν ο δρόμος είναι μποτιλιαρισμένος. Αυτή η σχέση μπορεί να μετρηθεί. Όπως θα αναφέρουμε αργότερα, θα ήταν πολύ χρήσιμο, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν πλήρως αυτές οι πληροφορίες, να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε σε ποια κατεύθυνση εμφανίστηκε το γεγονός αυτό. Με άλλα λόγια, μέτρηση του πλήθους κλήσεων κινητής τηλεφωνίας για κάθε κατεύθυνση της εξεταζόμενης διαδρομής. Αυτό θα μπορούσε να ανοίξει νέους ερευνητικούς δρόμους κατά τη συσχέτιση της χρήσης κινητής τηλεφωνίας και των μετρήσεων κυκλοφοριακής κίνησης.



Σχήμα 4.4. Πλήθος κλήσεων σε σχέση με το επίπεδο γεγονότος

4.3. Πλήθος μετρήσεων που απαιτούνται για το χαρακτηρισμό οδικού δικτύου

Το παρακάτω μοντέλο εξετάζει το γενικότερο πρόβλημα της εκτίμησης του πλήθους των μετρήσεων χρονικών διαστημάτων που απαιτούνται προκειμένου να χαρακτηριστεί ένα οδικό δίκτυο. Σε περίπτωση που πραγματοποιούνται λίγες μετρήσεις, τότε μόνο ένα μικρό μέρος του αυτοκινητόδρομου θα μπορεί να χαρακτηριστεί ως προς τις συνθήκες κίνησής του (ελεύθερη ροή / χαμηλή ροή κίνησης). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μη βελτιώνεται κατά πολύ η γενική πληροφόρηση πέρα από τους ιστορικά χρονικούς μέσους όρους ταξιδιού. Υποθέτουμε τη χειρότερη περίπτωση, όπου τα ερευνητικά οχήματα επιλέχτηκαν τυχαία. Το μοντέλο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της κάλυψης, δηλ. τμήματα του αυτοκινητοδρόμου για τα οποία έχουν γίνει μετρήσεις πυκνότητας κίνησης. Το αποτέλεσμα ήταν μια εκπληκτικά απλή προσέγγιση:

$$E = 1 - \exp(\alpha \rho L) \qquad (1)$$

Όπου α = μέρος των οχημάτων που δειγματολήφθησαν,

ρ = κυκλοφοριακή κίνηση ανά μονάδα μήκους,

L = μέσο μήκος τμήματος αυτοκινητοδρόμου,

E = κάλυψη.

Η μαθηματική απόδειξη της εξίσωσης (1) δίνεται στο παράρτημα Α. Βάση της παραπάνω εξισώσεως συμπεραίνουμε ότι για να βελτιώσουμε την κάλυψη πρέπει να αυξήσουμε το πλήθος των δειγματοληφθέντων οχημάτων ή να αυξήσουμε το μέσο μήκος τμήματος αυτοκινητοδρόμου. Το τελευταίο προκύπτει επειδή όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος των τμημάτων αυτοκινητοδρόμου, τόσο πιθανότερο είναι να επιλεγεί τυχαία ένα όχημα, το οποίο θα βρίσκεται σε εκείνο το τμήμα του αυτοκινητοδρόμου. Όσο μεγαλύτερη είναι η κυκλοφοριακή πυκνότητα οχημάτων, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η κάλυψη, καθώς ο συνολικός αριθμός δειγματοληφθέντων οχημάτων γίνεται μεγαλύτερος. Η εκθετική φύση της παραπάνω εξισώσεως δείχνει γιατί μπορεί μια σημαντική αύξηση του α να αυξήσει την κάλυψη, αφού σε περίπτωση που το γινόμενο αρL γίνει μεγαλύτερο από τη μονάδα, η κάλυψη πλησιάζει πιο γρήγορα το 100%. Βέβαια προσοχή απαιτείται κατά την ερμηνεία της παραπάνω εξισώσεως. Παραδείγματος χάριν, αν και τα πιο μεγάλα τμήματα αυτοκινητοδρόμου θεωρητικά μεταφράζονται σε αυξανόμενη κάλυψη, εάν τα τμήματα αυτά είναι πάρα πολύ μεγάλα τότε δεν παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη χρονική διάρκεια ταξιδιού σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Στα πλαίσια της υλοποίησής μας, οι παράμετροι ρυθμίστηκαν με τις ακόλουθες τιμές:

α = 0.05,

$\rho = 60\ km^{-1}$ (μέση τιμή πυκνότητας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης),

$L = 1.1\ km$ (ζώνη TA-0),

όπου είχαμε και αποτελέσματα κάλυψης της τάξεως του $E = 0.963117$ ή 96.31%.

4.4. Χαρακτηρίζοντας το δείγμα των υπαρχόντων οχημάτων

Ένα όχημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ερευνητικό, εάν το ΚΤ το οποίο βρίσκεται μέσα στο ερευνητικό όχημα, βρίσκεται σε ορισμένη κατάσταση. Στα GSM δίκτυα, τα ΚΤ μπορεί να βρεθούν σε δύο καταστάσεις, ενεργής και ανενεργής σύνδεσης. Σε κατάσταση ανενεργής σύνδεσης, το ΚΤ δεν επικοινωνεί με το δίκτυο, αλλά καταγράφει τις πληροφορίες που μεταδίδονται από το σύστημα μέσω των κοινών ραδιοδιαύλων.

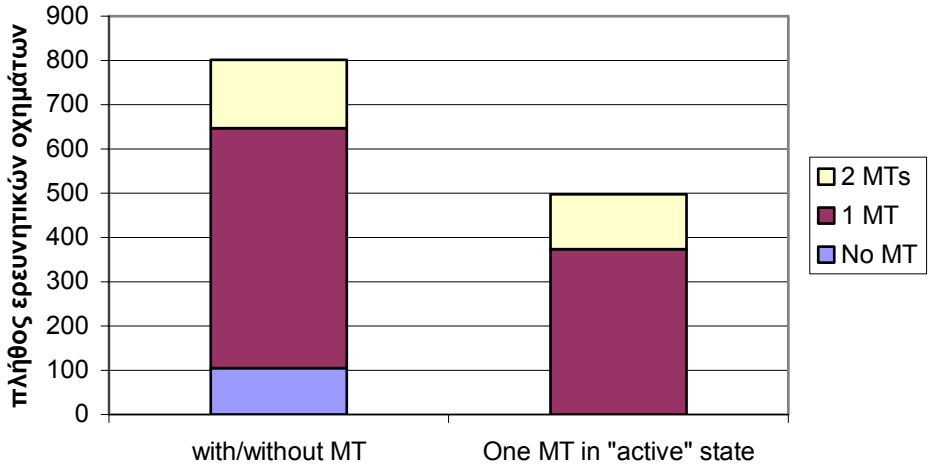
Σε κατάσταση ενεργής σύνδεσης, το ΚΤ είναι σε επικοινωνία με το δίκτυο και ένα μεγάλο πλήθος πληροφοριών ανταλλάσσεται μεταξύ του ΚΤ και του συστήματος. Προκειμένου οι εξαγόμενες μετρήσεις (από του δίκτυο κινητής τηλεφωνίας) να αποτελέσουν μια χρήσιμη αναφορά, θα πρέπει να αποδείξουμε ότι η ύπαρξη του συγκεκριμένου πλήθους ερευνητικών οχημάτων είναι αρκετή για να στηρίξει την εκτίμηση κυκλοφοριακής κίνησης.

	πλήθος ερευνητικών οχημάτων	**%**	**Ένα ΚΤ σε κατάσταση ενεργής σύνδεσης**
Χωρίς συσκευή	105	13.11%	-
1 συσκευή	542	67.67%	373
2 συσκευή	154	19.23%	125
Σύνολο	801		

Πίνακας 4.1. Κατανομή ΚΤ ευρισκόμενα μέσα σε ερευνητικά οχήματα

4.4.1. Κατανομή συσκευών μεταξύ του πληθυσμού των οδηγών

Προκειμένου να εκτιμηθεί το ποσοστό των ΚΤ σε ερευνητικά οχήματα, πραγματοποιήσαμε μια έρευνα. Η έρευνα διενεργήθηκε σε μία από τις κεντρικές οδικές αρτηρίες της πόλης των Αθηνών, στην οδό Αλεξάνδρας, στις 20, 21 και 22 Οκτωβρίου 2004.



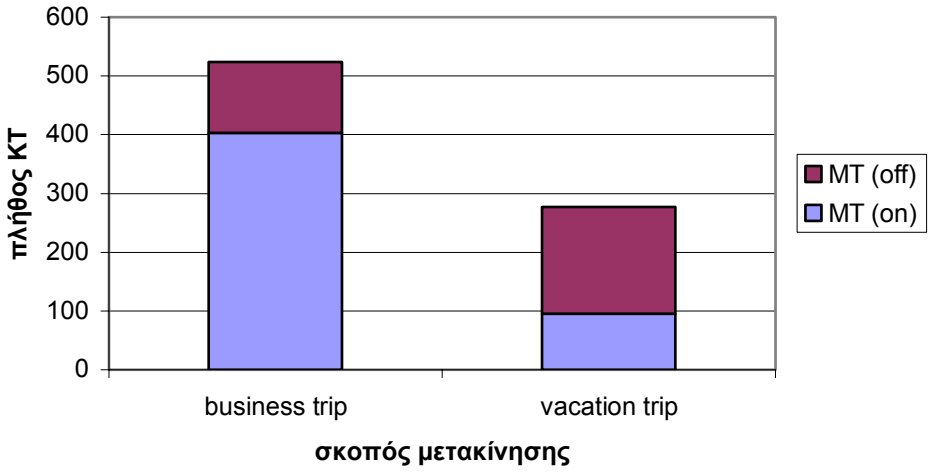
Σχήμα 4.5. Δείγμα έρευνας

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο πίνακα 4.1 όπου φαίνεται να υπάρχει τουλάχιστον μία συσκευή για το 86,89% των οχημάτων και πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν 106 (=67,67%+2*19,23%) συσκευές κινητής τηλεφωνίας για κάθε 100 οχήματα. Η πιθανότητα να έχουμε τουλάχιστον ένα ΚΤ σε κατάσταση ενεργής σύνδεσης κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού εξαρτάται άμεσα από τον πλήθος των συσκευών στο συγκεκριμένο αυτοκίνητο. Το 68.82 % από εκείνους που δήλωσαν ότι έχουν μία συσκευή, έχουν το κινητό τους τηλέφωνο σε κατάσταση ενεργής σύνδεσης. Το 81.7 % από εκείνους που δήλωσαν ότι έχουν δύο συσκευές, έχουν τουλάχιστον τη μία συσκευή σε κατάσταση ενεργούς σύνδεσης.

Στην Ελλάδα υπάρχουν τρεις πάροχοι κινητής τηλεφωνίας, έχοντας μεταξύ τους μοιρασμένο το μερίδιο αγοράς. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορεί να υποτεθεί ότι το 33,33% ανήκει σε κάθε ένα πάροχο κινητής τηλεφωνίας. Αυτό το ποσοστό είναι κατά πολύ υψηλότερο από το θεωρητικά απαιτούμενο 5% των ερευνητικών οχημάτων το οποίο χρειάζεται προκειμένου να επιτευχθεί κάλυψη μεγαλύτερη από το 95%, όπως έχει αποδειχθεί στη παράγραφο 4.3, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσής μας. Εφόσον η μελέτη διενεργήθηκε στα μέσα της εβδομάδας, τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ως ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα της συνήθους κυκλοφοριακής συμφόρησης που παρατηρείται στη πόλη.

4.4.2. Κατανομή συσκευών σε σχέση με το σκοπό μετακίνησης

Η έρευνα δείχνει ότι υπάρχουν περισσότερα ΚΤ σε κατάσταση ενεργούς σύνδεσης κατά τη διάρκεια επαγγελματικών ταξιδιών από ότι κατά τη διάρκεια ταξιδιών αναψυχής (σχήμα 4.6), παρόλο που η διαφορά δεν είναι τόσο μεγάλη. Η κατανομή των οχημάτων που ταξιδεύουν με ένα ΚΤ σε σχέση με τη κατάσταση σύνδεσης παρουσιάζεται ακολούθως:

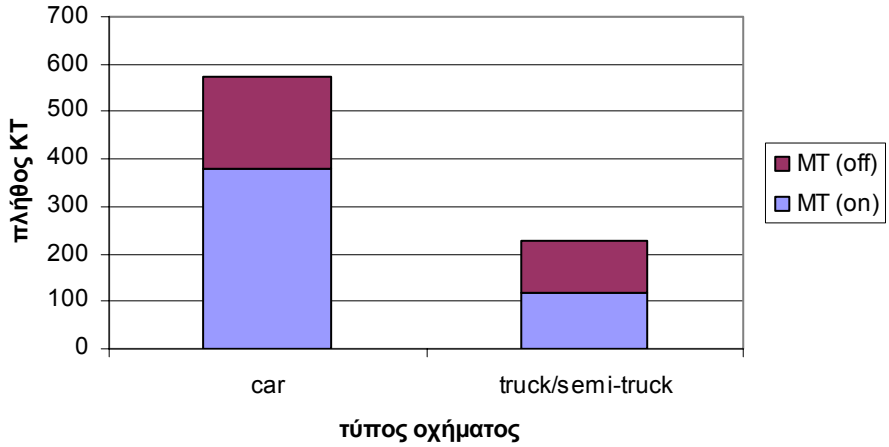


Σχήμα 4.6. Σκοπός μετακίνησης και κατάσταση σύνδεσης συσκευής κινητής τηλεφωνίας

Μόνο το 34.30% των μετακινήσεων αντιστοιχούν σε ταξίδια αναψυχής συνδρομητών με τη συσκευή σε κατάσταση ενεργούς σύνδεσης, ενώ το 76.91% των συσκευών στην ίδια κατάσταση αντιστοιχούν σε επαγγελματικά ταξίδια. Αυτό υποδηλώνει ακόμα μεγαλύτερο πλήθος ερευνητικών οχημάτων κατά τη διάρκεια μη καλοκαιρινής περιόδου, όταν θα πραγματοποιούνται περισσότερες επαγγελματικές μετακινήσεις.

4.4.3. Κατανομή συσκευών σε σχέση με το τύπο του οχήματος

Ένα ενδιαφέρον στοιχείο της έρευνας θα μπορούσε να θεωρηθεί το γεγονός ότι η κατανομή δεν αλλάζει αισθητά, όταν εξετάζεται ο τύπος του οχήματος, σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7. Τύπος του οχήματος και κατάσταση σύνδεσης συσκευής κινητής τηλεφωνίας

4.5. Μοντελοποίηση κίνησης οδικού δικτύου και εκτίμηση των παραμέτρων κίνησης

Κατά τη μοντελοποίηση κίνησης οδικού δικτύου διακρίνουμε περιπτώσεις, οι οποίες και αναφέρονται στη παράγραφο 4.5.1.. Εν συνεχεία, προκειμένου να εκτιμήσουμε τις παραμέτρους του μοντέλου κίνησης, κάνουμε χρήση ποσοτικών μεθόδων. Παράθεση των μεθόδων αυτών γίνεται στη παράγραφο 4.5.2..

4.5.1. Προτεινόμενα μοντέλα κίνησης

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, τα προτεινόμενα μοντέλα κίνησης, διακρίνονται στις περιπτώσεις είτε της μελέτης κίνησης ερευνητικού οχήματος, είτε της μελέτης κίνησης οχημάτων οδικού δικτύου. Οι περιπτώσεις αυτές αναλύονται διεξοδικά στις παραγράφους 4.5.1.1. και 4.5.1.2..

4.5.1.1. Προτεινόμενο μοντέλο κίνησης οχήματος

Κατά τη μοντελοποίηση της κίνησης ερευνητικού οχήματος, κάτω από ρεαλιστική κίνηση και περιβαλλοντικές συνθήκες, στηριχτήκαμε στη μοντελοποίηση των [BB03], επεκτείνοντάς την με μη σταθερή κίνηση οχημάτων. Μια νέα τεχνική αναπαράστασης προτείνεται εδώ, που χρησιμοποιεί κατανομές του μήκους οδών, των αλλαγών κατεύθυνσης σε διασταυρώσεις, και της ταχύτητας του ΚΤ. Οι παράμετροι που απαιτούνται, π.χ., μέση τιμή και διασπορά του μήκους οδών, ταχύτητας ΚΤ καθώς και οι κατανομές αλλαγής διεύθυνσης, μπορούν εύκολα να παραχθούν με παρατηρήσεις και μετρήσεις. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζονται από την κινητικότητα των ΚΤ αφορούν τη συμπεριφορά κλήσεων που εκφράζεται από το εισερχόμενο / εξερχόμενο ρυθμό κλήσεων καθώς και τη μέση διάρκεια κλήσης. Κατά συνέπεια έχουμε σύνδεση της θεωρίας τηλεπικοινωνιακής κίνησης με τη θεωρία τροχαίας κυκλοφορίας.

Ο προσδιορισμός του χρόνου που αφιερώνεται από ένα ΚΤ στην περιοχή κάλυψης κυψέλης, ο οποίος έχει οριστεί ως "χρόνος παραμονής κυψέλης", είναι μια σημαντική παράμετρος για την ποιοτική αξιολόγηση υπηρεσιών καθώς και τη βελτίωση αυτών ([B96], [ZDF96]). Αυτό ισχύει ιδιαίτερα κατά τη παραμετροποίηση της κάλυψης δικτύων κινητής τηλεφωνίας ([LG96], [YN96]). Επομένως, είναι απαραίτητο ένα κατάλληλο μοντέλο για να αναλύσει και να υπολογίσει τις μετακινήσεις του ΚΤ ([LCW97], [N93], [T94]). Γνωστά μοντέλα κίνησης, είτε τείνουν να εξαρτηθούν από ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων και μεγάλες σε όγκο βάσεις δεδομένων, ([MLTS97]) οπότε και δεν αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά τις μετακινήσεις των ΚΤ, είτε είναι βασισμένα σε παραμέτρους που δεν σχετίζονται άμεσα με τη συμπεριφορά κινούμενων κατά μήκος οδών, ΚΤ ([G87]).

Σχετικά με την άφιξη μιας κλήσης, οι κυψέλες σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα μπορούσαν να ταξινομηθούν ως "κυψέλη εκκίνησης κλήσης", όταν η κλήση ξεκινά μέσα στη κυψέλη, ή ως "κυψέλη διαπομπής κλήσης", όταν η κλήση συνεχίζεται από γειτονικές κυψέλες. Μια κλήση από / σε ΚΤ μπορεί να αρχίσει ή να ληφθεί σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στην κυψέλη εκκίνησης κλήσης,

κατά τη διάρκεια της διαδρομής του οχήματος (βλέπε Σχήμα 4.8). Το κινούμενο ΚΤ βγαίνοντας από τη κυψέλη εκκίνησης κλήσης θα έχει καταναλώσει τον υπόλοιπο χρόνο παραμονής κυψέλης t_{rs}. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται μια τυχαία διαδρομή, η οποία περιλαμβάνει όλες τις διασταυρώσεις που ένα ΚΤ θα διέσχιζε, σε αυτή τη κυψέλη. Τα διανύσματα $\vec{d}_i$ αντιπροσωπεύουν τόσο την τιμή μήκους της οδού μεταξύ των διασταυρώσεων, όσο και την κατεύθυνση της κίνησης του ΚΤ. Εάν $\vec{r}_0(x_0, y_0)$ δείχνει την αρχική θέση του ΚΤ, οι ακόλουθες σχέσεις παρέχουν τις διαδοχικές θέσεις του ΚΤ κινούμενο σε τυχαίες κατευθύνσεις:

$$\vec{r}_1(x_1, y_1) = \vec{r}_0 + \vec{d}_0(d_0, \varphi_0),$$

$$\vec{r}_2(x_2, y_2) = \vec{r}_1 + \vec{d}_1(d_1, \varphi_1),$$

…

$$\vec{r}_n(x_n, y_n) = \vec{r}_{n-1} + \vec{d}_{n-1}(d_{n-1}, \varphi_{n-1}) \qquad (1)$$

όπου φ_i είναι η αλλαγή κατεύθυνσης, σε σχέση με την κατεύθυνση του ΚΤ, στην προηγούμενη διασταύρωση. Για να απλοποιήσουμε τη διατύπωση, ορίζουμε ένα Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y), επιπλέον των πολικών συντεταγμένων.

Θεωρώντας ότι η αρχική κατεύθυνση του ΚΤ είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο διάστημα $[-\pi, \pi)$, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της αρχικής γωνίας φ_0 *είναι* επίσης ομοιόμορφα κατανεμημένη [G87].

Αφ' ετέρου, οι κυψέλες διαπομπής κλήσης έχουν ως σημείο εκκίνησης κάπου στα όριά τους. Στη περίπτωση αυτή, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατεύθυνσης ενός ΚΤ που διασχίζει το σύνορο μεταξύ των κυψελών από [XG93], εκφράζεται ως:

$$\text{p.d.f.}(\varphi_0) = \frac{1}{2}\cos\varphi_0 \text{ για } -\frac{\pi}{2} \le \varphi_0 \le \frac{\pi}{2} \qquad (2)$$

Οι σχετικές αλλαγές κατεύθυνσης σε κάθε διασταύρωση φ_i εξαρτώνται από τη ρυμοτομία της περιοχής και την κυκλοφοριακή συμφόρηση Η γωνία φ_i εκφράζεται από μια εκ των τεσσάρων τυχαίων μεταβλητών. Κάθε τυχαία μεταβλητή υποθέτουμε ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή. Οι πιθανότητες κατά την ανάθεση μεταβλητών στη φ_i εξαρτώνται από τους κυκλοφοριακούς κανόνες και τη συμπεριφορά των οδηγών (π.χ., οι οδηγοί είναι πιθανότερο να πραγματοποιήσουν δεξιά παρά αριστερή στροφή). Επομένως, η συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας φ_i ορίζεται ως:

$$\text{p.d.f.}(\varphi_i) = p_{0^\circ}\frac{1}{\sigma_\varphi\sqrt{2\pi}}e^{-\varphi_i^2/2\sigma_\varphi^2} + p_{90^\circ}\frac{1}{\sigma_\varphi\sqrt{2\pi}}e^{-(\varphi_i-\frac{\pi}{2})^2/2\sigma_\varphi^2} + p_{-90^\circ}\frac{1}{\sigma_\varphi\sqrt{2\pi}}e^{-(\varphi_i+\frac{\pi}{2})^2/2\sigma_\varphi^2} + p_{180^\circ}\frac{1}{\sigma_\varphi\sqrt{2\pi}}e^{-(\varphi_i-\pi)^2/2\sigma_\varphi^2} \quad (3)$$

όπου:

p_{0°, p_{90°, p_{-90°, p_{180° είναι οι πιθανότητες αλλαγής κατεύθυνσης που ικανοποιούν την ακόλουθη εξίσωση:

$p_{0^\circ} + p_{90^\circ} + p_{-90^\circ} + p_{180^\circ} = 1$,

σ_φ είναι η τυπική απόκλιση των κατανομών κατεύθυνσης, υποθέτοντας πως είναι ίδια και για τις τέσσερις κατανομές.

Η τιμή της τυπικής απόκλισης σ_φ εξαρτάται από το οδικό δίκτυο της εξεταζόμενης περιοχής. Ένα ακανόνιστο και ανομοιόμορφο οδικό δίκτυο έχει υψηλότερη τιμή σ_φ, από ένα δίκτυο Μανχάταν όπου οι οδοί είναι κάθετες η μια στην άλλη. Τα μήκη των οδών μεταξύ διασταυρώσεων d_i μπορούν επίσης να περιγραφούν από μια τυχαία μεταβλητή. Δεδομένου ότι οι οδοί εξετάζονται με τυχαία σειρά, ως προς ένα Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, οι προβολές τους $d_{i,X}$ και $d_{i,Y}$ μπορούν να θεωρηθούν τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες ακολουθούν την κανονική κατανομή. Σε περιοχές με ανομοιόμορφο οδικό δίκτυο, οι τυχαίες μεταβλητές $d_{i,X}$ και $d_{i,Y}$ μπορούν να χαρακτηριστούν ως στατιστικά ανεξάρτητες ακολουθώντας την κανονική κατανομή, με μέση τιμή μηδέν και ίδια απόκλιση. Επομένως, το μήκος των οδών μεταξύ των διασταυρώσεων μπορεί να οριστεί ως:

$$d_i = \sqrt{d_{i,X}^2 + d_{i,Y}^2} \quad (4)$$

η οποία ακολουθεί τη Rayleigh κατανομή:

$$\text{p.d.f.}(d_i) = \frac{d_i}{\sigma_d^2}e^{-\frac{d_i^2}{2\sigma_d^2}} \text{ for } d_i > 0$$

όπου $\sigma_d = \bar{d}\sqrt{\frac{2}{\pi}}$ (5)

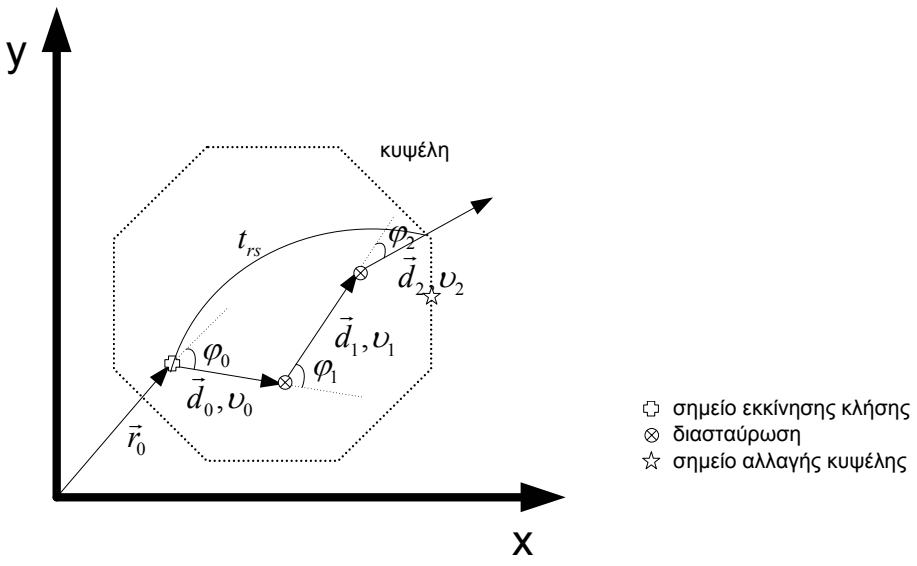
Το μέσο μήκος οδών $\bar{d}$ ενδεχομένως να διαφέρει μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών της πόλης. Υπολογισμοί για την Αθήνα δείχνουν ότι d = 80-110 μέτρα στο κέντρο της πόλης, ενώ ανέρχεται στα d = 110-160 μέτρα στα προάστια.

Αν και το ακανόνιστο οδικό δίκτυο αστικού περιβάλλοντος δίνει τη δυνατότητα στους οδηγούς πολλαπλών επιλογών για το που να οδηγήσουν, αυτοί συνήθως χρησιμοποιούν τις κεντρικές οδικές αρτηρίες. Οι συγκοινωνιολόγοι ενθαρρύνουν τη παραπάνω συνήθεια με ένα πλήθος κανονισμών κυκλοφορίας. Όταν η πλειονότητα των ΚΤ ταξιδεύει μόνο σε κεντρικές οδικές αρτηρίες, η πυκνότητα πιθανότητας του d_i προσεγγίζεται από τη κατανομή Rice:

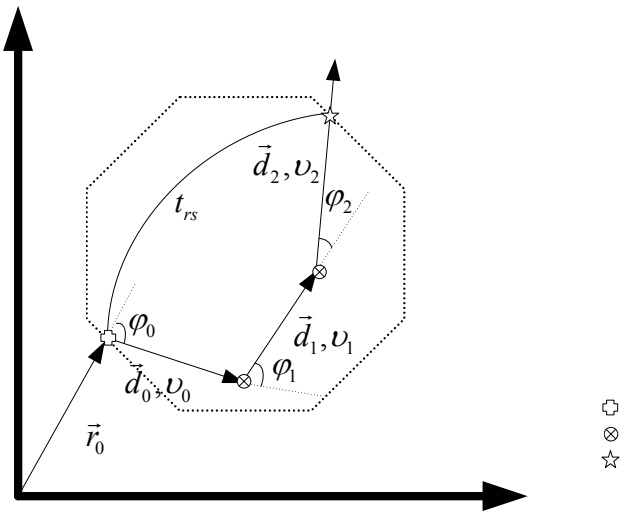
$$\text{p.d.f.}(d_i) = \frac{d_i}{\sigma_d^2} e^{-\frac{(d_i^2+\bar{d}^2)}{2\sigma_d^2}} I_0\left(\frac{d_i \bar{d}}{\sigma_d^2}\right) \text{ για } d_i > 0$$

όπου

$$I_0(x) = \frac{1}{\pi}\int_{\theta=0}^{\pi} e^{x\cos\theta} d\theta \text{ και } 0.75\cdot\bar{d}\sqrt{\frac{2}{\pi}} < \sigma_d < 1.5\cdot\bar{d}\sqrt{\frac{2}{\pi}} \quad (6)$$



Σχήμα 4.8.α. Παρακολουθώντας ΚΤ σε κυψέλη – σενάριο 1 – Εναπομένων "χρόνος παραμονής κυψέλης" σε "κυψέλη εκκίνησης κλήσης"



Σχήμα 4.8.β. Παρακολουθώντας ΚΤ σε κυψέλη – σενάριο 2 – Εναπομένων "χρόνος παραμονής κυψέλης" σε "κυψέλη διαπομπής κλήσης"

Εδώ το $\overline{d}$ είναι το μέσο μήκος κεντρικών οδικών αρτηριών μεταξύ δύο διαδοχικών διασταυρώσεων και σ_d^2 *είναι το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης* του μήκους δευτερευόντων οδών, μεταξύ δύο διαδοχικών διασταυρώσεων (δηλ., είναι το ίδιο όπως στη (5)). Η συνάρτηση I_0 είναι η τροποποιημένη λειτουργία Bessel πρώτου τύπου και μηδενικής τάξεως.

Σε αντίθεση με άλλα μοντέλα κινητών επικοινωνιών που μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία, κατά την προσομοίωσή μας η εξεταζόμενη ταχύτητα του οχήματος είναι συνάρτηση του χρόνου και της θέσεώς του. Έχοντας αυτό σαν υπόθεση, είμαστε σε θέση να προσομοιώσουμε διακυμάνσεις ταχύτητας κάθε κλίμακας, όπως από ατυχήματα και κυκλοφοριακές συμφορήσεις έως επιτάχυνση και επιβράδυνση του εξεταζόμενου οχήματος. Έτσι η ταχύτητα του ΚΤ ακολουθεί την κανονική κατανομή με αυξομειώσεις ανά 24 sec σε δίκτυο GSM και ανά 5 sec σε δίκτυο UMTS.

4.5.1.2. Προτεινόμενο μοντέλο κίνησης οδικού δικτύου

Κατά τη μοντελοποίηση της κίνησης οδικού δικτύου, η χρήση δυναμικού μοντέλου κίνησης είναι απαραίτητη ([MR90]). Τα δυναμικά μοντέλα είναι ικανά να δημιουργήσουν ρεαλιστικά σενάρια κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, το οποίο και είναι απαραίτητο για τον κατάλληλο χαρακτηρισμό της συμφόρησης οδικού δικτύου. Τη στιγμή αυτή, δύο βασικές προσεγγίσεις οι οποίες διαφέρουν στο επίπεδο ανάλυσης είναι διαθέσιμες. Αυτές καλούνται "μακροσκοπικά" και "μικροσκοπικά" μοντέλα κίνησης ([M90]).

Τα μακροσκοπικά μοντέλα βασίζονται στην αναλογία μεταξύ κυκλοφοριακής ροής και πραγματικής ροής υγρού. Επομένως μοναδικές οντότητες και μοναδικά οχήματα δεν ξεχωρίζουν το ένα από το

άλλο. Τα μακροσκοπικά πρότυπα επιτρέπουν μια απλή αλλά γρήγορη προσομοίωση περιοχών μεγάλης έκτασης. Το μειονέκτημά τους είναι ότι εξετάζουν μόνο ομάδες οχημάτων χωρίς πληροφορίες για συγκεκριμένα οχήματα. Αφετέρου, τα μικροσκοπικά πρότυπα εξετάζουν την κίνηση κάθε οχήματος ξεχωριστά.

Η μακροσκοπική προσέγγιση παρουσιάζει ένα υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης από τη μικροσκοπική προσέγγιση. Αυτό οδηγεί τους μακροσκοπικούς προσομοιωτές να έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα συγκρινόμενοι με τους μικροσκοπικούς προσομοιωτές:

- οι ανάγκες εισαγωγής μεγάλου όγκου πληροφορίας για τη μακροσκοπική προσομοίωση μειώνονται και η μοντελοποίηση μεγάλης κλίμακας δικτύων είναι ευκολότερη,
- απαιτείται μικρότερος χρόνος υπολογισμού,
- η βαθμονόμηση των μακροσκοπικών προτύπων είναι ευκολότερη.

Εντούτοις, οι μακροσκοπικοί προσομοιωτές έχουν όρια, τα οποία καθορίζονται από την αδυναμία τους να αντιπροσωπεύσουν μικροσκοπικά φαινόμενα όπως οι συγκρούσεις μεταξύ των οχημάτων, ασυνέχεια στη ροή που καθορίζεται από τα σήματα κυκλοφορίας καθώς και ανομοιογένεια μεταξύ των παρακείμενων οδών. Για το λόγο αυτό, η μακροσκοπική προσέγγιση είναι κατάλληλη σε σενάρια δικτύων μεγάλης κλίμακας (όπως δίκτυα αυτοκινητοδρόμων), αλλά είναι ακατάλληλη όταν αξιολογείται η επίδραση μικροσκοπικών γεγονότων.

Από την άλλη, η μικροσκοπική προσέγγιση μπορεί να εξετάσει με περισσότερες λεπτομέρειες το εξεταζόμενο μοντέλο, αλλά οι απαιτήσεις σε δεδομένα είναι συχνά πολύ μεγάλες για να επιτρέψουν την προσομοίωση των μεγάλων δικτύων. Επιπλέον, ακόμα κι αν καλυφθούν οι απαιτήσεις σε δεδομένα, ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος μπορεί να γίνει απαγορευτικός. Συνεπώς, οι μικροσκοπικοί προσομοιωτές χρησιμοποιούνται συνήθως για να αξιολογήσουν στρατηγικές σε μικρής ή μεσαίας κλίμακας δίκτυα.

Στα πλαίσια της διατριβής, θα παρουσιάσουμε ένα μοντέλο κίνησης οδικού δικτύου, το οποίο βασίζεται σε ένα διευρυμένο μακροσκοπικό πρότυπο, ικανό να περιγράψει μικροσκοπική δραστηριότητα. Αυτή η υβριδική προσέγγιση έχει ως στόχο τη μακροσκοπική προσομοίωση ενός δικτύου μεγάλης κλίμακας, εστιάζοντας τη προσοχή μας σε μικροσκοπικό επίπεδο σε μερικά σημεία του δικτύου, όπου και έχουμε περισσότερες πληροφορίες για τη μετακίνηση του ΚΤ (όρια LA).

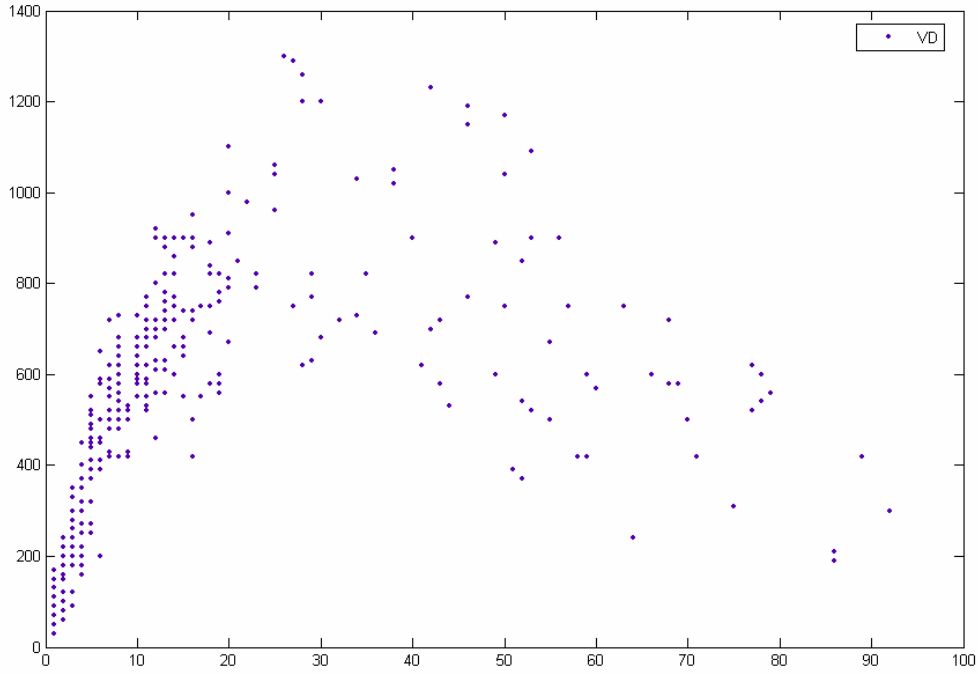
Κατά τη μακροσκοπική προσέγγιση, οι μεταβλητές που πρόκειται να καθοριστούν είναι η ροή $q(x,t)$ (ή ο όγκος), που αντιστοιχεί στο πλήθος των οχημάτων που διέρχονται από συγκεκριμένη τοποθεσία x στη μονάδα του χρόνου t, στη μέση χωρική ταχύτητα $v(x,t)$, που αντιστοιχεί στη στιγμιαία μέση ταχύτητα των οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής και στη πυκνότητα κυκλοφοριακής κίνησης $k(x,t)$, που αντιστοιχεί στο πλήθος των οχημάτων ανά μονάδα

μήκους εξεταζόμενης διαδρομής. Οι μακροσκοπικές αυτές μεταβλητές είναι εξ'ορισμού συνδεδεμένες με την ευρέως γνωστή εξίσωση:

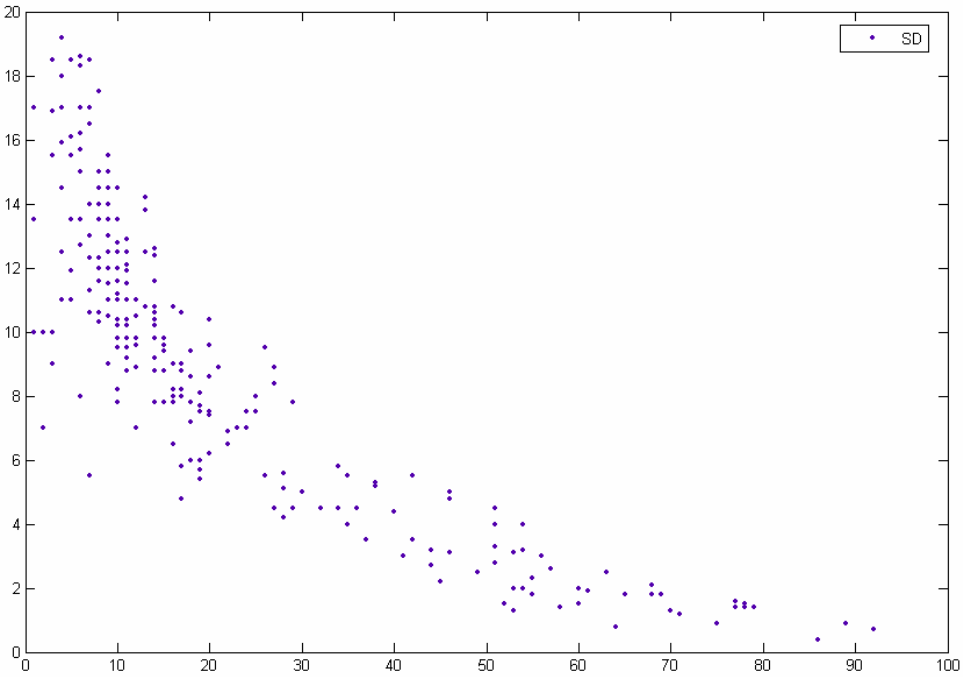
$$q(x,t) = k(x,t) \cdot v(x,t) \qquad (1)$$

Πειραματικά δεδομένα ([PS91]) του διαγράμματος πυκνότητας-ροής έδειξαν ότι η ροή αυξανομένης της πυκνότητας, πρώτα αυξάνεται και έπειτα μειώνεται. Το αυξητικό μέρος είναι αποτέλεσμα αυξημένου επιπέδου ζήτησης, ενώ το φθίνων τμήμα παρατηρείται λόγω του κορεσμού (η ζήτηση δεν έχει πλέον καμία επίδραση στη ροή), όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 4.9.

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ροής ορίζονται εξ' ολοκλήρου από το θεμελιώδες διάγραμμα (σχήμα 4.11). Πειραματικές μετρήσεις ροής, ταχύτητας και πυκνότητας, δείχνουν ευρεία διασπορά όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.9. Διαφορές μεταξύ μεμονωμένων συμπεριφορών, καθώς και το γεγονότος ότι στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό, είναι οι κύριοι λόγοι για αυτή την διασπορά.



Σχήμα 4.9. (α) VD (ροή-πυκνότητα) διάγραμμα
(V: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα του χρόνου, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)



Σχήμα 4.9. (β) SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα
(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)

Επιπλέον, εάν ορίσουμε k_m την πυκνότητα στην οποία παρουσιάζεται η μέγιστη ροή q_m, παρατηρούμε ότι η ροή παραμένει η ίδια για οποιαδήποτε τιμή της πυκνότητας στη περιοχή του k_m. Έτσι οι ακόλουθοι δύο περιορισμοί μπορούν να οριστούν:

$$q\big|_{k=k_m} = q_m \tag{2}$$

$$\left.\frac{\partial q}{\partial k}\right|_{k=0} = 0 \tag{3}$$

Όταν η πυκνότητα είναι πολύ χαμηλή, η απόσταση μεταξύ των οχημάτων είναι πολύ σημαντική. Σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα μεμονωμένου οχήματος δεν συνδέεται πλέον με την πυκνότητα, απλά περιορίζεται από το όριο ταχύτητας V_l. Σε αυτήν την περίπτωση η εξίσωση (1) γίνεται $q = k \cdot V_l$ οπότε και έχουμε:

$$q\big|_{k=0} = 0 \tag{4}$$

$$\left.\frac{\partial q}{\partial k}\right|_{k=0} = V_l \tag{5}$$

Η πυκνότητα δεν μπορεί να υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο k_{jam} σύμφωνα με το μέγιστο πλήθος οχημάτων που μπορεί να περιληφθούν ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής. Η πυκνότητα αυτή λαμβάνεται όταν σταματήσουν όλα τα οχήματα:

$$q\big|_{k=jam} = 0 \tag{6}$$

Τα περισσότερα μακροσκοπικά μοντέλα ικανοποιούν τις εξισώσεις (2) έως (6). Τα μικροσκοπικά μοντέλα χρησιμοποιούν τους λεγόμενους "νόμους έποντος αυτοκινήτου" (car following laws) προκειμένου να περιγράψουν τη συμπεριφορά κάθε οδηγού οχήματος του συστήματος ως ροή αλληλεπιδρώντων οχημάτων. Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ([GHP59]) ότι τα μακροσκοπικά μοντέλα μπορούν να ληφθούν απευθείας από τα μικροσκοπικά μοντέλα, αλλά τα περισσότερα από τα μακροσκοπικά μοντέλα που ελήφθησαν με αυτό το τρόπο, δεν ικανοποιούν τις παραπάνω εξισώσεις.

Σε κατάσταση ισορροπίας, η απόσταση μεταξύ των οχημάτων του κάθε ζευγαριού είναι η ίδια οπότε και θα έχουμε:

$$k = \frac{1}{d} \tag{7}$$

Επιπλέον, όλα τα οχήματα έχουν την ίδια ταχύτητα:

$$\forall\, n,\ \dot{x}_n = V \tag{8}$$

Οι εξισώσεις (1) και (7) δίνουν:

$$V = \frac{1}{\tau}\left(\frac{1}{k} - l\right) \tag{9}$$

$$q = \frac{1 - k \cdot l}{\tau} \tag{10}$$

Προκειμένου να ορίσουμε την επιθυμητή απόσταση μεταξύ των οχημάτων που είναι συμβατή με τα μακροσκοπικά αποτελέσματα, έχουμε παρατηρήσει ότι:

• Για να επαληθεύεται η σταθερή τιμή απόστασης μεταξύ των οχημάτων *l,* όταν τα οχήματα ακινητοποιηθούν, το μοντέλο πρέπει να έχει την ακόλουθη δομή:

$$d = f_1(V) \cdot V + l \tag{11}$$

όπου $f_1(V)$ είναι συνάρτηση της ταχύτητας V .

• Για να διασφαλίσουμε "άπειρη" τιμή απόστασης μεταξύ των οχημάτων, όταν η ταχύτητα πάρει τη μέγιστη τιμή της $V_{\max}$ ($V_{\max}$ είναι η μέγιστη τιμή της ταχύτητας, που θα μπορούσε να επιτευχθεί σε περίπτωση ανυπαρξίας ορίων ταχύτητας), θα πρέπει να έχουμε επίσης:

$$d = \frac{f_2(V)}{V_{\max} - V} \tag{12}$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (11) και (12), λαμβάνουμε το ακόλουθο μοντέλο απόστασης μεταξύ οχημάτων:

$$d = \frac{V}{V_{\max} - V} f(V) + l \tag{13}$$

Η απλούστερη λύση είναι να θέσουμε το $f(V)$ ίσο με τη μεταβλητή που παίρνει σταθερή τιμή λ. Τότε η εξίσωση (13) παίρνει τη μορφή:

$$d = \frac{V}{V_{\max} - V} \lambda + l$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1) και (7) λαμβάνουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$V = \frac{\left(\frac{1}{k} - l\right)}{\lambda + \frac{1}{k} - l} \cdot V_{\max}$$

Εισάγοντας την τιμή του ορίου ταχύτητας V_l και την τιμή της πυκνότητας k_0, κατά την οποία η ταχύτητα αρχίζει να διασυνδέεται με την πυκνότητα, προτείνουμε τελικά το ακόλουθο μοντέλο ταχύτητας-πυκνότητας:

$$V = \begin{cases} V_l & \gamma\iota\alpha\ k < k_0 \\ \dfrac{\left(\frac{1}{k} - l\right)}{\lambda + \frac{1}{k} - l} \cdot V_{\max} & \gamma\iota\alpha\ k_0 \le k \le k_{\max} \end{cases} \tag{14}$$

Το παραγόμενο μοντέλο ροής είναι:

$$q = \begin{cases} k \cdot V_l & \gamma\iota\alpha\ k < k_0 \\ \dfrac{(1 - k \cdot l)}{\lambda + \frac{1}{k} - l} \cdot V_{\max} & \gamma\iota\alpha\ k_0 \le k \le k_{\max} \end{cases} \tag{15}$$

$$\frac{\partial q}{\partial k} = \begin{cases} V_l & \gamma\iota\alpha\ k < k_0 \\ \dfrac{\left(\frac{1 - k \cdot l}{k}\right) - l \cdot \lambda}{\left(\lambda + \frac{1}{k} - l\right)^2} V_{\max} & \gamma\iota\alpha\ k \ge k_0 \end{cases} \tag{16}$$

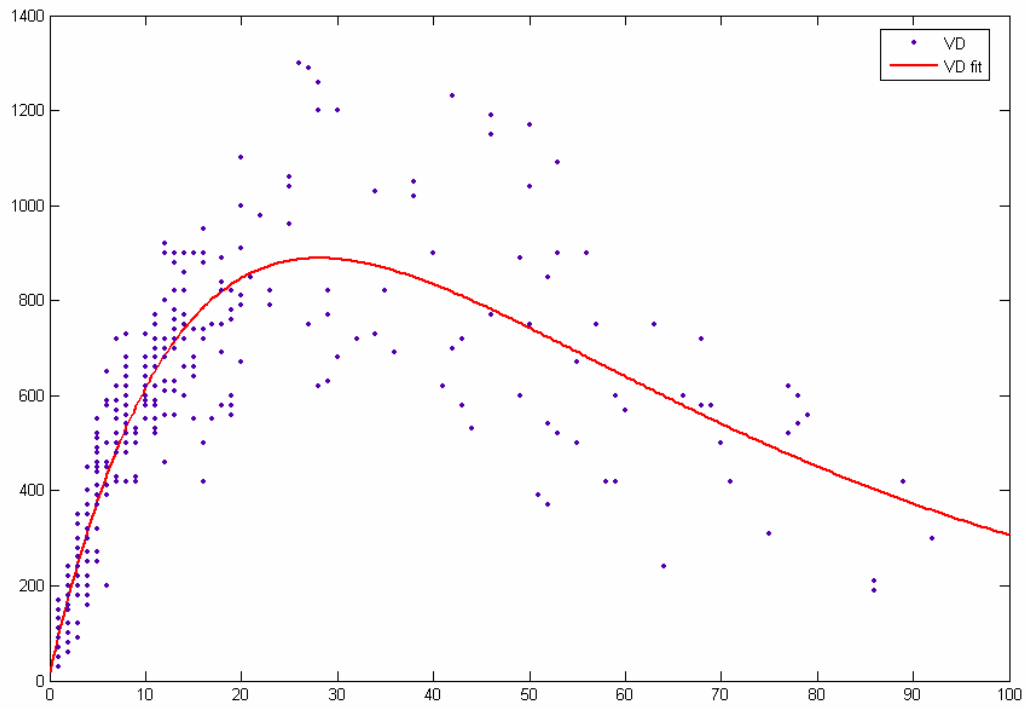
Το παραπάνω μοντέλο σε κάθε περίπτωση ικανοποιεί τις εξισώσεις (4), (5) και (6). Προκειμένου να είμαστε σύμφωνοι με την εξίσωση (3), θα πρέπει να έχουμε:

$$\lambda = l \cdot \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^2 \tag{17}$$

με $\alpha = \dfrac{k_m}{k_{jam}} = l \cdot k_m$

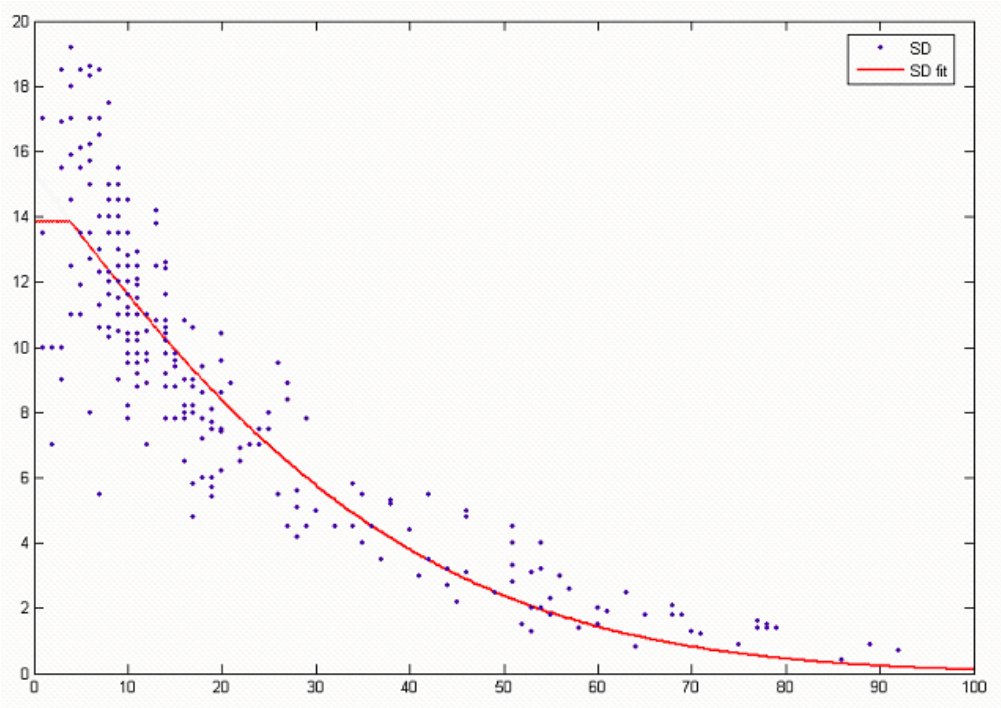
Προκειμένου να είμαστε σύμφωνοι και με την εξίσωση (2), θα πρέπει να έχουμε:

$$V_{\max} = \frac{q_m \cdot l}{\alpha^2} \tag{18}$$



Σχήμα 4.10. (α) VD (ροή-πυκνότητα) διάγραμμα

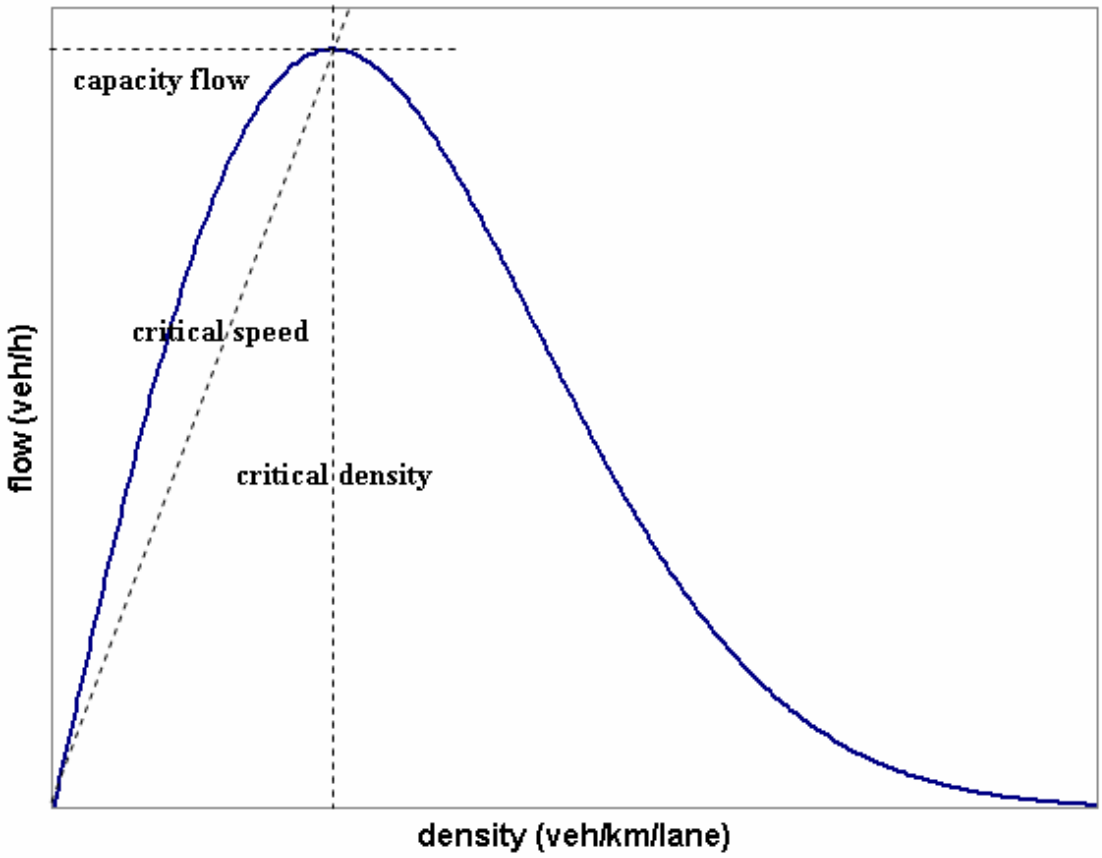
(V: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα του χρόνου, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)



Σχήμα 4.10. (β) SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα
(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)

Από τα εξαγόμενα διαγράμματα (σχήμα 4.10) (όπως θα αναλυθεί στη παράγραφο 6.2.3.2.), μπορούμε να έχουμε εκτίμηση του πλήθους των οχημάτων για συγκεκριμένες οδικές αρτηρίες. Προκειμένου να παραχθούν τα αποτελέσματα του σχήματος 4.10, οι ακόλουθες παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν:

q_m = 0.25 veh/sec	a = 0.32	V_l = 13.8 m/sec
l = 7 m	λ = 31.6 m	$V_{\max}$ = 17.09 m/sec



Σχήμα 4.11. Ένα τυπικό παράδειγμα του θεμελιώδους διαγράμματος

Το θεμελιώδες διάγραμμα αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά κυκλοφοριακής κίνησης σε έναν ομοιογενή αυτοκινητόδρομο (οι χρονικές μεταβολές της ταχύτητας, ροής και πυκνότητας είναι ίσες με το μηδέν). Η έννοια της καμπύλης είναι η ακόλουθη: Όταν η πυκνότητα είναι χαμηλή, οι οδηγοί ταξιδεύουν με τιμές ταχύτητας κοντά στη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα και η σχέση μεταξύ της ροής και της πυκνότητας είναι περίπου γραμμική. Όταν η κυκλοφορία γίνεται πυκνότερη, οι οδηγοί τείνουν να μειώσουν την ταχύτητά τους, μέχρι μιας ορισμένης πυκνότητας, η αποκαλούμενη κρίσιμη πυκνότητα (όπου η χωρητικότητα του αυτοκινητόδρομου έχει επιτευχθεί). Όταν η πυκνότητα αυξάνεται ξεπερνώντας την κρίσιμη πυκνότητα, οι οδηγοί τείνουν να μειώσουν την ταχύτητά τους τόσο έντονα, ώστε η προκύπτουσα ροή είναι κατά πολύ χαμηλότερη της χωρητικότητας του αυτοκινητοδρόμου. Η κρίσιμη ταχύτητα είναι η ταχύτητα που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροή. Η κλίση της γραμμής που συνδέει την αρχή των συντεταγμένων και ένα σημείο του θεμελιώδους διαγράμματος, αντιπροσωπεύει την ταχύτητα που αντιστοιχεί σε εκείνο το σημείο.

4.5.2. Ποσοτικές τεχνικές

Προκειμένου να παραχθούν οι γραφικές παραστάσεις του σχήματος 4.10, οπότε και να εκτιμήσουμε τις παραμέτρους του μοντέλου κίνησης που θα παρήγαγε τις γραφικές παραστάσεις, οι οποίες

ταιριάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα στα δεδομένα στοιχεία, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ποσοτικές τεχνικές. Μερικές από τις κλασικές ποσοτικές τεχνικές ταξινομούνται ως διανεμητικές τεχνικές μέτρησης και παρατίθενται ακολούθως. Ακολουθή μια επιλεκτική αναφορά σε ένα ποσοτικές τεχνικές.

4.5.2.1. Δοκιμή "Χι τετράγωνο"

4.5.2.1.1. Εξέταση για τη διανεμητική επάρκεια

Η δοκιμή "Χι τετράγωνο" ([SC89]) χρησιμοποιείται για να εξετάσει εάν ένα δείγμα στοιχείων προήλθε από έναν πληθυσμό με συγκεκριμένη κατανομή.

Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της δοκιμής "Χι τετράγωνο" είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε κατανομή, για την οποία μπορεί να υπολογιστεί η αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Η δοκιμή "Χι τετράγωνο" μπορεί να εφαρμοστεί σε ομαδοποιημένα στοιχεία. Αυτό δεν είναι ουσιαστικά περιορισμός, δεδομένου ότι για μη ομαδοποιημένα στοιχεία μπορεί να υπολογιστεί ένα ιστόγραμμα ή ένας πίνακας συχνότητας, πριν εκτελεστεί η δοκιμή "Χι τετράγωνο". Εντούτοις, η τιμή της "Χι τετράγωνο" εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο τα στοιχεία είναι ομαδοποιημένα. Μειονέκτημα της δοκιμής "Χι τετράγωνο" είναι ότι απαιτεί ένα αρκετά μεγάλο δείγμα προκειμένου να ισχύει η "Χι τετράγωνο" προσέγγιση.

Η δοκιμή "Χι τετράγωνο" είναι μια εναλλακτική λύση των δοκιμών Anderson-Darling και Kolmogorov-Smirnov . Η δοκιμή "Χι τετράγωνο" μπορεί να εφαρμοστεί σε διακριτές κατανομές όπως η διωνυμική και η Poisson. Οι δοκιμές Anderson-Darling και Kolmogorov-Smirnov περιορίζονται στις συνεχείς κατανομές.

4.5.2.1.2. Ορισμός

Για τον υπολογισμό της δοκιμής "Χι τετράγωνο", τα στοιχεία διαιρούνται σε K, το πλήθος τάξεις και η στατιστική δοκιμή καθορίζεται από:

$$X^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{\left(O_i - E_i\right)^2}{E_i}$$

όπου

O_i είναι η παρατηρούμενη συχνότητα για τη τάξη i και E_i είναι η προσδοκώμενη συχνότητα για την τάξη i. Η προσδοκώμενη συχνότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$E_i = N(F(Y_u) - F(Y_l))$$

όπου το F είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της εξεταζόμενης κατανομής, Y_u είναι το ανώτερο όριο για την κατηγορία i, Y_l είναι το χαμηλότερο όριο για την κατηγορία i και N είναι το μέγεθος δειγμάτων. Αυτή η δοκιμή είναι ευαίσθητη στην επιλογή των τάξεων. Δεν υπάρχει βέλτιστη επιλογή για το μέγεθος των τάξεων (δεδομένου ότι το μέγεθος των τάξεων εξαρτάται από την κατανομή). Οι περισσότερες επιλογές πρέπει να παράγουν παρόμοια, αλλά όχι πανομοιότυπα, αποτελέσματα.

4.5.2.2. Δοκιμή Kolmogorov-Smirnov

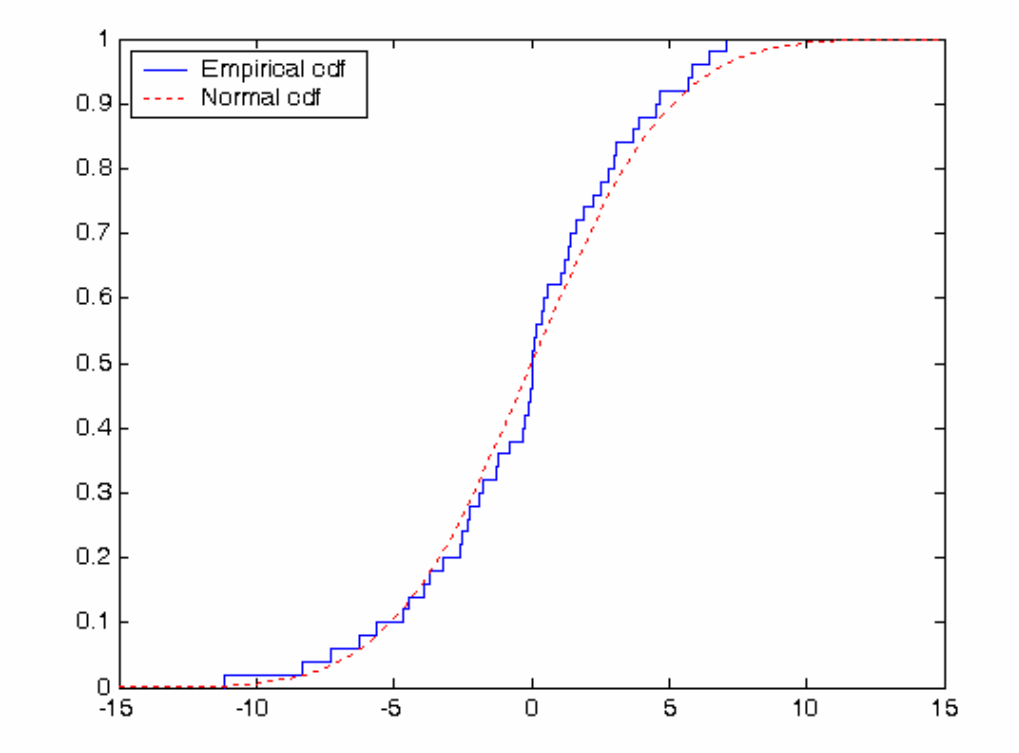
4.5.2.2.1. Εξέταση για τη διανεμητική επάρκεια

Η δοκιμή Kolmogorov-Smirnov ([CLR67]) χρησιμοποιείται για να αποφασίσει εάν ένα δείγμα προέρχεται από έναν πληθυσμό με συγκεκριμένη κατανομή. Η δοκιμή Kolmogorov-Smirnov (K-S) είναι βασισμένη στην εμπειρική συνάρτηση κατανομής (ECDF). Δοθέντων N διαταγμένων σημείων $Y_1, Y_2, ..., Y_N$, το ECDF ορίζεται ως:

$$E_N = \frac{n(i)}{N}$$

όπου $n(i)$ είναι το πλήθος των σημείων μικρότερο από Y_i και διατεταγμένα, από μικρότερη σε μεγαλύτερη τιμή. Αυτό είναι μια διαδικασία βημάτων που αυξάνει τη τιμή κατά $\frac{1}{N}$ στη τιμή κάθε διαταγμένου σημείου.

Η γραφική παράσταση που ακολουθεί είναι η αναπαράσταση της εμπειρικής συνάρτησης κατανομής, με κανονική αθροιστική συνάρτηση κατανομής για 50 τυχαίους αριθμούς, που ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή μ=0 και διασπορά σ=4. Η δοκιμή K-S είναι βασισμένη στη μέγιστη απόσταση μεταξύ αυτών των δύο καμπυλών.



Σχήμα 4.12. Ένα παράδειγμα των συναρτήσεων ECDF και CDF

4.5.2.2.2. Χαρακτηριστικά και Περιορισμοί της δοκιμής K-S

Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτής της δοκιμής είναι ότι η κατανομή της στατιστικής δοκιμής K-S δεν εξαρτάται από την αθροιστική συνάρτηση της κατανομής που εξετάζεται. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι είναι μια ακριβής δοκιμή (η δοκιμή "Χι τετράγωνο" εξαρτάται από ένα επαρκές μέγεθος δείγματος προκειμένου να θεωρηθεί ακριβής η δοκιμή). Παρόλο αυτών των πλεονεκτημάτων, η δοκιμή K-S έχει διάφορους σημαντικούς περιορισμούς:

α. Ισχύει μόνο για τις συνεχείς κατανομές.

β. Τείνει να είναι πιο ευαίσθητη κοντά στο κέντρο της κατανομής απ' ότι στις άκρες.

γ. Ίσως, ο σοβαρότερος περιορισμός είναι ότι η κατανομή πρέπει να είναι πλήρως καθορισμένη.

Πιο συγκεκριμένα εάν η θέση, η κλίμακα και οι παράμετροι μορφής υπολογίζονται από τα στοιχεία, η κρίσιμη περιοχή της δοκιμής K-S δεν ισχύει πλέον αλλά πρέπει να καθοριστεί από προσομοίωση. Λόγω των περιορισμών β και γ, πολλοί αναλυτές προτιμούν τη χρήση της δοκιμής Anderson-Darling. Εντούτοις, η δοκιμή Anderson-Darling είναι διαθέσιμη μόνο για συγκεκριμένες κατανομές.

4.5.2.2.3. Ορισμός

Η δοκιμή K-S ορίζεται ως:

$$D = \max_{1 \le i \le N} \left| F(Y_i) - \frac{i}{N} \right|$$

όπου F είναι η θεωρητική αθροιστική συνάρτηση κατανομής της δοκιμής που εξετάζεται, η οποία δεν πρέπει να είναι συνεχής κατανομή (δηλ., όχι κάποια διακριτή κατανομή όπως η διωνυμική ή η Poisson) και πρέπει να καθοριστεί πλήρως (δηλ., η θέση, η κλίμακα, και οι παράμετροι μορφής δεν μπορούν να υπολογιστούν από τα στοιχεία).

4.5.2.3. Δοκιμή Anderson-Darling

4.5.2.3.1. Εξέταση για τη διανεμητική επάρκεια

Η δοκιμή Anderson-Darling ([S74]) χρησιμοποιείται για να εξετάσει εάν ένα δείγμα στοιχείων προήλθε από έναν πληθυσμό με συγκεκριμένη κατανομή. Είναι μια τροποποίηση της δοκιμής K-S και δίνει περισσότερο βάρος στις άκρες της εξεταζόμενης κατανομής σε σχέση με τη δοκιμή K-S. Η δοκιμή K-S είναι ανεξάρτητη κατανομή, υπό την έννοια ότι οι κρίσιμες τιμές δεν εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη κατανομή που εξετάζεται. Η δοκιμή Anderson-Darling χρησιμοποιεί τη συγκεκριμένη κατανομή κατά τον υπολογισμό των κρίσιμων τιμών. Αυτό έχει το πλεονέκτημα μιας πιο ευαίσθητης δοκιμής και το μειονέκτημα ότι οι κρίσιμες τιμές πρέπει να υπολογιστούν για κάθε κατανομή.

Η δοκιμή Anderson-Darling είναι μια εναλλακτική λύση των δοκιμών “Χι τετράγωνο” και K-S.

4.5.2.3.2. Ορισμός

Η δοκιμή Anderson-Darling ορίζεται ως εξής:

$$A^2 = -N - S$$

όπου

$$S = \sum_{i=1}^{N} \frac{(2i-1)}{N} [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))]$$

F είναι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της συγκεκριμένης κατανομής. Δεν πρέπει να παραληφθεί ότι τα Y_i είναι διατεταγμένα δεδομένα.

4.5.2.4. Δοκιμή Shapiro-Wilk

4.5.2.4.1. Shapiro-Wilk test for normality

10. Η δοκιμή Shapiro-Wilk προτεινόμενη στο [SW65], υπολογίζει μια στατιστική μεταβλητή W που εξετάζει εάν ένα τυχαίο δείγμα $x_1, x_2, ..., x_n$, προέρχεται από (συγκεκριμένη) κανονική κατανομή. Οι μικρές τιμές του W είναι απόδειξη της κανονικότητας της κατανομής, ενώ οι ποσοστιαίες μονάδες για τη στατιστική μεταβλητή W, που ελήφθησαν μέσω των προσομοιώσεων

Monte Carlo, αναπαρήχθησαν από την [PH72]. Αυτή η δοκιμή έχει δώσει καλά αποτελέσματα σε σύγκριση με μελέτες από άλλες δοκιμές.

4.5.2.4.2. Ορισμός

Η στατιστική μεταβλητή W υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}$$

όπου:

$x_{(i)}$ είναι οι διατεταγμένες τιμές δείγματος ($x_{(i)}$ είναι η μικρότερη) και a_i είναι σταθερές, που παράγονται από τα μέσα, τις διασπορές και τις συνδιακυμάνσεις των στατιστικών του δείγματος του μεγέθους n, από μια κανονική κατανομή. Για περισσότερες πληροφορίες για τη δοκιμή "Shapiro-Wilk" ο αναγνώστης θα μπορούσε να καταφύγει στη [SW65] καθώς και τους πίνακες που αναφέρονται στη [PH72].

4.5.2.5. Μετρήσεις της Κεντρικής Τάσης (χρήση του αρμονικού μέσου όρου)

Σκοπός των μέτρων της κεντρικής τάσης είναι η εύρεση της "μέσης" τιμής των δεδομένων στοιχείων. Ένας άλλος όρος των στατιστικών αυτών μέτρων θα μπορούσε να είναι μετρήσεις θέσεως. Στο υπολογιστικό εργαλείο MATLAB χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες συναρτήσεις:

- Γεωμετρικός μέσος όρος (GM)
- Αρμονικός μέσος όρος (AM)
- Αριθμητικός μέσος όρος (AA)
- 50th percentile (median)
- Trimmed mean (TM)

Ο AA είναι ένας απλός και ευρέως χρησιμοποιούμενος όρος για την εκτίμηση θέσης. Εάν το δείγμα στοιχείων προέρχεται από μια κανονική κατανομή, τότε και ο μέσος όρος δείγματος είναι επίσης βέλτιστος. Δυστυχώς, τιμές με μεγάλη απόκλιση, λάθη κατά την εισαγωγή δεδομένων ή δυσλειτουργίες υπάρχουν σχεδόν σε όλα τα πραγματικά στοιχεία. Ο μέσος όρος δείγματος στοιχείων είναι ευαίσθητος σε αυτά τα προβλήματα. Μία κακή τιμή δεδομένων μπορεί να μετακινήσει το μέσο όρο μακριά από το κέντρο των υπολοίπων στοιχείων, κατά μια αυθαίρετα μεγάλη απόσταση.

Ο median και ο TM είναι δύο μέτρα που είναι ανθεκτικά σε δείγματα που περιέχουν τιμές με μεγάλη απόκλιση. Ο median είναι το 50ό εκατοστημόριο του δείγματος, το οποίο θα αλλάξει μόνο ελαφρώς εάν προστεθεί μια κατά πολύ μεγαλύτερη τιμή. Η ιδέα πίσω από τον TM είναι να αγνοηθεί ένα μικρό ποσοστό των υψηλότερων και χαμηλότερων τιμών ενός δείγματος, κατά τον καθορισμό του κέντρου του δείγματος.

Ο GM και ο AM, όπως ο AA δεν είναι ανθεκτικοί σε δείγματα που περιέχουν τιμές με μεγάλη απόκλιση. Είναι χρήσιμοι, όταν το δείγμα ακολουθεί τη λογαριθμική κανονική συνάρτηση. Τα αποτελέσματα στην παράγραφο 6.2.2. χρησιμοποιούν τον AM.

Παραπομπές

[B96] M. Benveniste, "*Probability models of microcell coverage*", *Wireless Networks,* no. 2, pp. 289-296, 1996.

[BB03] Plamen Bratanov, Ernst Bonek, "*Mobility Model of Vehicle-Borne Terminals in Urban Cellular Systems*", IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.52, no.4, July 2003.

[CLR67] Chakravarti, Laha, and Roy, "*Handbook of Methods of Applied Statistics*", *Volume I*, John Wiley and Sons, pp. 392-394, 1967.

[G87] R. A. Guerin, "*Channel occupancy time distribution in a cellular radio system*", *IEEE Trans. Veh. Technol.,* vol. VT-35, pp. 89-99, Aug. 1987.

[LCW97] D. Lam, D. C. Cox, and J. Windom, "*Teletraffic modeling for personal communication services*", *IEEE Commun. Mag.,* vol. 35, pp. 79-87, Feb. 1997.

[GHP59] D. Gazis, R. Herman, and R. Potts, "*Car Following Theory of Steady State Traffic Flow*", Operations Research volume 7, pp.499, 1959.

[I02] Jean Luc Ignace, "*Travel Time Estimates From Cellular Phone Positioning*", Mobile Venue '02, Athens, Greece, May 30-31, 2002.

[LG96] X. Lagrange and P. Godlewski, "*Performance of a hierarchical cellular network with mobility-dependent hand-over strategies*", in *Proc. IEEE Global Telecommunication Conf. (Globecom 96),* Nov. 1996, pp. 1868-1872.

[M90] May, A.D. "*Traffic Flow Fundamentals*", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

[MLTS97] J. G. Markoulidakis, G. L. Lyberopoulos, D. F. Tsirkas, and E. D. Sykas, "*Mobility modeling in third-generation mobile telecommunications systems*", *IEEE Personal Commun.,* pp. 41-56, Aug. 1997.

[MR90] McShane, W.R. and R.P. Roess. "*Traffic Engineering*", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

[N93] S. Nanda, "*Teletraffic models for urban and suburban microcells: Cell sizes and handoff rates*", *IEEE Trans. Veh. Technol.,* vol. 42, pp. 673-682, Nov. 1993.

[PH72] Pearson, A. V., and Hartley, H. O., "*Biometrica Tables for Statisticians*", *Vol 2*, Cambridge, England, Cambridge University Press.

[PS91] M. Papageorgiou and G. Schmidt, "*Freeway Traffic Modeling, (Technische Universität München, Germany) – Concise encyclopedia of traffic & transportation systems*", p.162-167, M. Papageorgiou Ed., Pergamon Press 1991.

[SC89] Snedecor, George W. and Cochran, William G., "*Statistical Methods*", *Eighth Edition*, Iowa State University Press, 1989.

[S74] Stephens, M. A. (1974). "*EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons*", Journal of the American Statistical Association, Vol. 69, pp. 730-737.

[SW65] Shapiro, S. S. and Wilk, M. B., "*An analysis of variance test for normality (complete samples)*", Biometrika, 52, 3 and 4, pages 591-611.

[T94] S. Tekinay, "*Modeling and Analysis of Cellular Networks With Highly Mobile Heterogeneous Traffic Sources*", Ph.D., George Mason University, Fairfax, Virginia, 1994.

[XG93] H. Xie and D. J. Goodman, "*Mobility models and biased sampling problem*", in *2nd Int. Conf. Universal Personal Communication,* Ottawa, ON, Canada, 1993, pp. 804-807.

[YN96] K. L. Yeung and S. Nanda, "*Channel management in microcell/macrocell cellular radio systems*", *IEEE Trans. Vehicular Techno!.,* vol. 45, pp.601-612, Nov. 1996.

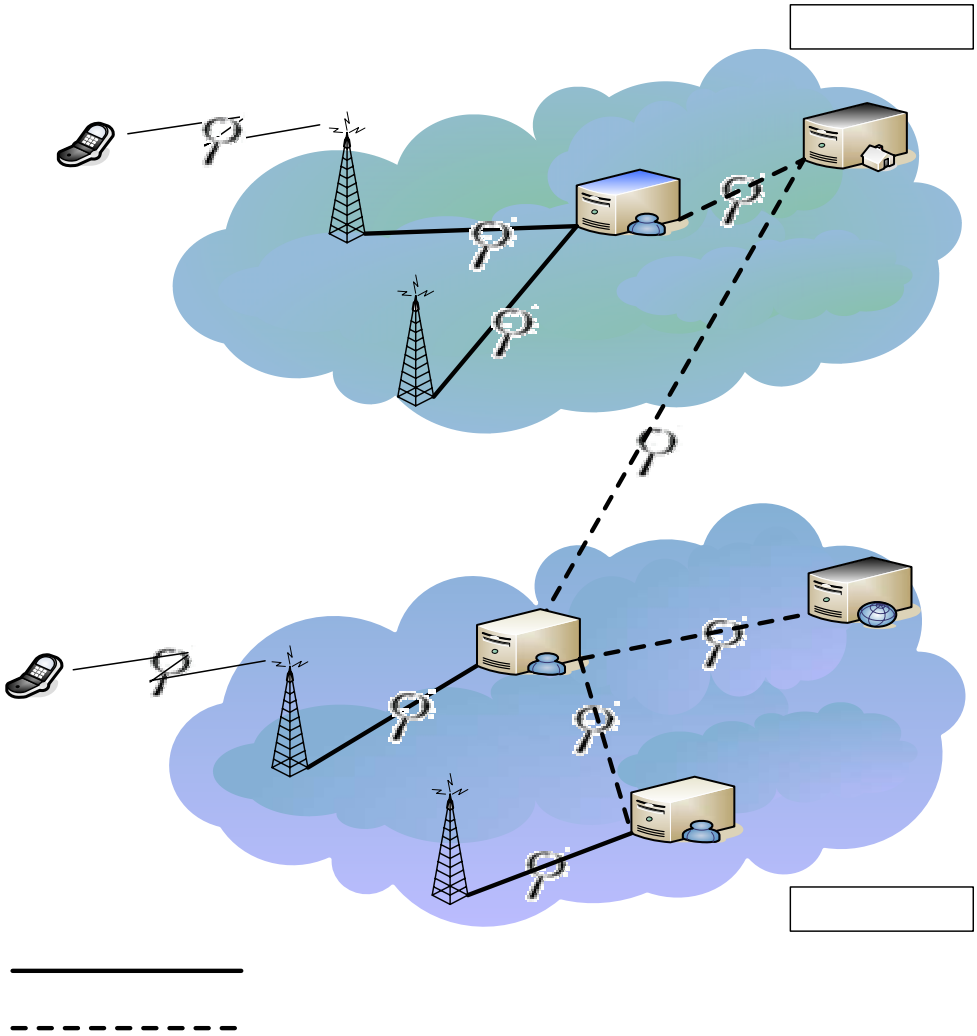
[ZDF96] M. M. Zonoozi, P. Dassanayake, and M. Faulkner, "*Teletraffic modeling of cellular mobile networks*", in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC96),* Apr-May 1996, pp. 1274-1277.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΗΜΑΤΟΔΟΣΙΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

5.0. Εισαγωγή

Οι υπηρεσίες ΥΠΘ είναι ένας νέος τύπος υπηρεσιών για χρήστες κινητών τηλεφώνων, που βασίζονται στη θέση του ΚΤ. Όπως έχει αναφερθεί και προηγούμενα, στα πλαίσια της διατριβής αυτής εστιάσαμε την προσοχή μας σε μια ιδιαίτερη τάξη υπηρεσιών ΥΠΘ, η οποία είναι η Υπηρεσία Κυκλοφοριακής Πληροφόρησης (ΥΚΚ).



Σχήμα 5.1. Διεπαφές σε κυψελοειδή δίκτυα GSM/UMTS

Η προτεινόμενη υπηρεσία είναι βασισμένη σε τεχνικές αναγνώρισης προτύπου σήματος, που εφαρμόζονται σε μετρήσεις σήματος κινητής τηλεφωνίας, και ακριβέστερα πληροφορίας που

εξάγεται, είτε από τη διεπαφή Abis κάνοντας παράλληλα χρήση των μετρήσεων προπορείας συγχρονισμού (TA) στο κυψελοειδές δίκτυο GSM, είτε από τη διεπαφή Iub, κάνοντας παράλληλα χρήση των μετρήσεων χρόνου πλήρους διαδρομής (RTT) στο κυψελοειδές δίκτυο UMTS. Στις ακόλουθες παραγράφους εξετάζουμε αυτές τις διεπαφές τόσο στα GSM δίκτυα όσο και στα UMTS δίκτυα, λεπτομερώς (σχήμα 5.1).

5.1. Σηματοδοσία (αρχή της μεθόδου εξέτασης των διεπαφών Abis/A)

Κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου μας, βασιστήκαμε στην επεξεργασία σήματος των στοιχείων, τόσο από την διεπαφή Abis όσο και από τη διεπαφή A. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διεπαφή Abis είναι η κύρια εξεταζόμενη διεπαφή. Εντούτοις, τα στοιχεία από τη διεπαφή Abis ολοκληρώνονται από τα στοιχεία από τη διεπαφή A. Η πληροφορία που εξήχθη και επεξεργάστηκε, περιέχεται στο τρίτο επίπεδο μηνυμάτων, που μεταδόθηκε τόσο στην A, όσο και στην Abis διεπαφή. Η αποκωδικοποίηση αυτών των μηνυμάτων καλείται εξέταση (probing).

5.1.1. Διεπαφή μεταξύ BSC – BTS: Η διεπαφή Abis

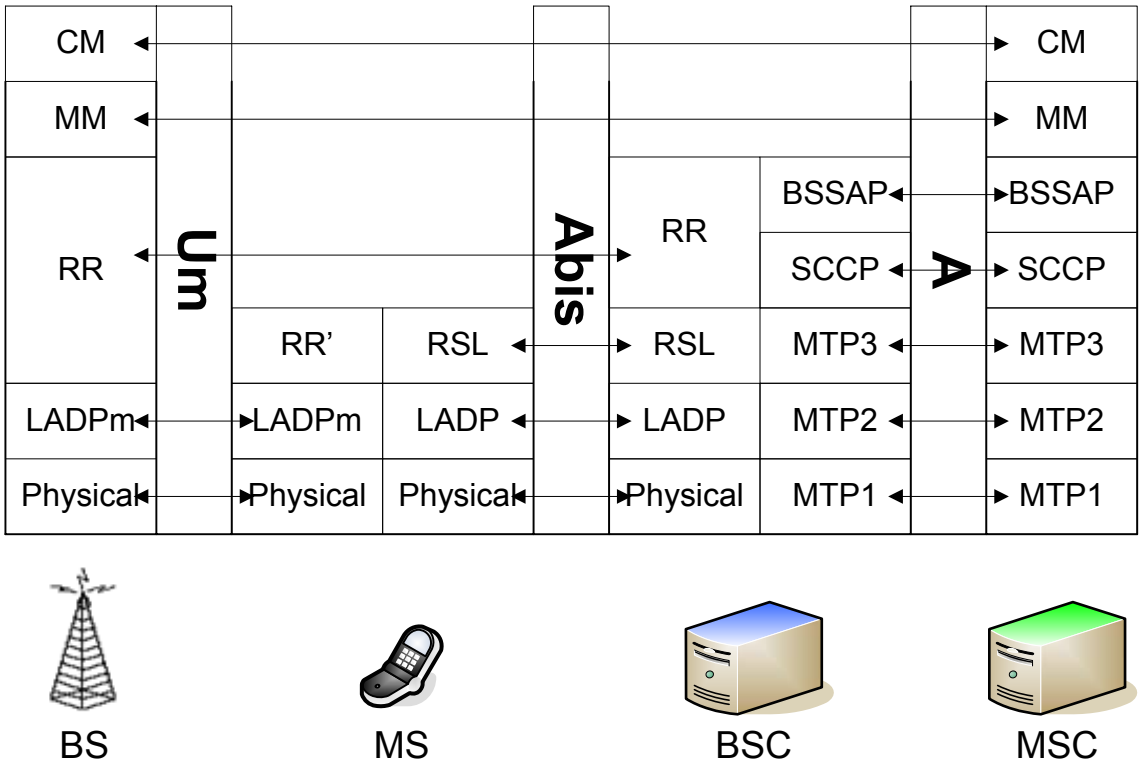
Αυτή η διεπαφή καθορίζεται στο BSS (Base Station Subsystem), μεταξύ του BTS (Base Transceiver Station) ή αλλιώς ΣΒ και του BSC (Base Station Controller). Εξασφαλίζει τη μετάδοση της πληροφορίας και της ομαλής σηματοδοσίας. Δύο τύποι καναλιών υποστηρίζονται από αυτήν την διεπαφή:

- τα κανάλια κίνησης που μεταφέρουν την πληροφορία (φωνής ή στοιχείων), η οποία και διαβιβάζεται στο κανάλι TCH,
- ένα ή περισσότερα κανάλια σηματοδοσίας.

Η διεπαφή Abis είναι βασισμένη σε τρία στρώματα:

Στρώμα 1: Το φυσικό στρώμα, αρμόδιο για τη μετάδοση της πληροφορίας και της ομαλής σηματοδοσίας στα κανάλια, είτε της κυκλοφορίας, είτε της σηματοδοσίας. Αυτό το στρώμα είναι είτε ψηφιακό (με ρυθμό μετάδοσης 2048 kbit/s που αντιστοιχεί σε δομή πλαισίων των 32 * 64 kbit/s χρονικών διαμερήσεων), είτε αναλογικό. Στη τελευταία περίπτωση, την πληροφορία διαχειρίζεται ο διαποδιαμορφωτής.

Στρώμα 2: Το στρώμα ζεύξης δεδομένων που είναι βασισμένο στο πρωτόκολλο LADP και υποστηρίζει τα διαφορετικά μηνύματα, όπως σηματοδοσία μεταξύ του ΚΤ και του δικτύου, καθώς επίσης και του ελέγχου και της συντήρησης του BTS. Αυτό το στρώμα εγγυάται τη ποιότητα των μεταδόσεων.



Σχήμα 5.2. Στιβάδα πρωτοκόλλων σε διαφορετικές διεπαφές

Στρώμα 3: Το στρώμα δικτύου είναι βασισμένο στις τεχνικές προδιαγραφές του προτύπου GSM, με τις πρόσθετες διαδικασίες του ελέγχου των ραδιοπόρων. Αυτό το στρώμα είναι αρμόδιο για τη διαχείριση των μηνυμάτων που προαναφέρθηκαν. Για τα μηνύματα σηματοδοσίας, δύο περιπτώσεις υπάρχουν: είτε τα μηνύματα μπορούν να είναι "διαφανή", οπότε και ανταλλάσσονται μεταξύ του ΚΤ και του BSC ή του MSC για τα οποία ο BTS ενεργεί μόνο ως επαναλήπτης, είτε “μη διαφανή”, περιέχοντας εντολές μεταξύ του BTS και του BSC.

5.1.2. Διεπαφή μεταξύ MSC – BSS: Η διεπαφή A

Αυτή η πλήρως τυποποιημένη διεπαφή καθορίζεται μεταξύ του BSS (Base Subsystem Station) και του MSC (Mobile Switching Center services). Υποστηρίζει τη μετάδοση της πληροφορίας και της ομαλής σηματοδοσίας. Είναι σε θέση να διαχειριστεί και να υποστηρίξει όλους τους τύπους υπηρεσιών, που προσφέρονται στους συνδρομητές του GSM δικτύου. Δύο τύποι μηνυμάτων έχουν καθοριστεί για αυτή τη διεπαφή:

- μηνύματα που υπολογίζονται από το BSC, που χειρίζεται τη ραδιοδιαχείρηση των πόρων (υπόστρωμα BSSAP),
- μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ του ΚΤ και του MSC, για τους οποίους το BSC είναι μόνο επαναλήπτης (υπόστρωμα).

Ένας μηχανισμός κατανομής επιτρέπει σωστή μετάδοση των μηνυμάτων σύμφωνα με τον τύπο των BSSAP.

5.1.3. Χαρακτηριστικά της πληροφορίας προερχόμενης από τις διεπαφές στο GSM

Προκειμένου να εξαχθούν τα στοιχεία σχετικά με τη θέση του χρήστη στο δίκτυο GSM, εξετάζουμε τα δεδομένα σηματοδοσίας μεταξύ του ΚΤ και του BTS. Η πληροφορία που διαβάζουμε στη διεπαφή Abis περιλαμβάνει:

- Ταυτότητα κυψέλης: Αυτό είναι ο αριθμός της εξυπηρετούσας κυψέλης.
- ΤΑ (προπορεία συγχρονισμού): Είναι μια διαδικασία που αποτελείται, για έναν ΚΤ, της πρόγνωσης της εκπομπής της ριπής, έτσι ώστε να παραληφθεί από το BTS κατά τη διάρκεια χρονικής διαμέρησης, λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο διάδοσης.
- Αποτελέσματα Μέτρησης Δικτύου (Network Measurement Results): Είναι οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται τακτικά από το ΚΤ στο τρέχοντα κανάλι, και στέλνονται στο BTS. Χάρη σε αυτές τις μετρήσεις μπορεί να περιγραφεί το περιβάλλον ραδιοκάλυψης στο οποίο κινείται το ΚΤ. Κατόπιν συγκρίνουμε αυτό το "περιβάλλον" με τη βάση δεδομένων που περιέχει προκαθορισμένα "περιβάλλοντα", κατά τη διάρκεια της φάσης εκμάθησης / εκτίμησης.

Τα NMR περιέχουν πληροφορία των ακόλουθων τύπων:

1. δείκτης λαμβανόμενης έντασης σήματος (Received Signal Strength Indicator): Η καταγεγραμμένη ισχύς λαμβανομένου σήματος. Οι μετρήσεις γίνονται στο φέροντα GSM BCCH κανάλι, έχοντας ως σημείο αναφοράς τη κεραία του ΚΤ,

2. ποιότητα λαμβανομένου σήματος (Received Signal Quality): Μέτρηση της ποιότητας του λαμβανομένου σήματος,

3. BSIC (Base Station Identifier Code): Ο κώδικας χρώματος που επιτρέπει τη διάκριση δύο BTS που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα στο κανάλι μετάδοσης.

Επιπλέον, τα στοιχεία που απαντώνται στη διεπαφή Α χρησιμοποιούνται κυρίως για να γνωρίζουμε την ταυτότητα του συνδρομητή (IMSI, TMSI, IMEI).

5.2. Σηματοδοσία (αρχή της μεθόδου εξέτασης της διεπαφής Iub)

Οι διεπαφές που απαντώνται στο UTRAN είναι δύο εσωτερικές διεπαφές (Iub, Iur) καθώς και διεπαφές στο UE (Uu) και το κεντρικό δίκτυο (Iu). Στις ακόλουθες παραγράφους, εξετάζουμε τη διεπαφή Iub στο επίγειο ραδιοδίκτυο πρόσβασης UMTS (UTRAN). Η διεπαφή Iub καθορίζεται μεταξύ του RNC και του κόμβου Β.

5.2.1. Γενικές Αρχές των διεπαφών στο UTRAN

Οι διεπαφές πρέπει να βασίζονται σε ένα λογικό πρότυπο της οντότητας που ελέγχεται μέσω αυτής της διεπαφής. Το επίπεδο "Transport Network Control" είναι ένα λειτουργικό επίπεδο στη δομή του πρωτοκόλλου της διεπαφής, που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του κομιστή μεταφοράς. Το πραγματικό πρωτόκολλο σηματοδοσίας το οποίο χρησιμοποιείται στο επίπεδο "Transport Network Control" εξαρτάται από την τεχνολογία κάτω από το στρώμα μεταφοράς. Πρόθεση δεν είναι ο καθορισμός ενός νέου συγκεκριμένου τμήματος εφαρμογής UTRAN για το επίπεδο "Transport Network Control", αλλά η χρήση τυποποιημένων πρωτοκόλλων σήματος από άλλες ομάδες (εάν είναι απαραίτητο) για την εφαρμοσμένη τεχνολογία στρώματος μεταφοράς.

5.2.2. Η διεπαφή Iub

Η μεταφερόμενη πληροφορία μέσω της διεπαφής Iub μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως ακολούθως:

Σηματοδοσία σχετική με ραδιο-εφαρμογές: Η διεπαφή Iub επιτρέπει στα RNC και Node B τη διαπραγμάτευση για ραδιο-πόρους, για παράδειγμα την πρόσθεση ή αφαίρεση κυψελών που ελέγχονται από τον Node B, προκειμένου να υποστηριχτεί η επικοινωνία της αποκλειστικής σύνδεσης μεταξύ των UE και SRNS.

Πλοκάδες ραδιο-πλαισίων: Η διεπαφή Iub παρέχει τα μέσα για τη μεταφορά πλοκάδων ραδιο-πλαισίων στην ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη, μεταξύ των RNC και Node B. Η μεταφορά αυτή μπορεί να χρησιμοποιήσει ήδη ορισμένες ζεύξεις μετάδοσης.

Εκτιμήσεις ποιότητας ραδιο-πλαισίων και δεδομένων συγχρονισμού: Η συνάρτηση συνδυασμού μακρο-πολυπλοκότητας του RNC χρησιμοποιεί τις εκτιμήσεις ποιότητας του Node B για τις πλοκάδες ραδιο-πλαισίων ανερχόμενης ζεύξης. Υπάρχει επίσης ανάγκη για ακριβή χρονικό συγχρονισμό μεταξύ των κλάδων ήπιας διαπομπής.

Ένα ή περισσότερα ρεύματα δεδομένων μέσω της διεπαφής Iub μεταξύ του RNC και ενός Node B, με κάθε ένα από αυτά να αντιστοιχούν σε μία ή περισσότερες κυψέλες που ανήκουν στο Node B. Η διαδικασία διαχωρισμού αναλύεται στις επόμενες παραγράφους:

5.2.2.1. Συνδυασμός μακρο-πολυπλοκότητας πλοκάδων ραδιο-πλαισίων

Ο Node B έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης συνδυασμού/διαχωρισμού μακρο-πολυπλοκότητας ρευμάτων δεδομένων κατά την επικοινωνία του με τις κυψέλες. Το RNC εκτελεί συνδυασμό/διαχωρισμό μακρο-πολυπλοκότητας ρευμάτων δεδομένων Iub που είτε ελήφθησαν είτε εστάλησαν σε έναν ή περισσότερους Node B.

5.2.2.2. Έλεγχος τοπολογίας συνδυασμού/διαχωρισμού μακρο-πολυπλοκότητας

Κατά την αίτηση πρόσθεσης νέας κυψέλης για ΚΤ σε σύνδεση UTRAN, το RNC μπορεί επιλεκτικά να ζητήσει στο Node B ένα νέο ρεύμα δεδομένων Iub, οπότε και η λειτουργία συνδυασμού/διαχωρισμού μακρο-πολυπλοκότητας στο Node B δεν χρησιμοποιείται για αυτή τη

κυψέλη. Σε αντίθετη περίπτωση, ο Node B λαμβάνει την απόφαση για το εάν η λειτουργία συνδυασμού/διαχωρισμού μακρο-πολυπλοκότητας θα χρησιμοποιηθεί από το Node B για τη συγκεκριμένη κυψέλη π.χ. αν ένα νέο ρεύμα δεδομένων Iub θα προστεθεί ή όχι.

5.2.2.3. Απόφαση ήπιας διαπομπής

Προκειμένου να υποστηριχτεί κινητικότητα του ΚΤ σε συνδέσεις UTRAN μεταξύ κυψελών, το UTRAN χρησιμοποιεί αναφορές μέτρησης από το ΚΤ και ανιχνευτές στις κυψέλες. Το RNC παίρνει την απόφαση για πρόσθεση ή αφαίρεση κυψελών από τη σύνδεση.

5.2.2.4. Χειρισμός των υλικών πόρων του Node B

Αντιστοίχιση των λογικών πόρων του Node B σε υλικούς πόρους του Node B, που χρησιμεύει σε ρεύμα δεδομένων Iub καθώς και στην εκπομπή/λήψη δεδομένων ελέγχου, γίνεται στο Node B.

5.2.3. Χαρακτηριστικά της πληροφορίας προερχόμενης από τις διεπαφές στο UMTS

Μετρήσεις που έγιναν στους ραδιοδίαυλους (εξυπηρετούσης και γειτονικών κυψελών), που μπορούν να εξεταστούν στη διεπαφή Iub περιλαμβάνουν:

1. Εντάσεις λαμβανομένων σημάτων (εξυπηρετούσης και γειτονικών κυψελών),

2. Εκτίμηση των περιβαλλόντων διάδοσης (π.χ. μεγάλη ταχύτητα, μικρή ταχύτητα, δορυφορικό, και άλλα),

3. Κλίμακα μετάδοσης (π.χ. κάνοντας χρήση του χρόνου πλήρους διαδρομής),

4. Μετατόπιση Doppler,

5. Κατάσταση συγχρονισμού,

6. Λαμβανόμενο επίπεδο παρεμβολών.

Επικεντρωνόμαστε στη σηματοδοσία που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της “intra-mode” διαπομπής. Αυτή η διαπομπή εξαρτάται από τις μετρήσεις επιπέδων ισχύος του καναλιού CPICH ([HT01]), οι οποίες περιλαμβάνουν:

1. Λαμβανόμενη ισχύς κώδικα σήματος (RSCP),

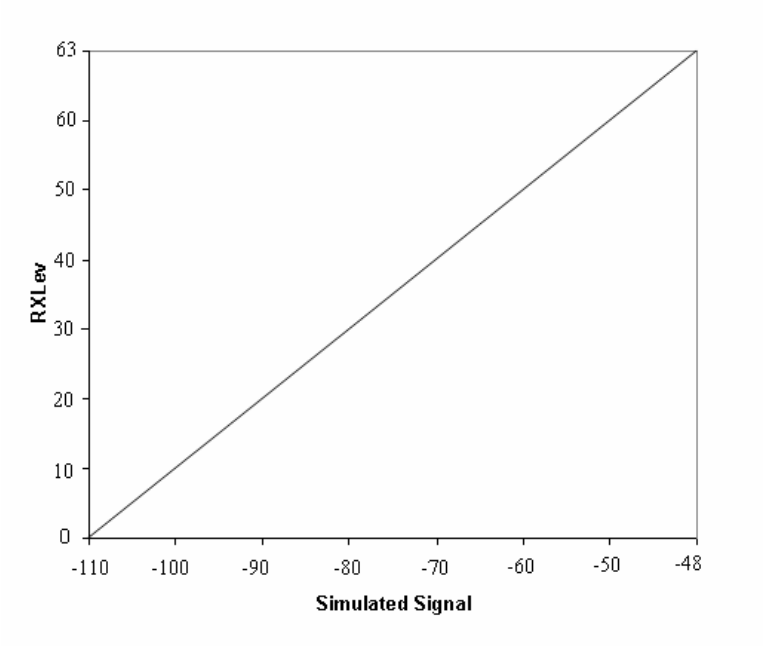
2. Δείκτης λαμβανομένης ισχύος σήματος (RSSI), όπου δείχνει τη λαμβανόμενη ισχύ ευρυζωνικού σήματος μέσα στο σχετικό εύρος ζώνης καναλιών. Οι μετρήσεις εκτελούνται στο φορέα κατερχόμενης ζεύξης UTRAN, έχοντας ως σημείο αναφοράς τη κεραία του ΚΤ.

3. Το Ec/No εξαγόμενο από την αναλογία RSCP/RSSI.

Άλλη μέτρηση περιλαμβάνει τη σχετική πληροφορία συγχρονισμού μεταξύ των κυψελών.

5.3. RSSI Διάνυσμα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί νωρίτερα στο κεφάλαιο αυτό ερευνώντας τις διεπαφές αέρος, κατά τη διάρκεια μιας τηλεφωνικής κλήσεως το ΚΤ πραγματοποιεί διάφορες μετρήσεις (RSS αναφορές). Οι μετρήσεις αυτές διαβιβάζονται στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και μπορούν να ανιχνευτούν στη διεπαφή αέρα. Το ΚΤ μετρά το επίπεδο και την ποιότητα της ριπής κατερχόμενης ζεύξης κατά τη διάρκεια της σύνδεσης, όπως και το επίπεδο ισχύος σήματος των γειτονικών κυψελών.



Σχήμα 5.3. Μετασχηματισμός στάθμης λαμβανόμενου σήματος σε δίκτυο GSM

Σε δίκτυο GSM, έχουμε αναφορές μέτρησης κάθε 480ms ([GSM99]). Το επίπεδο ισχύος σήματος βρίσκεται στο διάστημα -110dBm έως -48dBm. Στην περίπτωση αυτή, θεωρούμε πως το κινητό βρίσκεται σε κατάσταση "ενεργούς" σύνδεσης ([SKS03]). Ο ακόλουθος μετασχηματισμός (βλέπε σχήμα 5.3) χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωσή μας. Σε δίκτυο UMTS, έχουμε αναφορές μέτρησης κάθε 10ms. Το επίπεδο ισχύος του ραδιοκύματος της κατερχόμενης ζεύξης, το οποίο μετρά το ΚΤ ανήκει στο διάστημα -94dBm έως -32dBm [3GPP99]. Στην περίπτωση αυτή, θεωρούμε πως το κινητό βρίσκεται σε κατάσταση "PMM connected" [SKS03] και πιο συγκεκριμένα "Cell Connected Mode", σύμφωνα με το διάγραμμα κατάστασης RRC [3GPP01].

Σύμφωνα με το σενάριο προσομοίωσης που ακολουθήσαμε, ένα ΚΤ ταξιδεύει κατά μήκος συγκεκριμένης οδού. Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του εκτελεί μετρήσεις στάθμης σήματος κατερχόμενης ζεύξης (μετρήσεις RSS όπως έχουν ήδη περιγραφεί) τόσο του εξυπηρετούντος ΣΒ όσο και των γειτονικών ΣΒ. Θεωρούμε ότι ΚΤ παρατηρεί $N+1$ το πλήθος κανάλια ελέγχου εκπεμπόμενα από $N+1$ το πλήθος ΣΒ (του εξυπηρετούντος και των γειτονικών ΣΒ). Θεωρούμε επίσης ότι κάθε ένα από τα $N+1$ εκπεμπόμενα σήματα λαμβάνεται σε τέτοιο επίπεδο που επιτρέπει μια ακριβή μέτρηση RSS. Σήματα που λαμβάνονται κάτω από ένα δεδομένο κατώτατο όριο, δεν

συμπεριλαμβάνονται στις $N+1$ μετρήσεις. Υποθέτουμε ότι υπάρχει ένα προς ένα αντιστοίχιση θέσης με τις RSS μετρήσεις στη συγκεκριμένη θέση.

Δεδομένου ότι μια θέση ορίζεται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες της $z=[x,y]^T$, μπορούμε να την συσχετίσουμε με μοναδικό RSSI διάνυσμα (διάνυσμα ισχύος λαμβανομένου σήματος) διάστασης $(N+1)\times 2$, έστω p^i το οποίο και ορίζουμε ως:

$$p^i=\begin{bmatrix} RSSI_0 & cell_0 \\ & \dots \\ RSSI_k & cell_k \\ & \dots \\ RSSI_N & cell_N \end{bmatrix},$$

όπου:

$RSSI_k$ είναι το επίπεδο στάθμης λαμβανομένου σήματος κατερχόμενης ζεύξης στη θέση i από το ΣΒ $cell^k$,

$cell^k$ είναι ο k-οστός ΣΒ,

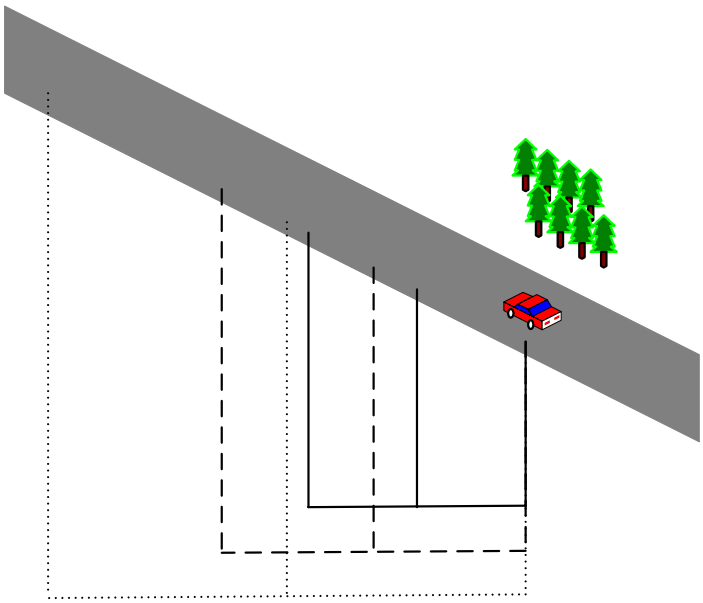
$0\le k\le N$ για τον εξυπηρετών ΣΒ και N το πλήθος γειτονικών ΣΒ.

Κατά τη μοντελοποίησή μας, το διάνυσμα ισχύος λαμβανομένου σήματος p^i στη θέση i ορίζεται ως ακολούθως:

$p^i=\begin{bmatrix} RSSI_w & cell_w \end{bmatrix}$ όπου $0\le w\le N$ και $cell_w$ είναι ο εξυπηρετών ΣΒ.

Κινούμενο το ΚΤ κατά μήκος της εξεταζόμενης οδού, δημιουργεί αναφορές μέτρησης, κάθε 480 ms σε δίκτυο GSM και κάθε 10 ms σε δίκτυο UMTS. Μέσα σε αυτά τα χρονικά διαστήματα, το ΚΤ διανύει απόσταση, η οποία εξαρτάται από την άγνωστη ταχύτητα. Κατά συνέπεια, βασιζόμενοι είτε σε πραγματικούς χάρτες ραδιοκάλυψης είτε σε μοντελοποίηση διάδοσης απώλειας σήματος της αντίστοιχης περιοχής, δημιουργούμε ακολουθίες μετρήσεων ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως του υπό εξέταση ΚΤ, οι οποίες έχουν άμεση σχέση με την ταχύτητα του ΚΤ. Αποδεκτές ταχύτητες για το ΚΤ κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης περιλαμβάνονται στο διάστημα [20, 110] (km/h). Το πλήθος των στοιχείων ακολουθίας μετρήσεων ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως είναι 50 μετρήσεις σε δίκτυα GSM (24 sec) και 500 μετρήσεις σε δίκτυα UMTS (5 sec). Στο σχήμα 5.4 απεικονίζονται ακολουθίες μετρήσεων ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως ΚΤ κινούμενου με διαφορετική ταχύτητα. Οι ακολουθία a={a1, a2, a3} αντιστοιχεί σε ταχύτητα ΚΤ υ_1, η ακολουθία b={b1, b2, b3} αντιστοιχεί σε ταχύτητα ΚΤ υ_2, ενώ η ακολουθία c={c1, c2, c3} αντιστοιχεί σε ταχύτητα ΚΤ υ_3, όπου $\upsilon_1<\upsilon_2<\upsilon_3$. Αν κατά την HMM μοντελοποίηση, η τυχαία ακολουθία μετρήσεων z του ΚΤ που κινείται με ταχύτητα υ_x συγκρινόμενη με τις ακολουθίες a, b και c,

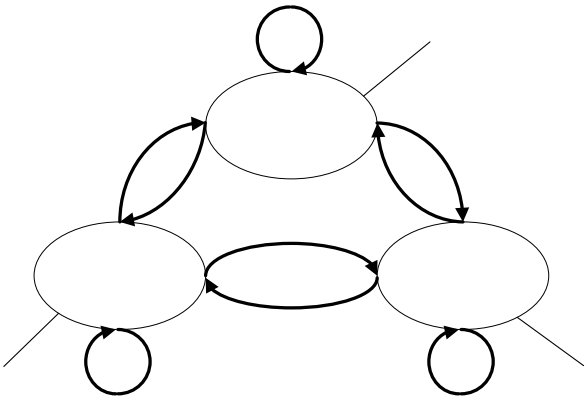
μας δώσει υψηλότερη τιμή πιθανοφάνειας, συγκρινόμενη με την ακολουθία μετρήσεων b, τότε το ΚΤ είναι πολύ πιθανό να κινείται με ταχύτητα υ_2.



Σχήμα 5.4. Ακολουθίες μετρήσεων ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως ΚΤ κινούμενου με διαφορετική ταχύτητα

Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε ακολουθία μετρήσεων ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως ΚΤ, θα πρέπει πρώτα να την κατατμήσουμε σε καταστάσεις. Έστω ότι επεξεργαζόμαστε την παρακάτω ακολουθία:

S = {31, 32, 34, 31, 35, 35, 36, 37, 39, 38, 33, 34, 33}. Έστω ότι την χωρίζουμε σε 3 ομάδες. Το μοντέλο κατάστασης θα έχει τη δομή του σχήματος 5.5.



Σχήμα 5.5. Μοντέλο HMM τριών (3) καταστάσεων

5.4. Περιβάλλον Διάδοσης

Στη βιβλιογραφία βρίσκουμε διαφορετικές προσεγγίσεις κατά τη μοντελοποίηση ασύρματης διάδοσης. Μια από αυτές στηρίζεται στον απλό κανόνα εξασθένησης στάθμης σήματος, εξετάζοντας την απόσταση από τη συσκευή εκπομπής, τόσο σε συνθήκες LOS όσο και σε συνθήκες NLOS. Η μοντελοποίηση αυτή προέρχεται από τον εμπειρικό τύπο που δίνεται από τον Hata ([H80]), στηριζόμενος σε προηγούμενη εργασία του Okumura ([OOKF68]), βασισμένη σε εκτενείς πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στη δεκαετία του '60 στην Ιαπωνία. Κατά την προσαρμογή του μοντέλου των Okumura - Hata σε συστήματα μικρο-κυψελών, υπάρχει πειραματική απόδειξη ενός εκθέτη, αντίστροφος ανάλογου της ισχύος της στάθμης σήματος, ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των συσκευών εκπομπής και λήψης. Προκειμένου να αναπαραστήσουν τη διακύμανση αυτή όσο πιο πιστά μπορούσαν, οι επιχειρήσεις τηλεπικοινωνιών άρχισαν να χρησιμοποιούν μοντέλα απώλειας σήματος τα οποία χαρακτηρίζονταν από μία οριακή απόσταση, κατά την οποία ο εκθέτης, ο αντιστρόφως ανάλογος της ισχύος, αλλάζει τιμή από 2 σε μια τιμή στο διάστημα από 4 έως 10. Αυτές οι υψηλής τάξεως εκθετικές δυνάμεις παρουσιαζόμενες μετά από ένα οριακό σημείο, έχουν αναφερθεί επανειλημμένως στη βιβλιογραφία ([BL95], [_96], [EGT99], [FBR94], [G89]). Τα παραπάνω μοντέλα τα βλέπουμε να απλουστεύουν μοντέλα παρεμβολής δύο και τεσσάρων ακτινών καθώς και μοντέλα πολλαπλής διόδευσης με τον προαναφερθέντα εκθέτη να παίρνει τιμές μόνο μέχρι 4,5 ([BHMX94], [MBX93]).

Μια άλλη προσέγγιση βασίζεται στην ιχνηλάτηση ακτινών ([RWG97], [SDR92], [TT95]). Στην περίπτωση αυτή, ανταλλάσσουμε την απλότητα ενός μοντέλου εκθετικών δυνάμεων με την πολυπλοκότητα μιας ακριβούς αριθμητικής λύσης. Κατά την μοντελοποίηση της ιχνηλάτησης ακτινών υποθέτουμε ότι οι ιδιότητες θέσης και διάθλασης όλων των αντικειμένων που επηρεάζουν τη διάδοση είναι γνωστές με ακρίβεια. Έτσι, γίνεται εφικτός ο υπολογισμός των παρεμβολών στο δέκτη. Συνήθως, υποθέτουμε ότι τα γεωμετρικά οπτικά όρια της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών

Κατάσταση 1

κυμάτων είναι επαρκή, ενώ έχουν προταθεί πιο ρεαλιστικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τη τραχύτητα τοίχων κτιρίων, που οδηγούν σε σκέδαση προς όλες τις κατευθύνσεις ([TJ99]).

Μια τρίτη προσέγγιση είναι πιθανοθεωρητικής φύσεως ισορροπώντας μεταξύ των εμπειρικών μοντέλων εκθετικής δύναμης, που κάνουν χρήση πειραματικών στοιχείων και την ακρίβεια αριθμητικών προσομοιώσεων του μοντέλου ιχνηλάτησης ακτινών. Σε αυτήν την περίπτωση, το περιβάλλον διαμορφώνεται πιθανοθεωρητικά, χρησιμοποιώντας μερικές παραμέτρους καθώς και αναλυτικούς τύπους. Ένα από τα μοντέλα αυτά είναι ο κυματοδηγός multislit ([B98], [BGL98], [MBL98]) που ισχύει σε συνθήκες διάδοσης LOS κατά μήκος μιας ευθείας οδού με τυχαία κατανεμημένα τοίχους, κτήρια και χάσματα μεταξύ τους. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη του πολλές παραμέτρους, όπως το πλάτος οδών, τη μέση κατανομή κτηρίων κατά μήκος της οδού, τις ηλεκτρικές ιδιότητες των τοίχων των κτηρίων, το ύψος και την τοποθεσία των κεραιών εκπομπής. Ένα παρόμοιο πιθανοθεωρητικό μοντέλο για συνθήκες διάδοσης NLOS έχει προταθεί στις [BA02], [BKC01]. Αυτό είναι επίσης ένα πολυ-παραμετρικό μοντέλο, που χρησιμοποιεί μέχρι και έξι παραμέτρους προκειμένου να δώσει μια ακριβή περιγραφή των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του εδάφους αλλά και του μηχανισμού διάδοσης.

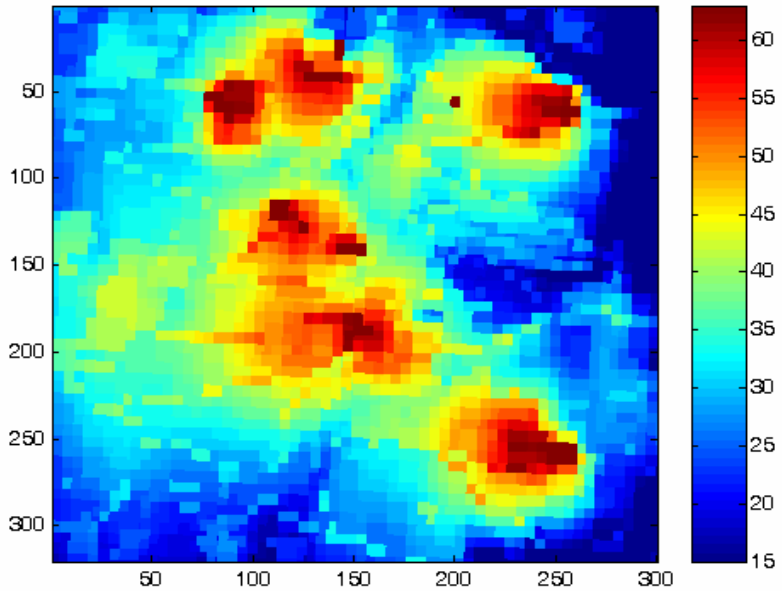
Μια τελείως διαφορετική φιλοσοφία παρουσιάζεται από την πιθανοθεωρητική προσέγγιση στις [FMP99] και [MPF99]. Στόχος αυτών των εργασιών είναι η δημιουργία ενός μοντέλου με το ελάχιστο πλήθος παραμέτρων το οποίο μπορεί επίσης να δώσει ικανοποιητικά ακριβή πληροφορία κατά την περιγραφή των συνθηκών διάδοσης. Οι συγγραφείς προτείνουν τη μοντελοποίηση μιας αστικής περιοχής χρησιμοποιώντας μόνο μια παράμετρο, η οποία είναι η πυκνότητα των εμποδίων στο περιβάλλον διάδοσης. Εξετάζουν το πρόβλημα της διείσδυσης ακτινών μέσα στο μέσο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός τύπου για το βάθος της διάδοσης ενός κύματος, εισερχομένου στο μέσο υπό δεδομένης γωνίας. Παρόλα αυτά, η μελέτη τους, δεν εξετάζει την εξασθένηση του σήματος, ενώ περιορίζεται στη διάδοση δύο διαστάσεων, μέσω εμποδίων που ακολουθούν τη μοντελοποίηση πλέγματος τύπου Manhattan.

5.4.1. Χάρτης Ραδιοκάλυψης

Στην πρώτη από τις δύο περιπτώσεις κατά τη μοντελοποίηση του περιβάλλοντος διάδοσης μέσα στο οποίο κινείται το ΚΤ, κάνουμε χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης της εταιρείας Cosmote για τη συγκεκριμένη περιοχή εξέτασης (σχήμα 5.6.). Ο χάρτης αυτός έχει προκύψει από επεξεργασία των μετρήσεων που έχει κάνει η εταιρεία με λογισμικό πρόβλεψης απωλειών διάδοσης. Έτσι, μπορούμε να έχουμε σε οποιαδήποτε θέση της εξεταζόμενης περιοχής, μετρήσεις της στάθμης ισχύος του εξυπηρετούντος ΣΒ όπως και των γειτονικών ΣΒ.

Σε πραγματικά σενάρια κίνησης ΚΤ, οι μετρήσεις της στάθμης ισχύος επηρεάζονται έντονα από διαλείψεις. Η διάλειψη οφείλεται στο φαινόμενο της πολλαπλής διόδευσης με χαρακτηριστικά διακύμανσης ως προς το χώρο. Κατά τη κίνηση του ΚΤ η διάλειψη αποκτά επιπλέον

χαρακτηριστικά διακύμανσης ως προς τον χρόνο. Οι δύο τύποι διαλείψεων είναι η αργή ([LBC98]) και η ταχεία διάλειψη. Η τελευταία είναι επίσης γνωστή και ως πολλαπλής διόδευση. Η τελευταία επηρεάζει τις "λεπτομέρειες " του σήματος, ενώ η αργή διάλειψη επηρεάζει τη μέση λαμβανόμενη ισχύ οφειλόμενη από σχετικά σταθερά κατά τη διάρκεια του χρόνου εμπόδια. Δεδομένου πως για συγκεκριμένη θέση σε κυψελωτά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών, το επίπεδο μέσης τοπικής ισχύος σήματος είναι σχετικά σταθερό, στο χάρτη ραδιοκάλυψης προσθέσαμε διάλειψη Rayleigh. Με το τρόπο αυτό προσπαθήσαμε να αναπαραστήσουμε με όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό τρόπο τις επιπτώσεις της ταχείας διάλειψης ([WC99]). Στη βιβλιογραφία, κατά τη διαδικασία αντίστοιχης μοντελοποίησης, αναφέρεται πως η ταχεία διάλειψη ισοσταθμίζεται. Μια τέτοια υπόθεση όμως δεν οδηγεί σε επιτυχή μοντελοποίηση της πραγματικότητας ([WC01]). Κατά τη διαδικασία της δικής μας υλοποίησης προσθέσαμε διακυμάνσεις σήματος της τάξης των $\pm 2\,dB$ που ακολουθούν τη κανονική κατανομή παρόλη την ύπαρξη πολυπλοκότερων Μαρκοβιανών μοντέλων για διαλείψεις Rayleigh ([BMG02], [ZRM97]). Σε GSM δίκτυα η πεδιομέτρηση είχε ανάλυση 10μ x 10μ, ενώ σε UMTS δίκτυα



Σχήμα 5.6. Χάρτης ραδιοκάλυψης

5.4.2. Μοντελοποίηση διάδοσης σήματος

Η μοντελοποίηση διάδοσης σήματος έχει βασιστεί σε δύο μοντέλα διάδοσης, στο Okumura-Hata μοντέλο (παράγραφοι 5.4.2.1. και 5.4.2.2.) και στο μοντέλο δύο ακτίνων (παράγραφοι 5.4.2.3., 5.4.2.4. και 5.4.2.5.). Το τελευταίο έχει χωριστεί σε υπο-μοντέλα, περιγράφοντας διαφορετικά είδη οδών. Έτσι διακρίνουμε περιπτώσεις για τις οδούς με συνθήκες διάδοσης LOS, για τις οδούς οι οποίες είναι κάθετες στην οδό με συνθήκες διάδοσης LOS, καθώς και για τις οδούς οι οποίες είναι παράλληλες στην οδό με συνθήκες διάδοσης LOS, οι οποίες παρουσιάζουν διαφορές στην απώλεια σήματος κατά τη διάδοση ([W88]).

5.4.2.1. Μοντέλο Okumura-Hata

Το μοντέλο Okumura-Hata, είναι μια απλή εμπειρική προσέγγιση της πρόβλεψης της στάθμης σήματος σε περιβάλλοντα μακρο-κυψελών για συχνότητες σήματος μεταξύ 200 MHz και 2GHz με κατακόρυφη πόλωση. Η απλότητα του μοντέλου αυτού έγκεται στο μικρό υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για την εκτίμηση ισχύος του σήματος, δεδομένου ότι μόνο οι ακόλουθες τέσσερις (4) παράμετροι λαμβάνονται υπόψην:

- η συχνότητα f,
- η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη d,
- το ύψος της κεραίας του πομπού h_t,
- το ύψος της κεραίας του δέκτη h_r.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι δεν λαμβάνεται υπόψην από το μοντέλο η εδαφολογική διαμόρφωση της υπό εξέταση περιοχής, όπως επίσης σκιάσεις ή διαθλάσεις στο δέκτη.

Οι περιορισμοί του μοντέλου Okumura-Hata είναι οι ακόλουθοι:

- f = 150 – 1500 MHz,
- d = 0.5 – 20 km,
- h_t = 30 – 200 m,
- h_r = 1 – 10 m.

Έχοντας τα παραπάνω ως διαθέσιμα, η εξασθένηση σήματος σε αστικά περιβάλλοντα υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (1), η οποία είναι η βασική εξίσωση υπολογισμού, ενώ ακολουθούν οι διαφορετικοί όροι διόρθωσης, ανάλογα με το περιβάλλον εξέτασης.

$$L = 69.55 + 26.16 \cdot \log\left(\frac{f}{MHz}\right) - 13.82 \cdot \log\left(\frac{h_t}{m}\right) - \frac{c(h_r)}{dB} + \left(44.9 - 6.55 \cdot \log\left(\frac{h_t}{m}\right)\right) \cdot \log\left(\frac{d}{km}\right)$$

(1),

όπου:

$$c(h_r) = \begin{cases} \left(1.1 \cdot \log\left(\frac{f}{MHz}\right) - 0.7\right) \cdot \frac{h_r}{m} - \left(1.56 \cdot \log\left(\frac{f}{MHz}\right) - 0.8\right) & (\alpha) \\ 8.29 \cdot \left[\log\left(1.54 \frac{h_r}{m}\right)\right]^2 - 1.1 & (\beta) \\ 3.2 \cdot \left[\log\left(11.75 \frac{h_r}{m}\right)\right]^2 - 4.97 & (\gamma) \end{cases}$$

με την (α) περίπτωση να καλύπτει προαστιακές περιοχές, ενώ οι (β) και (γ) περιπτώσεις να αναφέρονται σε αστικά περιβάλλοντα όπου $f <$ 200 Hz και $f >$ 400 Hz αντίστοιχα. Τέλος αναφέρουμε κάποιες διορθωτικές εξισώσεις, για μη αστικά περιβάλλοντα διάδοσης (η περίπτωση (δ) αναφέρεται σε περιβάλλον χωριού ενώ η περίπτωση (ε) σε περιβάλλον υπαίθρου).

$$L_{rural} = \frac{L}{dB} - 2\left[\log\left(\frac{\frac{f}{28}}{MHz}\right)\right]^2 - 5.4 \quad (\delta)$$

$$L_{open} = \frac{L}{dB} - 4.78\left[\log\left(\frac{f}{MHz}\right)\right]^2 + 18.33 \cdot \log\left(\frac{f}{MHz}\right) - 40.94 \quad (\varepsilon)$$

5.4.2.2. Μοντέλο COST-Hata

Όπως αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο, το άνω όριο εξεταζόμενων συχνοτήτων του μοντέλου Okumura-Hata είναι τα 1500 MHz. Η αδυναμία του μοντέλου Okumura-Hata να καλύψει τη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ των 1500 MHz και 2100 MHz (π.χ. GSM1800, GSM1900, UMTS), ήταν η αφορμή για την ανάπτυξη προεκτάσεων του μοντέλου Okumura-Hata. Το πρόγραμμα COST-231 του COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research), είχε ως στόχο την επέκταση του μοντέλου Okumura-Hata, αναλύοντας τις εξισώσεις του Okumura στο άνω όριο της επιτρέπτης για το μοντέλο ζώνης συχνοτήτων (1500 MHz έως 2100 MHz). Το προκύπτων μοντέλο ονομάστηκε μοντέλο COST-Hata [D98].

$$L = 46.3 + 33.9 \cdot \log\left(\frac{f}{MHz}\right) - 13.82 \cdot \log\left(\frac{h_t}{m}\right) - \frac{c(h_r)}{dB} + \left(44.9 - 6.55 \cdot \log\left(\frac{h_t}{m}\right)\right) \cdot \log\left(\frac{d}{km}\right) + \frac{C_m}{dB}$$

(2)

όπου:

$$c(h_r) = \left(1.1 \cdot \log\left(\frac{f}{MHz}\right) - 0.7\right) \cdot \frac{h_r}{m} - \left(1.56 \cdot \log\left(\frac{f}{MHz}\right) - 0.8\right)$$

$$C_m = \begin{Bmatrix} 0\ dB & (\alpha) \\ 3\ dB & (\beta) \end{Bmatrix}$$

με την (α) περίπτωση να αναφέρεται σε μέσου μεγέθους πόλεις και προαστιακά κέντρα ενώ η (β) περίπτωση αναφέρεται σε μητροπολιτικά κέντρα. Η εφαρμογή του μοντέλου COST-Hata περιορίζεται σε περιβάλλοντα μακρο-κυψελών, όπου για παράδειγμα, ο ΣΒ τοποθετείται στο τελευταίο όροφο κτιρίων της εξεταζόμενης περιοχής.

5.4.2.3. Μοντέλο για οδούς με συνθήκες διάδοσης LOS

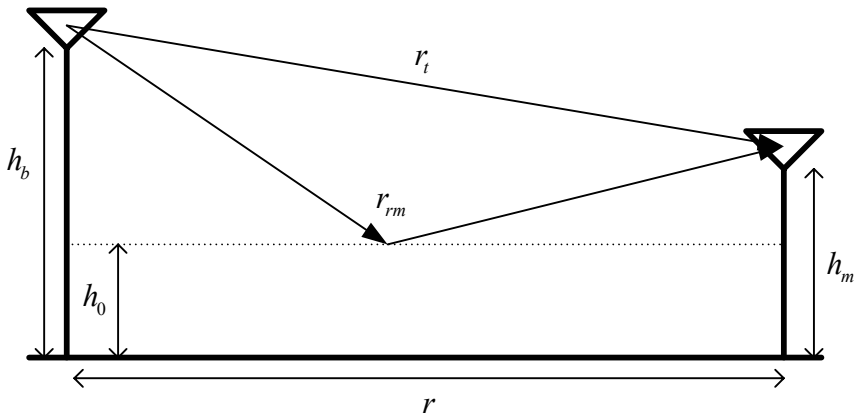
Μετρήσεις σε συνθήκες διάδοσης με οπτική επαφή, που πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος δρόμου σε αγροτική περιοχή έδειξαν ότι ένα μοντέλο δύο ακτίνων λειτουργεί καλά. Αυτό δείχνει ότι υπάρχουν δύο κυρίαρχα μονοπάτια διάδοσης: το απευθείας και το εξ'αντανακλάσεως από την επιφάνεια του δρόμου. Σε μία μικρο-κυψέλη σε αστικό περιβάλλον όμως, το πρότυπο αυτό δεν λαμβάνει υπόψη την απώλεια σήματος πέρα από μια απόσταση περίπου 100 μέτρων ([SBA02]). Η λάθος αυτή εκτίμηση παρουσιάζεται επειδή το μοντέλο των δύο ακτινών δεν λαμβάνει υπόψη τα εμπόδια, τα οποία υπάρχουν σε αστικό περιβάλλον. Μια τροποποιημένη έκδοση που περιγράφεται στην [OTH00], εισάγει έναν παράγοντα ορατότητας s, που οφείλεται σε σκίαση από εμπόδια όπως δέντρα και κολόνες φωτισμού, καθώς και μια επιφάνεια αντανάκλασης h_0, η οποία οφείλεται σε εμπόδια που παρουσιάζονται στο δρόμο, όπως οδική κυκλοφορία. Κατά την εφαρμογή της εξίσωσης (1), ο παράγων s πήρε την τιμή 0 ενώ ο παράγων h_0 πήρε την τιμή 1.4m, ακολουθώντας την προσομοίωση στη βιβλιογραφία σε παρόμοιο περιβάλλον διάδοσης ([SBA02]). Οι απώλειες διάδοσης PL_{LOS} όπως εκφράζονται στην [OTH00] έχουν ως εξής:

$$PL_{LOS}(r) = e^{-sr} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \cdot \left|\frac{1}{r_t} e^{-jkr_t} + R\frac{1}{r_{rm}} e^{-jkr_{rm}}\right|^2 \qquad (1)$$

όπου r είναι η απόσταση μεταξύ του ΣΒ και του δέκτη, λ είναι το μήκος κύματος, k είναι ο αύξων αριθμός κύματος, R είναι η συνδιακύμανση αντανάκλασης της επιφάνειας του δρόμου ([BL95]), r_t είναι η απόσταση μεταξύ του ΣΒ και του ΚΤ και r_{rm} είναι η απόσταση μέσω αντανάκλασης, η οποία εκφράζεται ως:

$$r_{rm} = \sqrt{r^2 + \{(h_b - h_0) + (h_m - h_0)\}^2} \qquad (2)$$

όπου h_b είναι το ύψος του ΣΒ και h_m το ύψος του ΚΤ, και τα δύο μετρημένα από την επιφάνεια του δρόμου.



Σχήμα 5.7. Μοντέλο απώλειας διάδοσης σήματος 2 διαδρομών (με συνθήκες διάδοσης LOS)

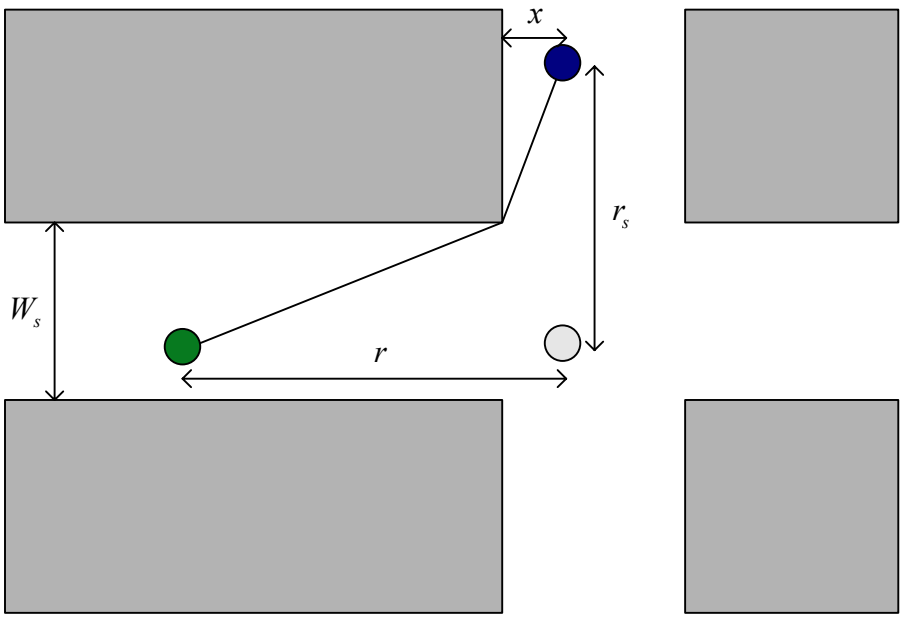
5.4.2.4. Μοντέλο για οδούς κάθετες στην οδό με συνθήκες διάδοσης LOS

Από μετρήσεις παρατηρήθηκε ότι στις οδούς που είναι κάθετες στην οδό με συνθήκες διάδοσης LOS, η απώλεια διάδοσης έχει μια γενική τάση αύξησης, αυξανομένης της απόστασης από τη διασταύρωση με την οδό LOS. Η μοντελοποίηση της απώλειας ισχύος κατά μήκος των κάθετων οδών που εξετάζονται στη περίπτωση αυτή, στηρίζεται σε μια τεχνική "εικονική πηγής" που προτάθηκε αρχικά στην [S00]. Εικονικές πηγές τοποθετούνται σε κάθε διασταύρωση κατά μήκος της οδού LOS και τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να έχουν την οπτική επαφή με το ΚΤ ευρισκόμενο στις κάθετες οδούς. Οι απώλειες διάδοσης όπως εκφράζονται στην [S00] έχουν ως εξής:

$$PL_{perp}(r) = a\left(\frac{\lambda}{4\pi r_s}\right)^2 \cdot \frac{2xW_s}{4\pi r^2} \qquad (3)$$

όπου r_s υποδηλώνει την απόσταση μεταξύ της εικονικής πηγής και του ΣΒ, x ισούται με την απόσταση μεταξύ του τοίχου και του ΣΒ, W_s υποδηλώνει το πλάτος της κάθετης οδού και r είναι η απόσταση μεταξύ της εικονικής πηγής και του ΚΤ. Ο παράγων a είναι μια εμπειρική παράμετρος, η οποία λαμβάνει υπόψη της διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών διάδοσης, κατά μήκος των διαφορετικών οδών. Κατά την εφαρμογή του παραπάνω τύπου ο παράγων a πήρε την τιμή 0.2, ακολουθώντας την προσομοίωση στη βιβλιογραφία σε παρόμοιο περιβάλλον διάδοσης ([SBA02]).

ΣΒ



Σχήμα 5.8. Μοντέλο απώλειας διάδοσης σήματος 2 διαδρομών (χωρίς συνθήκες διάδοσης LOS)

5.4.2.5. Μοντέλο για οδούς παράλληλες στην οδό με συνθήκες διάδοσης LOS

Παρατηρείται ότι στις οδούς που είναι παράλληλες στην οδό LOS, η μέση λαμβανόμενη ισχύς αυξάνεται με τοξοειδή τρόπο, καθώς το ΚΤ κινείται κατά μήκος της οδού πλησιάζοντας το ΣΒ. Η ακτίνα της κυρτότητας μειώνεται καθώς η απόσταση της παράλληλης οδού προς την οδό LOS αυξάνει. Το προτεινόμενο μοντέλο βασίζεται στο μοντέλο για τις οδούς κάθετες στην οδό με συνθήκες διάδοσης LOS. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, τοποθετείται μια εικονική πηγή στη διασταύρωση μεταξύ της παράλληλης και της κάθετης οδού, όπως προτάθηκε αρχικά στη [ZM00].

Στο μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε από την [JHWM99], έχουν προστεθεί πολλαπλές πηγές, μια σε κάθε διασταύρωση. Επίσης θεωρήσαμε ότι οι χωρικές μεταβολές συνιστωσών ισχύος εξεταζόμενες σε μικρή περιοχή, είναι αμοιβαία ασύνδετες, ενώ αθροίζονται στο δέκτη. Τέλος συμπεριελήφθη και ένας όρος που αντιπροσωπεύει την ισχύ που φθάνει άμεσα από το ΣΒ, είτε μέσω περίθλασης σε οροφές είτε μέσω διεισδύσεων σε κτίρια. Οι απώλειες διάδοσης όπως εκφράζονται στην [S00], για οδούς παράλληλες στην οδό με συνθήκες διάδοσης LOS, έχουν ως εξής:

ΚΤ

$$PL_{par} = \left[\sum_{n=0}^{N} a_n \left(\frac{\lambda}{4\pi r_{sn}} \right)^2 \cdot \frac{2xW_{sn}}{4\pi r_n^2} \cdot \frac{WW_{sn}}{4\pi R_{sn}^2} \right] + \left[\frac{1}{\beta R_{bm}} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{bm}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

όπου ο συμβολισμός είναι ο ίδιος όπως και στην (3) εκτός του όρου n όπου και έχει προστεθεί σε μερικές περιπτώσεις προκειμένου να προσδιορίσουμε μια παράμετρο σχετιζόμενη με την n-οστή κάθετη οδό με συνθήκες NLOS. Για $n = 0$ προσδιορίζεται η εικονική πηγή δίπλα στο σταθμό βάσης και R_{sn} είναι η απόσταση κατά μήκος της παράλληλης οδού προς το ΚΤ, έως την τομή της

εικονικής πηγής με την n-οστή οδό με συνθήκες NLOS. Η παράμετρος R_{bm} είναι η απόσταση του ΣΒ από το ΚΤ, β είναι μια εμπειρική σταθερά που προκύπτει από την εξασθένηση του σήματος, κατά μήκος συνήθως του μονοπατιού με εμπόδια μεταξύ του ΣΒ και του ΚΤ, ενώ W είναι το πλάτος της παράλληλης οδού.

Παραπομπές

[_96] ___, "*VHF/UHF wave attenuation in a city with regularly distributed buildings*", Radio Science, vol. 31, pp. 313–323, 1996.

[3GPP01] 3GPP, "*3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS)*", Service Description; Stage 2, 2000. Technical Specification 3G TS 23.060 version 3.6.0 (2001-01).

[3GPP99] 3GPP, "*3G TS 25.215 v3.2.0 (2000-03), Technical Specification 3rd Generation Partnership Project*", Technical Specification Group Radio Access Network; Physical Layer – Measurements (FDD) (Release 1999).

[OOKF68] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda, "*Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service*", Rev. Elec. Commun. Lab., vol. 16, no. 9–10, pp. 825–873, 1968.

[B98] N. Blaunstein, "*Average field attenuation in the nonregular impedance streed waveguide*", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 64, pp. 1782–1788, Dec. 1998.

[BA02] N. Blaunstein and J. B. Andersen, "*Multipath Phenomena in Cellular Networks*", Norwood, MA: Artech house, 2002, ch. 4.

[BHMX94] H. L. Bertoni, W. Honcharenko, L. R. Maciel, and H. H. Xia, "*UHF propagation prediction for wireless personal communications*", Proc. IEEE, vol. 82, pp. 1333–1359, Sept. 1994.

[BGL98] N. Blaunstein, R. Giladi, and M. Levin, "*Characteristics' prediction in urban and suburban environments*", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 47, pp. 225–234, Jan. 1998.

[BKC01] N. Blaunstein, D. Katz, D. Censor,A. Freedman, I. Matiyahu, and I. Gur-Arie, "*Prediction of loss characteristics in built-up areas with various buildings' overlay profiles*", IEEE Antennas Propagat. Mag., vol. 43, pp. 181–191, 2001.

[BL95] N. Blaunstein and M. Levin, "*Prediction of UHF-wave propagation in suburban and rural environments*", in Proc. URSI Symposium on Communication, 1995, pp. 191–200.

[BMG02] P. Bergamo, D. Maniezzo, A. Giovanardi, G. Mazzini, M. Zorzi, "*An improved Markov model for Rayleigh fading envelope*", IEE Electronic Letters, vol. 38, pp. 477- 478, May 2002.

[D98] E. Damosso, ed., Digital Mobile Radio: COST 231 View of the Evolution towards 3rd Generation Systems. Bryxelles: Final Report of the COST 231 Project, published by the European Commission, 1998.

[EGT99] V. Erceg, L. Greenstein, S. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius, and R. Bianchi, "*An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments*", IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, pp. 1205–1211, Aug. 1999.

[FBR94] M. J. Feurstein, K. L. Blackard, T. Rappaport, S. Y. Seidel, and H. H. Xia, "*Path loss, delay spread, and outage models as functions of antenna height for microcellular systems design*", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, no. 3, pp. 487–498, 1994.

[FMP99] G. Franceschetti, S. Marano, and F. Palmieri, "*Propagation without wave equation, toward an urban area model*", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 47, no. 9, pp. 1393–1404, 1999.

[G89] E. Green, "*Path loss and signal variability analysis for microcells*", in Proc. IEE Fifth International Conference on Mobile and Personal Communications, 1989, pp. 38–41.

[GSM99] GSM 05.08, "*Digital cellular telecommunication system (Phase 2+)*", Radio subsystem link control.

[H80] M. Hata, "*Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services*," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 29, pp. 317–325, 1980.

[HT01] H. Homa, A. Toskala, "*WCDMA for UMTS, Radio Access For Third Generation Mobile Communications*", Revised Edition, John Wiley & Sons, 2001.

[JHWM99] Y.L.C. de Jong, M.H.A.J. Herben, J.-F. Wagen and A. Mawira, "*Transmission of UHF radiowaves through buildings in urban microcell environments*", Electronics Letters , vol. 35, (9) , 29 Apr. 1999, pp. 743 –745.

[LBC98] T. Liu, P. Bahl, and I. Chlamtac, "*Mobility modeling, location tracking, and trajectory prediction in wireless ATM networks*", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 922–936, Aug. 1998.

[MBL98] R. Mazar, A. Bronschtein, and I. T. Lu, "*Theoretical analysis of UHF propagation in a city street modelet as a random multislit waveguide*", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 46, pp. 864–871, June 1998.

[MBX93] L. R. Maciel, H. L. Bertoni, and H. H. Xia, "*Unified approach to prediction of propagation over buildings for all ranges of base station antenna height*", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 42, Jan. 1993.

[MPF99] S. Marano, F. Palmieri, and G. Franceschetti, "*Statistical characterization of ray propagation in a random lattice*", J. Optic. Soc. Amer., vol. 16, no. 10, pp. 2459–2464, 1999.

[OTH00] Y. Oda, K. Tsunekawa and M. Hata, "*Advanced LOS path-loss model in microcellular mobile communications*", IEEE Trans. Vehicular Techn., vol. 49, (6), Nov. 2000, pp. 2121 – 2125.

[RWG97] K. Rizk, J. F.Wagen, and F. Gardiol, "*Two-dimensional ray tracing modeling for propagation prediction in microcellular environmnents*", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 46, pp. 508–517, 1997.

[S00] H.M. El-Sallabi, "*Fast path loss prediction by using virtual source technique for urban microcell*", IEEE VTC 2000-Spring Tokyo, pp. 2183 – 2187.

[SBA02] T.C.W. Schenk, R.J.C. Bultitude, L.M. Augustin, R.H. van Poppel and G. Brussaard, "*Analysis of Propagation Loss In Urban Microcells at 1.9 GHZ and 5.8 GHZ*", Proc. URSI Commison F Open Symposium on Radiowave Propagation and Remote Sensing, Garmisch-Partenkirchen, Germany, February 12-15, 2002.

[SDR92] K. R. Schaubach, N. J. Davis, and T. S. Rappaport, "*Aray tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular environments*", in Proc. Vehicular Technology Conference, 1992, pp. 932–935.

[SKS03] Θεόδωρος Σταμουλακάτος, Μάριος Κούμανος, Ευστάθιος Συκάς, "*Use signaling of cellular networks to obtain road traffic information*", Τιμητικός Τόμος του Πανεπιστημίου Πειραιά, Δεκέμβριος 2003.

[TT95] S. Y. Tan and H. S. Tan, "*A theory for propagation path loss characteristics in a city-street grid*", IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 37, pp. 333–342, 1995.

[TJ99] J. H. Tarng and K. M. Ju, "*A novel 3-D scattering model of 1.8-GHz radio propagation in microcellular urban environment*", IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 41, no. 2, pp. 100–106, 1999.

[W88] J.H. Whitteker, "*Measurement of path loss at 910 MHz for proposed microcell urban mobile systems*", IEEE Trans. Vehicular Techn., vol. 37, (3), Aug. 1988, pp. 125 – 129.

[WC01] Daniel Wong, Donald Cox, "*Two-State Pattern-Recognition Handoffs for Corner-Turning Situations*", IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.50, no.2, March 2001.

[WC99] D. Wong and D. Cox, "*Estimating Local Mean Signal Power level in a Rayleigh fading environment*", IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.48, pp.956-959, May 1999.

[ZM00] Wei Zhang and N. Moayeri, "*Explicit expressions for the prediction of micro-cellular mobile radio propagation in urban street grid environments*", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2000, pp. 1118 – 1121.

[ZRM97] M. Zorzi, R.R.Rao, L.B.Milstein, "*ARQ error control for fading mobile radio channels*", IEEE Trans. Veh. Technology, 1997, 46, (2), pp.445-455.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΧΗΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.0. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε αναλυτικά τη διαδικασία επεξεργασίας ακολουθιών ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως. Αποτελέσματα κατά την προσομοίωση της προτεινόμενης μεθόδου τόσο σε GSM όσο και σε UMTS δίκτυα, ολοκληρώνουν το κεφάλαιο.

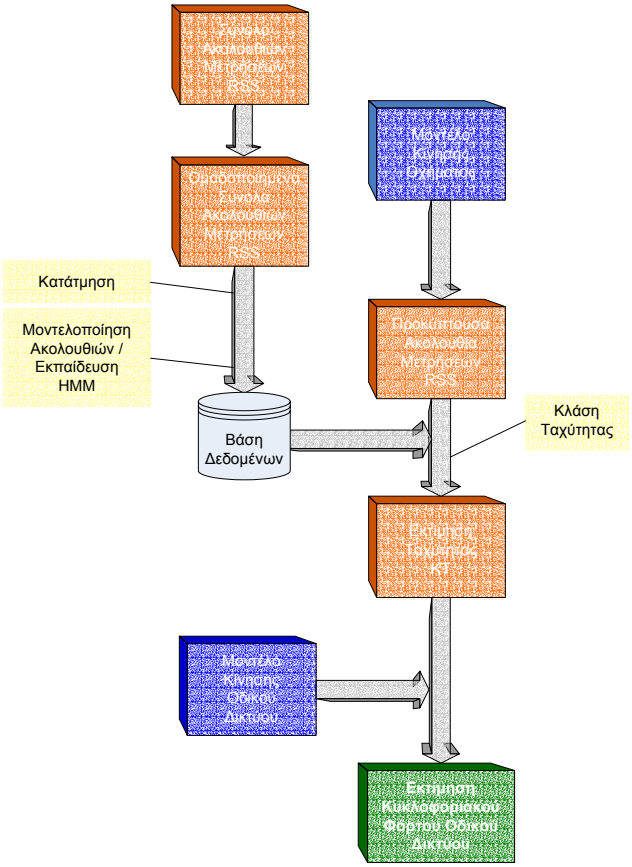
6.1. Σχήμα εκτίμησης κυκλοφοριακής κίνησης

Κατά την υλοποίηση της προσέγγισής μας αναπτύξαμε έναν προσομοιωτή για δικτύο GSM, καθώς και ένα προσομοιωτή για δίκτυο UMTS. Κατά την παραπάνω προσομοίωση, παρήχθησαν ακολουθίες ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως (οι οποίες στηρίζονται σε αναφορές RSS, όπως έχει περιγραφεί στις παραγράφους 5.1 και 5.2) βασιζόμενοι είτε σε πραγματικούς χάρτες ραδιοκάλυψης, είτε σε μοντελοποίηση διάδοσης απώλειας σήματος της αντίστοιχης περιοχής. Η επεξεργασία των ακολουθιών ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια (σχήμα 6.1):

1. Τη συλλογή συνόλων ακολουθιών ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως, ομαδοποιημένων ως προς τη ταχύτητα.
2. Την κατάτμηση των παραπάνω συνόλων χρησιμοποιώντας είτε τον αλγόριθμο KM, είτε τον αλγόριθμο CLARA προκειμένου να μοντελοποιηθούν με τη χρήση Μαρκοβιανών αλυσίδων HMM.
3. Τη κατασκευή συνόλων κλάσεων ταχύτητας στη βάση δεδομένων κατά τη μοντελοποίηση των ακολουθιών ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως με χρήση HMM μοντέλων. Με τη χρήση του αλγορίθμου Baum-Welch δημιουργήθηκε στη βάση δεδομένων k, το πλήθος HMM μοντέλα $\lambda = \{A, B, \pi\}$, τα οποία αντιστοιχούν σε k το πλήθος διαφορετικές κλάσεις ταχύτητας οχημάτων (διατύπωση προβλήματος 3 – παράγραφος 3.1.3.). Οι παραπάνω ακολουθίες ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως ονομάζονται “εκπαιδευτικές” δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται προκειμένου να “εκπαιδεύσουν” τα HMM μοντέλα για τις διαφορετικές κλάσεις ταχύτητας.
4. Δοθείσης ακολουθίας ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως (που δημιουργήθηκε από το μοντέλο κίνησης οχήματος και βασιζόμενοι είτε σε πραγματικούς χάρτες ραδιοκάλυψης, είτε σε μοντελοποίηση διάδοσης απώλειας σήματος της αντίστοιχης περιοχής),

υπολογίζουμε τις τιμές πιθανοφάνειας $P(O|\lambda)$ για τα k, το πλήθος διαφορετικά μοντέλα HMM, οπότε και επιλέγουμε σε ποια κλάση ταχύτητας ανήκει η δοθείσα ακολουθία (διατύπωση προβλήματος 1 – παράγραφος 3.1.1.). Από το τελευταίο έχουμε κατά προσέγγιση την εκτίμηση ταχύτητας του ΚΤ.

5. Με χρήση του μοντέλου Κίνησης Οδικού Δικτύου, έχουμε τον προσδιορισμό κυκλοφοριακού φόρτου οδικού δικτύου.



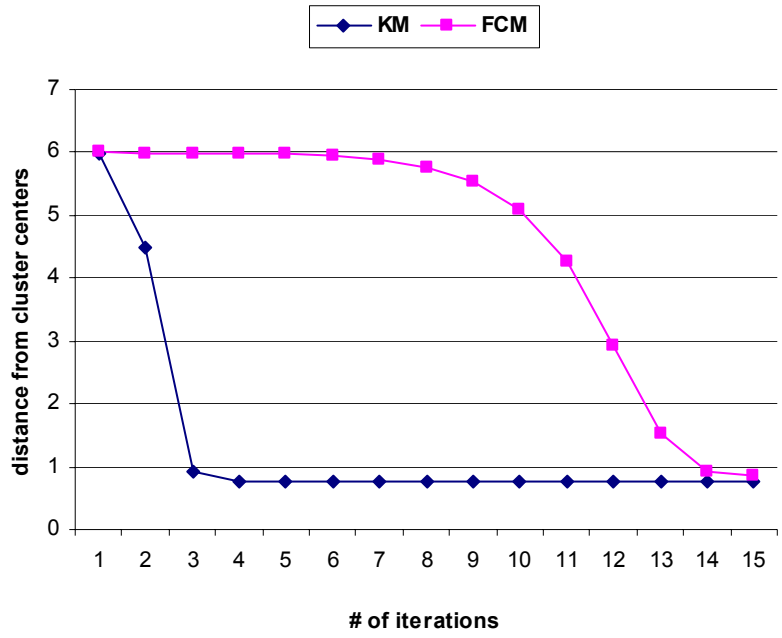
Σχήμα 6.1: Σχήμα εκτίμησης κυκλοφοριακής κίνησης

Στο βήμα 1, το σύνολο των ακολουθιών μετρήσεων RSS, δημιουργήθηκε μετά από προσομοίωση ΚΤ, ευρισκόμενων μέσα σε κινούμενα οχήματα. Τα οχήματα αυτά είχαν διάφορες τυχαίες τιμές ταχύτητας, σύμφωνα με τη προκαθορισμένη κανονική κατανομή των τιμών ταχύτητας, του υπό εξέταση οδικού τμήματος. Στο βήμα 2, έχουμε προεπεξεργασία των ακολουθιών ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως, εφαρμόζοντας κατάτμηση. Μεταξύ των τεχνικών κατάτμησης ΚΜ και FCM επελέγη η ΚΜ λόγω γρηγορότερης σύγκλισης, συγκρινόμενη στο ίδιο σύνολο στοιχείων και με τις ίδιες αρχικές συνθήκες (σχήμα 6.8). Η τεχνική ΚΜ χρησιμοποιήθηκε σχεδόν σε όλες τις κατατμήσεις που χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν κατά τη προσομοίωση. Μεταξύ των τεχνικών κατάτμησης PAM και CLARA επελέγη ο αλγόριθμος CLARA λόγω της μικρότερης πολυπλοκότητάς του σε σχέση με τον αλγόριθμο PAM. Η τεχνική CLARA χρησιμοποιήθηκε κατά την κατάτμηση των πραγματικών ακολουθιών ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως είτε κατά τη προσομοίωση δικτύου UMTS, λόγω του μεγέθους των ακολουθιών σήματος, είτε στοιχείων προερχόμενων από την Vodafone, λόγω της ύπαρξης ακραίων τιμών σε αυτά.

Στο βήμα 3, υποψήφιες λύσεις για τον υπολογισμό των μοντέλων HMM από τις ακολουθίες ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως, είναι ο αλγόριθμος Baum-Welch και ο αλγόριθμος Segmental K-Means. Δοκιμαζόμενοι οι δύο αλγόριθμοι έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα, με τον αλγόριθμο Baum-Welch να παρέχει σε όλες τις περιπτώσεις ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα από τον αλγόριθμο Segmental K-Means. Ο υπολογισμός των μοντέλων HMM τόσο για τον αλγόριθμο Baum-Welch, όσο και για τον αλγόριθμο Segmental K-Means έγινε με τις ίδιες αρχικές τιμές που επιτεύχθηκαν από την τεχνική κατάτμησης ΚΜ, κατά τη σύγκρισή τους. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τις τιμές πιθανοφάνειας ανά δείγμα σήματος 5 τυχαίων περιπτώσεων.

Το βήμα αυτό όπου και επιλύεται το πρόβλημα της "εκμάθησης" των HMM μοντέλων, είναι ίσως το σημαντικότερο στις περισσότερες εφαρμογές των Μαρκοβιανών μοντέλων, δεδομένου ότι μας επιτρέπει να προσαρμόσουμε κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο τις παραμέτρους του μοντέλου στα δεδομένα παρατήρησης πραγματικών φαινομένων (στην περίπτωσή μας τις ακολουθίες ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως).

Σε παρόμοια προβλήματα "εκμάθηση" δεν έχει χρησιμοποιηθεί καθόλου ([NH02], [SKS03]) ή έχει εφαρμοστεί σε προβλήματα όπως εκτίμηση θέσεως ([MK99]) ή εκτίμηση κυκλοφοριακής κίνησης με μακροσκοπική ([SS031], [SS032], [SKS04], [SKS05]) ή μικροσκοπική μοντελοποίηση κινήσεως οχημάτων ([SYVS04]). Απαραίτητο είναι και το φιλτράρισμα χρησιμοποιώντας την πληροφορία από τις ζώνες TA σε δίκτυα GSM ([SKS05]) ή από τις ζώνες RTT σε δίκτυα UMTS ([SMA05]).



Σχήμα 6.8. Σύγκλιση των τεχνικών κατάτμησης KM και FCM

Δείγμα (ακολουθία παρατήρησης)	**Segmental K-means**	**Baum-Welch**
smp_022_sp04_TA0_W	-6.063802	-6.006602
smp_034_sp14_TA1_W	-5.021945	-4.525091
smp_021_sp05_TA0_E	-6.851161	-6.241454
smp_076_sp08_TA1_E	-4.411560	-4.411562
smp_100_sp21_TA0_E	-6.675425	-6.696273

Πίνακας 2.

Τιμές πιθανότητας που επιτεύχθηκαν με διαφορετικούς αλγορίθμους

Βασιζόμενοι στο μοντέλο κίνησης οχήματος (βλέπε παράγραφο 4.5.1.1.), είτε σε πραγματικούς χάρτες ραδιοκάλυψης, είτε σε μοντελοποίηση διάδοσης απώλειας σήματος της αντίστοιχης περιοχής, δημιουργούμε δοκιμαστικές ακολουθίες ισχύος σήματος, οι οποίες και χρησιμοποιούνται για να εξακριβώσουμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων μας. Κατά συνέπεια στο βήμα 4, προσπαθούμε να ταξινομήσουμε τις δοκιμαστικές ακολουθίες ισχύος σήματος στην αντίστοιχη κλάση μοντέλου HMM, με τον υπολογισμό της τιμής πιθανοφάνειας ($P(O|\lambda)$). Επιλέγοντας τη "κοντινότερη κλάση μοντέλου της βάσεως", το οποίο είναι και το μοντέλο που δίνει την υψηλότερη

τιμή πιθανοφάνειας, έχουμε σαν αποτέλεσμα τον υπολογισμό της ταχύτητας του εξεταζόμενου οχήματος.

Τέλος στο βήμα 5, κάνοντας χρήση χρήση του μοντέλου Κίνησης Οδικού Δικτύου που παρουσιάστηκε στη παράγραφο 4.5.1.2., έχουμε τον προσδιορισμό κυκλοφοριακού φόρτου οδικού δικτύου. Όπως έχει αποδειχθεί στη παράγραφο 4.3., το υπάρχον δείγμα οχημάτων είναι παραπάνω από επαρκές για να υποστηρίξει εκτιμήσεις κυκλοφοριακής κινήσεως.

6.2. Αποτελέσματα

Στη παράγραφο 6.2.0 παρουσιάζουμε τη κατασκευή συνόλων κλάσεων ταχύτητας στη βάση δεδομένων, κατά τη μοντελοποίηση ακολουθιών ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως, με τη χρήση HMM μοντέλων για συγκεκριμένες περιοχές. Ακολούθως στη παράγραφο 6.2.1. παρουσιάζεται η προσομοίωση κίνησης ερευνητικού οχήματος σε αστικό ή μη περιβάλλον, κάνοντας χρήση είτε χάρτη ραδιοκάλυψης, είτε μοντέλου εξασθένησης σήματος προκειμένου να προσομοιώσουμε το περιβάλλον προσομοίωσης. Στην παράγραφο 6.2.2 προσομειώθηκαν οχήματα, τα οποία εισέρχονταν στην εξεταζόμενη περιοχή με σταθερή ταχύτητα, η οποία ακολουθούσε είτε την Gaussian κατανομή είτε την two-sided Poisson κατανομή. Τα αποτελέσματα περιγράφουν τις εκτιμήσεις μέσης (χρήση αρμονικού μέσου όρου) ταχύτητας, αποδεικνύοντας ότι ισχύει το θεωρητικό όριο του 5% επί του συνολικού πλήθους των οχημάτων, για την επάρκεια αντιπροσώπευσης του συνολικού πλήθους οχημάτων στον υπό εξέταση δρόμο.

Η παράγραφος 6.2.3 αποδεικνύει την αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου κίνησης, χρησιμοποιώντας δεδομένα κυκλοφοριακής κίνησης από το εργαλείο προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί για την παραγωγή τέτοιου τύπου στοιχείων. Δεδομένα κυκλοφοριακής κίνησης από το τμήμα πολιτικών μηχανικών του Ε.Μ.Π. δεν κατέστη δυνατό να επεξεργαστούμε, λόγω τεχνικών προβλημάτων στους αισθητήρες του δικτύου παρακολούθησης κυκλοφοριακής κίνησης του Ε.Μ.Π.. Τέλος, στη παράγραφο 6.2.4 δοκιμάζουμε το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα από την εταιρεία κινητής τηλεφωνίας Vodafone στη Γερμανία.

6.2.0. Κλάσεις ταχύτητας

Λαμβάνοντας υπόψη τις ακολουθίες παρατήρησης (στοιχεία), ρυθμίζουμε τις παραμέτρους του μοντέλου $\lambda = (A, B, \pi)$ προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η τιμή πιθανοφάνειας (loglik). Με άλλα λόγια λύνουμε το πρόβλημα εκτίμησης / εκμάθησης. Ακολουθούν οι κλάσεις ταχύτητας για την προσομοίωση σε δίκτυα GSM και UMTS αντίστοιχα. Τα τμήματα των οδών που προσομοιώνουμε, έχουν μοντελοποιηθεί και για τις δύο κατευθύνσεις. Με το τρόπο αυτό αποφεύγουμε λάθη, τα οποία θα μπορούσαν να προκύψουν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, κατά την κίνηση του οχήματος σε λάθος κατεύθυνση.

6.2.0.1. Δίκτυο GSM

Για κάθε προσομοιούμενη οδό, κατασκευάσαμε σύνολα ακολουθιών ισχύος σήματος. Για κάθε κλάση ταχύτητας κάναμε 100 δοκιμαστικές μετρήσεις διατρέχοντας την υπό εξέταση οδό. Από τις 100 μετρήσεις προέκυψε η ακολουθία μετρήσεων, η οποία και χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση με την υπό εξέταση προσομοιομένη ακολουθία μετρήσεων. Δοκιμαστικές ακολουθίες μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν για κάθε 5 km/h, από την ταχύτητα των 20km/h έως την ταχύτητα των 110km/h, για πέντε (5) ζώνες TA και για 4 κατευθύνσεις (ανάλογα με τη χωροθέτηση της εξεταζόμενης οδούς) της μορφής smpS_spx_TAy_z όπου:

$S \in [001,...,100]$ αντιστοιχεί σε 100 δείγματα ακολουθιών ισχύος σήματος (50 μετρήσεις - 24 sec),

$x \in [01,...,19]$ αντιστοιχεί σε κλάσεις τιμών ταχύτητας από 20km/h έως 110km/h,

$y \in [0,1,2,3,4]$ αντιστοιχεί σε TA ζώνες 0, 1, 2, 3 και 4,

$z = \begin{cases} N \\ S \\ E \\ W \end{cases}$ αντιστοιχεί στις 4 κατευθύνσεις (Βόρεια / Νότια / Ανατολικά / Δυτικά).

Κατά συνέπεια ένα δείγμα της μορφής sp12_TA1_E, αντιστοιχεί σε κλάση ταχύτητας των 75km/h, ευρισκόμενο μέσα στη ζώνη TA-1 με κατεύθυνση ανατολικά. Στο ακόλουθο παράδειγμα κατασκευάσαμε την κατηγορία ταχύτητας sp04, που αντιστοιχεί σε 35km/h. Χρειάστηκαν 249 επαναλήψεις προκειμένου να έχουμε σύγκλιση. Έπειτα, συγκρίνοντας την τιμή της πιθανότητας των τριών δειγμάτων smp_022_sp04_TA0_W, smp_031_sp03_TA0_W και smp_099_sp05_TA0_W που αντιστοιχούν σε 35km/h, 30km/h και 40km/h, είδαμε (όπως αναμενόταν) ότι: loglik(smp_022_sp04_TA0_W) = -652.934431,

loglik (smp_031_sp03_TA0_W) = -664.810879,

loglik (smp_099_sp05_TA0_W) = -672.848484,

το οποίο και επιβεβαιώνει ότι το δείγμα smp_022_sp04_TA0_W δίνει την υψηλότερη τιμή πιθανοφάνειας από τα άλλα δύο δείγματα (βλ. παράρτημα B1). Ομοίως και στο παράδειγμα 2 (βλ. παράρτημα B2).

Σημείωση:

Προσοχή πρέπει να δοθεί στις τιμές της απόκλισης. Σε περίπτωση που είναι χαμηλότερες από 0.2e-5, τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται μερικώς λανθασμένα όπως:

- loglik1<loglik2 όπου η loglik1 αντιστοιχεί σε δείγμα της εξεταζόμενης κλάσης ενώ η loglik2 όχι ή

- loglik = -Inf

6.2.0.2. Δίκτυο UMTS

Κατασκευάσαμε σύνολα ακολουθιών ισχύος σήματος για κάθε 5 km/h, από την ταχύτητα των 20km/h έως την ταχύτητα των 110km/h, για δύο ΣΒ και για πέντε ζώνες RTT κάθε μία (περίπου 70m πλάτος [HT01]) της μορφής spx_RTTy_z όπου:

$S \in [0001,...,1000]$ αντιστοιχεί σε 100 δείγματα ακολουθιών ισχύος σήματος (500 μετρήσεις - 5 sec),

$x \in [01,...,19]$ αντιστοιχεί σε κλάσεις τιμών ταχύτητας από 20km/h έως 110km/h,

$y \in [0,1,2,3,4]$ αντιστοιχεί σε RTT ζώνες 0, 1, 2, 3, και 4

$z = \begin{cases} N \\ S \\ E \\ W \end{cases}$ αντιστοιχεί στις 4 κατευθύνσεις (Βόρεια / Νότια / Ανατολικά / Δυτικά).

Για κάθε κλάση ταχύτητας δημιουργήσαμε 100 δείγματα. Κατά συνέπεια ένα δείγμα της μορφής sp14_RTT1_E, αντιστοιχεί σε κλάση ταχύτητας των 85km/h, ευρισκόμενο μέσα στη ζώνη ΤΑ-1 με κατεύθυνση ανατολικά.

6.2.1. Προσομοίωση κίνησης ερευνητικού οχήματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε αποτελέσματα προσομοίωσης ΚΤ κινούμενου σε αστικό ή μη περιβάλλον με χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης ή μοντέλου διάδοσης σήματος.

6.2.1.1. Χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης (αστικό περιβάλλον)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε αποτελέσματα προσομοίωσης ΚΤ κινούμενου σε αστικό περιβάλλον με χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης τόσο σε δίκτυα GSM όσο και σε δίκτυα UMTS.

6.2.1.1.1. Χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης (αστικό περιβάλλον – GSM δίκτυο)

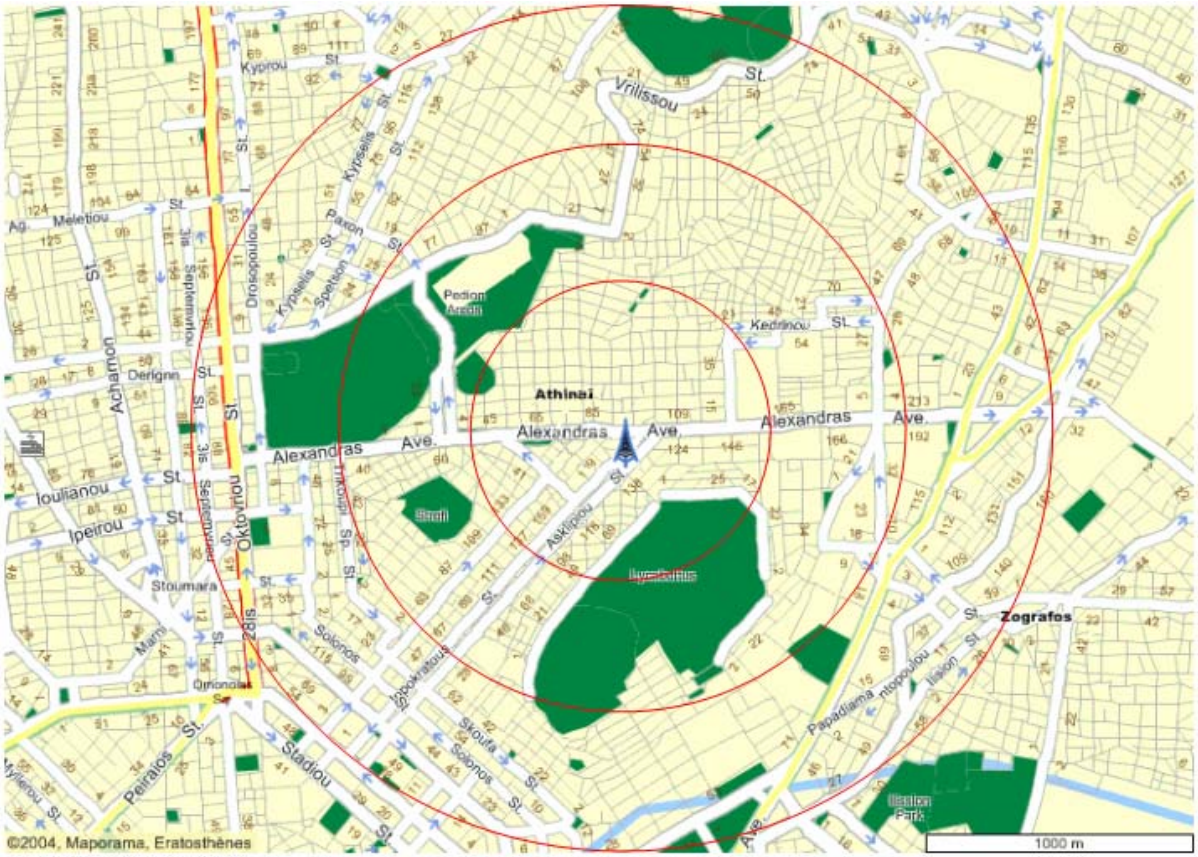
Το τμήμα της εξεταζόμενης οδού έχει μήκος περίπου 3.3 χλμ. ενώ μοντελοποιήθηκαν και οι δύο κατευθύνσεις της. Ακολουθώντας αυτό το τρόπο μοντελοποίησης, αποφύγαμε τα λάθη που θα μπορούσαν να εμφανιστούν κατά την προσομοίωση οχήματος, που βρισκόταν στη μοντελοποιημένη οδό, αλλά ακολουθούσε λανθασμένη κατεύθυνση. Η μοντελοποίηση της παραγράφου 4.5.1.1. καθορίζει και τη διακύμανση της ταχύτητας του εξεταζόμενου οχήματος, η οποία και απεικονίζεται στο σχήμα 6.2.1.1.1.β..

Πίνακας 6.2.1.1.1.α. : Σύγκριση της υπολογιζόμενης και πραγματικής ταχύτητας του δοκιμαστικού οχήματος

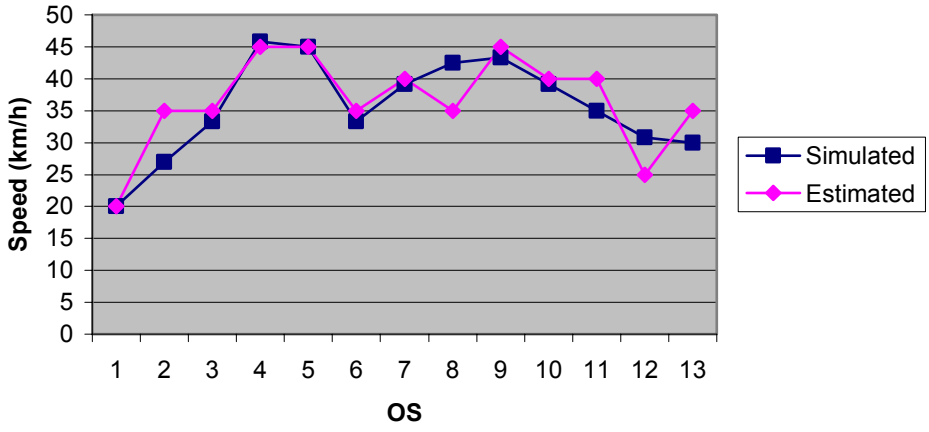
OS	Ταχύτητα Οχήματος	Πιθανά Μοντέλα Ταχύτητας	Χρονικό Διάστημα	Διανυθείσα Απόσταση	Επιτυχής Εκτίμηση
1	20	sp01_TA2_E (20);	24	133.33	Yes
2	27	sp03_TA2_E; sp04_TA2_E (35);	24	233.33	Yes
3	33.33	sp02_TA1_E; sp03_TA1_E; sp04_TA1_E (35);	24	233.33	Yes
4	45.83	sp05_TA1_E; sp06_TA1_E (45);	24	300	Yes
5	45	sp06_TA0_E (45);	24	300	Yes
6	33.33	sp03_TA0_E; sp04_TA0_E (35);	24	233.33	Yes
7	39.16	sp03_TA0_E; sp04_TA0_E; sp05_TA0_E (40);	24	266.67	Yes
8	42.5	sp03_TA0_E; sp04_TA0_E;	24	300	No
9	43.33	sp05_TA1_E; sp06_TA1_E (45);	24	300	Yes
10	39.16	sp03_TA1_E; sp04_TA1_E; sp05_TA1_E (40);	24	233.33	Yes
11	35	sp03_TA2_E; sp04_TA2_E; sp05_TA2_E (40);	24	200	Yes
12	30.83	sp01_TA2_E; sp02_TA2_E;	24	200	No
13	30	sp03_TA2_E; sp04_TA2_E (35);	24	166.67	Yes
		Total	312 sec	3.1 km	84.61%

Στον πίνακα 6.2.1.1.1.α., επεξηγούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσής μας χρησιμοποιώντας τις αναφορές μέτρησης ενός ΚΤ ευρισκόμενου σε ένα όχημα, που διανύει την απόσταση των 3.1 χλμ. και 13 ακολουθιών παρατήρησης. Η συγκεκριμένη διαδρομή διασχίζει 3 ΤΑ ζώνες (ΤΑ- 0, ΤΑ-1, ΤΑ-2) και έχει διάρκεια 312 δευτερολέπτων. Η σύγκριση των ακολουθιών παρατήρησης με τις κλάσεις ταχύτητας στη βάση δεδομένων, δίνει τη στήλη 3, όπου παραδείγματος χάριν το sp05_TA0_W είναι η κλάση ταχύτητας σήματος κατερχόμενης ζεύξης που έχει δημιουργηθεί από

αναφορές μέτρησης ΚΤ, επιλύοντας το πρόβλημα της εκμάθησης / εκτίμησης (βλέπε παράγραφο 3.1.3). Το υπό προσομοίωση ΚΤ κατά τη δημιουργία των παραπάνω αναφορών μέτρησης, εκινείτο με τη μέση ταχύτητα 40χλμ/ω και κατεύθυνση δυτικά, σε τμήμα της εξεταζόμενης οδού που ανήκει στη ζώνη ΤΑ-0. Σύμφωνα με τον πίνακα 6.2.1.1.1.β., παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του οχήματος προσεγγίζεται από το ανώτερο όριο των επιλεγμένων μοντέλων ταχύτητας, από τη βάση δεδομένων. Επιτυχής εκτίμηση της ταχύτητας ΚΤ επιτυγχάνεται στο 84,61% των περιπτώσεων, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο κατάτμησης K-Means. Οι αναφερόμενες κλάσεις ταχύτητας ανήκουν στο αποδεκτό διάστημα απόκλισης, με τις υπογραμμισμένες κλάσεις να είναι αυτές με επιτυχή εκτίμηση αποτελέσματος.



Σχήμα 6.2.1.1.1.α.: TA-zones 0, 1 και 2



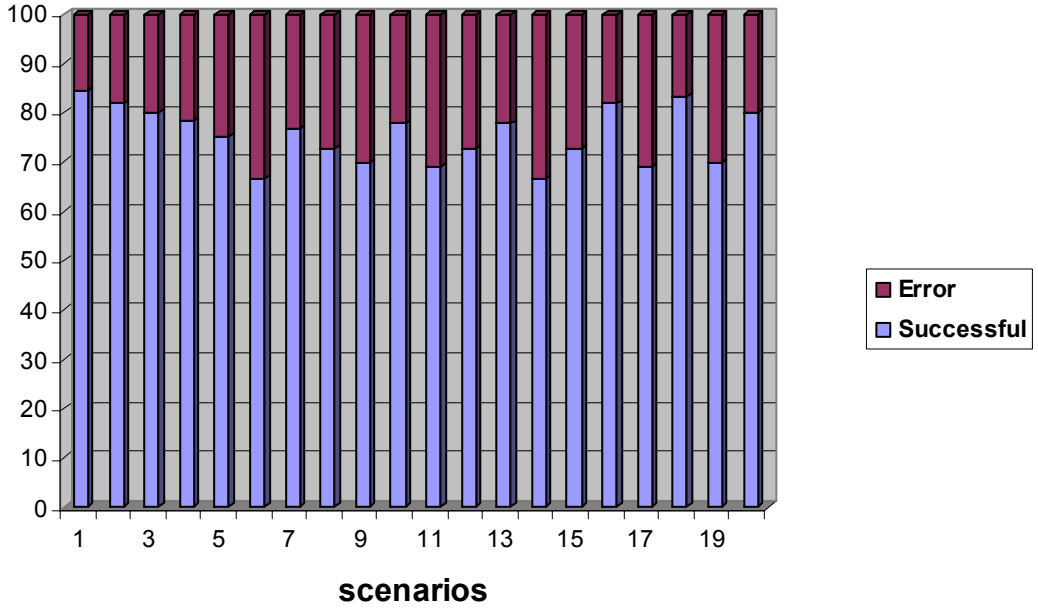
Σχήμα 6.2.1.1.1.β.: Ταχύτητα προσομοιούμενου οχήματος και εκτίμηση αυτής

Στον πίνακα 6.2.1.1.1.β. παραθέτουμε 20 διαφορετικά σενάρια συμπεριλαμβανομένου και αυτού, το οποίο έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά. Τα ποσοστά επιτυχούς εκτίμησης είναι όλα πάνω από 70%

φθάνοντας σχεδόν 85% σε μια περίπτωση, ενώ στο σχήμα 6.2.1.1.1.γ. απεικονίζεται το λάθος της εκτιμούμενης ταχύτητας για διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, ως ποσοστό (%).

Πίνακας 6.2.1.1.1.β. : Διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης

scenario	**#OS**	**Time Duration (sec)**	**Distance Covered (m)**	**Successful Estimation (%)**
1	13	312	3099	84,61
2	11	264	3310	81,82
3	10	240	3102	80,00
4	14	336	2810	78,57
5	12	288	2947	75,00
6	12	288	2503	72,73
7	13	312	2893	76,92
8	11	264	3312	72,73
9	10	240	2998	70,00
10	9	216	2894	77,78
11	13	312	2932	69,23
12	11	264	2857	66,67
13	9	216	2548	77,78
14	9	216	2765	66,67
15	11	264	3191	72,73
16	11	264	3198	81,82
17	13	312	3214	69,23
18	12	288	2998	83,34
19	10	240	2341	70,00
20	10	240	2749	80,00
			Mean	75,48



Σχήμα 6.2.1.1.1.γ.: Επιτυχής εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ υπό διαφορετικά σενάρια κίνησης

6.2.1.1.2. Χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης (αστικό περιβάλλον – UMTS δίκτυο)

Το τμήμα της εξεταζόμενης οδού έχει μήκος περίπου 1300 μέτρων ενώ μοντελοποιήθηκαν και οι δύο κατευθύνσης του. Η μοντελοποίηση της παραγράφου 4.5.1.1. καθορίζει και τη διακύμανση της ταχύτητας του εξεταζόμενου οχήματος, η οποία και απεικονίζεται στο σχήμα 6.2.1.1.2.β..

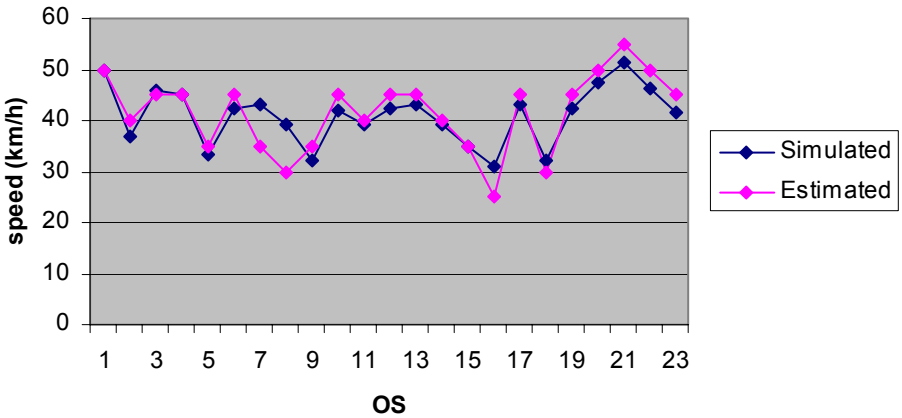
Πίνακας 6.2.1.1.2.α. : Σύγκριση της υπολογιζόμενης και πραγματικής ταχύτητας του δοκιμαστικού οχήματος

OS	Ταχύτητα Οχήματος	Πιθανά Μοντέλα Ταχύτητας	Χρονικό Διάστημα	Διανυθείσα Απόσταση	Επιτυχής Εκτίμηση
A1	50	sp06_RTT4_E sp07_RTT4_E(50)	5	69,44	Yes
A2	37	sp04_RTT3_E sp05_RTT3_E(40)	5	51,39	Yes
A3	45.83	sp05_RTT3_E sp06_RTT3_E(45)	5	63,65	Yes
A4	45	sp06_RTT2_E(45)	5	62,50	Yes
A5	33.33	sp03_RTT1_E sp04_RTT1_E(35)	5	46,29	Yes
A6	42.5	sp05_RTT0_E sp06_RTT0_E(45)	5	59,03	Yes
A7	43.33	sp03_RTT0_E sp04_RTT0_E	5	60,18	No
A8	39.16	sp02_RTT0_E sp03_RTT0_E	5	54,39	No
A9	32	sp03_RTT1_E sp04_RTT1_E (35)	5	44,44	Yes
A10	42	sp05_RTT2_E sp06_RTT2_E (45)	5	58,33	Yes
A11	39.16	sp04_RTT3_E sp05_RTT3_E(40)	5	54,39	Yes
A12	42.5	sp05_RTT3_E sp06_RTT3_E(45)	5	59,03	Yes
A13	43.33	sp05_RTT4_E sp06_RTT4_E(45)	5	60,18	Yes
B1	39.16	sp04_RTT3_E sp05_RTT3_E(40)	5	54,39	Yes
B2	35	sp03_RTT2_E sp04_RTT2_E(35)	5	48,61	Yes
B3	30.83	sp01_RTT1_E sp02_RTT1_E	5	42,82	No
B4	43	sp05_RTT1_E sp06_RTT1_E(45)	5	59,72	Yes
B5	32	sp02_RTT0_E sp03_RTT0_E(30)	5	44,44	Yes
B6	42.50	sp05_RTT0_E sp06_RTT0_E(45)	5	59,03	Yes
B7	47.6	sp06_RTT1_E sp07_RTT1_E(50)	5	66,11	Yes
B8	51.3	sp07_RTT2_E sp08_RTT2_E(55)	5	71,25	Yes
B9	46.2	sp06_RTT2_E sp07_RTT2_E(50)	5	64,17	Yes
B10	41.7	sp05_RTT3_E sp06_RTT3_E(45)	5	57,92	Yes
Total			115 sec	1311.71 m	86.96%

Στο πίνακα 6.2.1.1.2.α., επεξηγούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσής μας χρησιμοποιώντας τις αναφορές μέτρησης ενός ΚΤ ευρισκόμενου σε ένα όχημα, που διανύει την παραπάνω οδό κάνοντας δέκα (10) και εννέα (9) ακολουθίες παρατήρησης λαμβανομένων από αντίστοιχα τους δύο ΣΒ. Κάθε ακολουθία παρατήρησης αποτελείται από 500 μετρήσεις ενώ το ΚΤ διασχίζει πέντε (5) και τέσσερις (4) RTT ζώνες αντίστοιχα με συνολικό χρόνο προσομοίωσης 115 δευτερολέπτων. Σύμφωνα με τον πίνακα 6.2.1.1.2.β., παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του οχήματος προσεγγίζεται από το ανώτερο όριο των επιλεγμένων μοντέλων ταχύτητας από τη βάση δεδομένων. Επιτυχής εκτίμηση της ταχύτητας ΚΤ επιτυγχάνεται στο 84,21% των περιπτώσεων, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο κατάτμησης

CLARA. Οι αναφερόμενες κλάσεις ταχύτητας ανήκουν στο αποδεκτό διάστημα απόκλισης, με τις υπογραμμισμένες κλάσεις να είναι αυτές με επιτυχή εκτίμηση αποτελέσματος.

Σχήμα 6.2.1.1.2.β.: RTT-zones για τους εξεταζόμενους 2 ΣΒ

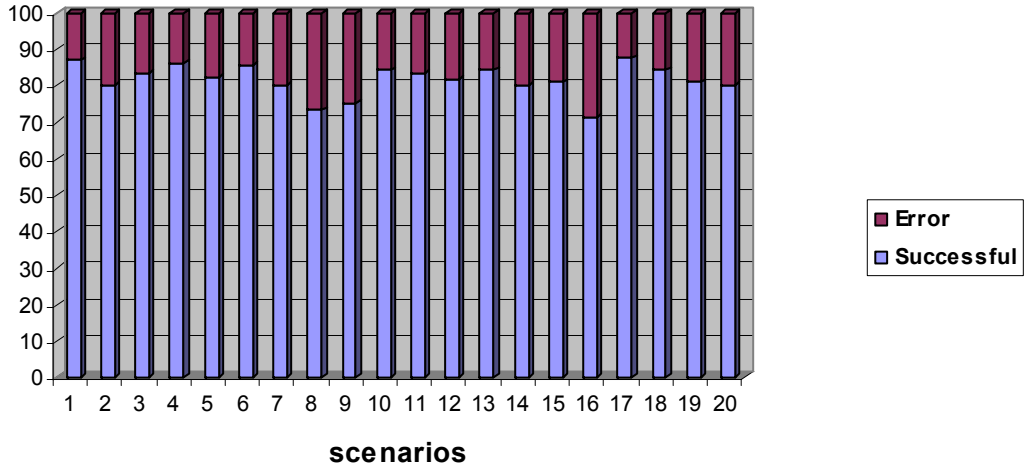


Σχήμα 6.2.1.1.2.β.: Ταχύτητα προσομοιούμενου οχήματος και εκτίμηση αυτής

Στον πίνακα 6.2.1.1.2.β. παραθέτουμε 20 διαφορετικά σενάρια συμπεριλαμβανομένου και αυτού, το οποίο έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά. Τα ποσοστά επιτυχούς εκτίμησης είναι τα περισσότερα πάνω από 80% φθάνοντας σχεδόν 87.5% σε μια περίπτωση. Παρατηρούμε ότι τα ποσοστά επιτυχούς εκτίμησης αυξάνονται αναλόγως με το πλήθος των ακολουθιών μέτρησης. Στο σχήμα 6.2.1.1.1.γ. απεικονίζεται το λάθος της εκτιμούμενης ταχύτητας για διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης ως ποσοστό (%).

Πίνακας 6.2.1.1.2.β. : Διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης

scenario	**#OS**	**Time Duration (sec)**	**Distance Covered (m)**	**Successful Estimation (%)**
1	23	115	1311	86.96
2	20	100	1065	80.00
3	18	90	1071	83.34
4	22	110	1210	86.36
5	17	85	995	82.35
6	21	105	1201	85.71
7	20	100	1176	80.00
8	15	75	890	73.33
9	16	80	938	75.00
10	19	95	1135	84.21
11	18	90	1020	83.34
12	22	110	1028	81.82
13	19	95	1143	84.21
14	20	100	1219	80.00
15	21	105	1222	80.95
16	14	70	820	71.43
17	24	120	1372	87.50
18	19	95	1329	84.21
19	21	105	1191	80.95
20	20	100	1295	80.00
			Mean	81.58%



Σχήμα 6.2.1.1.2.γ.: Επιτυχής εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ υπό διαφορετικά σενάρια κίνησης

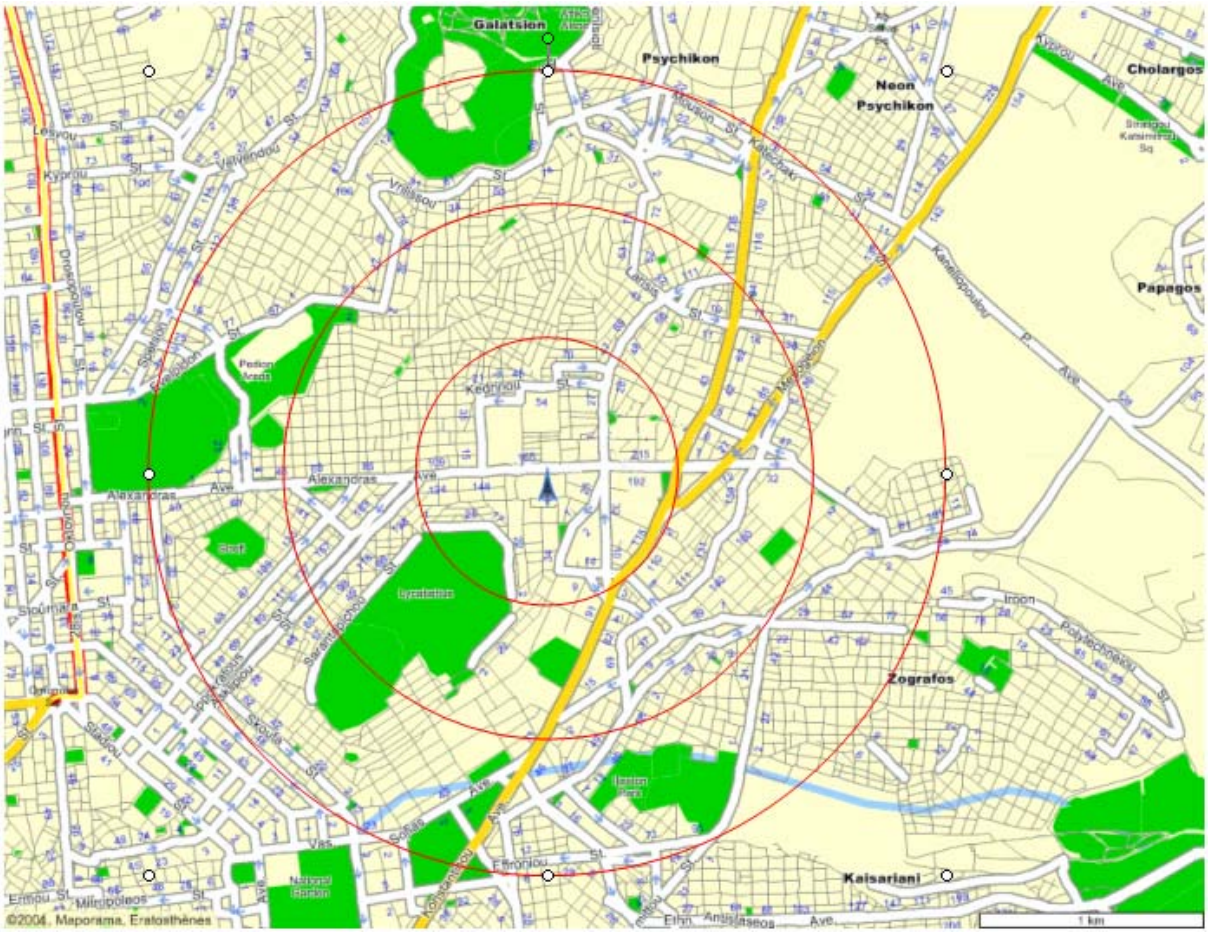
6.2.1.2. Χρήση μοντέλου διάδοσης σήματος (αστικό περιβάλλον – GSM δίκτυο)

Το τμήμα της εξεταζόμενης οδού έχει μήκος 3.74 χλμ. ενώ μοντελοποιήθηκαν και οι δύο κατευθύνσεις της. Η μοντελοποίηση της παραγράφου 4.5.1.1. καθορίζει και τη διακύμανση της ταχύτητας του εξεταζόμενου οχήματος, η οποία και απεικονίζεται στο σχήμα 6.2.1.2.β.. Το μοντέλο διάδοσης σήματος που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε στην παράγραφο 5.4.2.3. για τις ακολουθίες μετρήσεων 1-8 και στην παράγραφο 5.4.2.4. για τις ακολουθίες μετρήσεων 9-11.

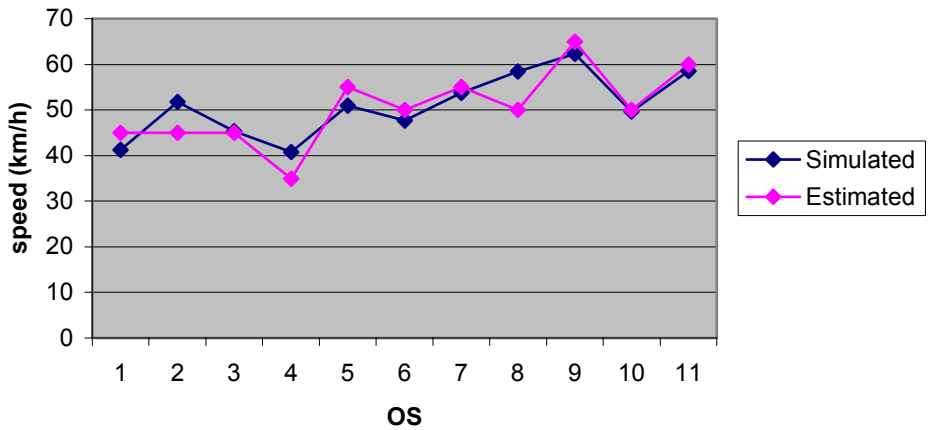
Πίνακας 6.2.1.2.α. : Σύγκριση της υπολογιζόμενης και πραγματικής ταχύτητας του δοκιμαστικού οχήματος

OS	Ταχύτητα Οχήματος	Πιθανά Μοντέλα Ταχύτητας	Χρονικό Διάστημα	Διανυθείσα Απόσταση	Επιτυχής Εκτίμηση
1	41,30	sp05_TA2_E; sp06_TA2_E (45);	24	275	Yes
2	51,80	sp05_TA2_E; sp06_TA2_E;	24	345	No
3	45,33	sp04_TA1_E; sp05_TA1_E; sp06_TA1_E (45);	24	302	Yes
4	40,83	sp03_TA1_E; sp04_TA1_E;	24	272	No
5	50,97	sp08_TA0_E (55);	24	340	Yes
6	47,73	sp06_TA0_E; sp07_TA0_E (50);	24	318	Yes
7	53,80	sp06_TA0_E; sp07_TA0_E; sp08_TA0_E (55);	24	359	Yes
8	58,47	sp06_TA0_E; sp07_TA0_E;	24	390	No
9	62,33	sp02_TA1_N; sp10_TA1_N (65);	24	416	Yes
10	49,63	sp06_TA1_N; sp07_TA1_N (50);	24	331	Yes
11	58,54	sp04_TA2_N; sp05_TA2_N; sp09_TA2_N (60);	24	390	Yes
		Total	264 sec	3.74 km	72.73%

Στον πίνακα 6.2.1.2.α., επεξηγούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσής μας χρησιμοποιώντας τις αναφορές μέτρησης ενός ΚΤ ευρισκόμενου σε ένα όχημα, που διανύει την απόσταση των 3.74 χλμ. και έντεκα (11) ακολουθιών παρατήρησης. Η συγκεκριμένη διαδρομή διασχίζει 3 ΤΑ ζώνες (ΤΑ- 0, ΤΑ-1, ΤΑ-2) αλλάζοντας κατεύθυνση στα όρια μεταξύ των ζωνών ΤΑ-0 και ΤΑ-1. Η διάρκεια της εξεταζόμενης διαδρομής είναι 264 δευτερόλεπτα. Η σύγκριση των ακολουθιών παρατήρησης με τις κλάσεις ταχύτητας στη βάση δεδομένων, δίνει τη στήλη 3. Σύμφωνα με τον πίνακα 6.2.1.2.β., παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του οχήματος προσεγγίζεται από το ανώτερο όριο των επιλεγμένων μοντέλων ταχύτητας από τη βάση δεδομένων. Επιτυχής εκτίμηση της ταχύτητας ΚΤ επιτυγχάνεται στο 73,21% των περιπτώσεων, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο κατάτμησης K-Means. Οι αναφερόμενες κλάσεις ταχύτητας ανήκουν στο αποδεκτό διάστημα απόκλισης, με τις υπογραμμισμένες κλάσεις να είναι αυτές με επιτυχή εκτίμηση αποτελέσματος.



Σχήμα 6.2.1.2.α.: TA-zones 0, 1 και 2

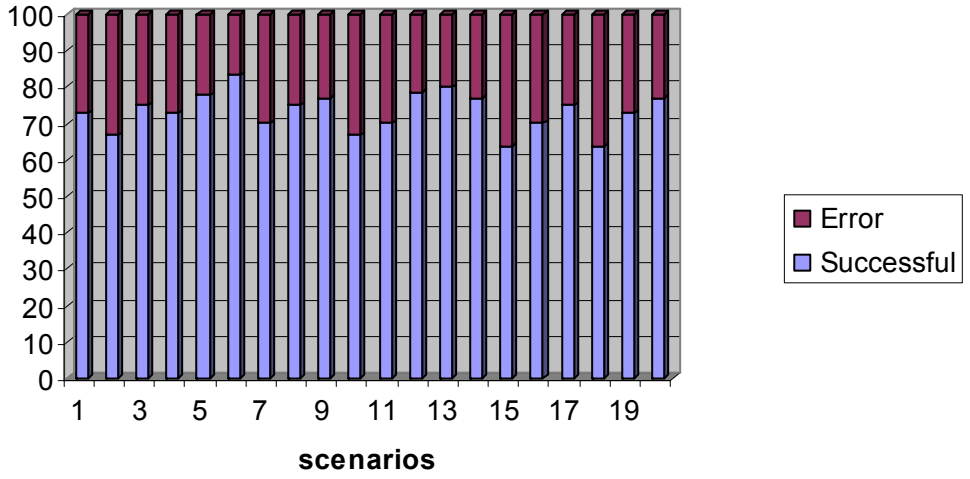


Σχήμα 6.2.1.2.β.: Ταχύτητα προσομοιούμενου οχήματος και εκτίμηση αυτής

Στον πίνακα 6.2.1.2.β. παραθέτουμε 20 διαφορετικά σενάρια συμπεριλαμβανομένου και αυτού, το οποίο έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά. Τα ποσοστά επιτυχούς εκτίμησης κυμαίνονται από 64% έως και 83,34%. Στο σχήμα 6.2.1.2.γ. απεικονίζεται το λάθος της εκτιμούμενης ταχύτητας για διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, ως ποσοστό (%).

Πίνακας 6.2.1.2.β. : Διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης

scenario	**#OS**	**Time Duration (sec)**	**Distance Covered (m)**	**Successful Estimation (%)**
1	11	264	3740	72,73
2	9	216	3054	66,67
3	12	288	3066	75,00
4	11	264	3540	72,76
5	9	216	3230	77,78
6	12	288	3744	83,34
7	10	240	3422	70,00
8	12	288	3683	75,00
9	13	312	3748	76,92
10	9	216	2961	66,67
11	10	240	3389	70,00
12	14	336	3738	78,57
13	10	240	3110	80,00
14	13	312	3722	76,92
15	11	264	3593	63,64
16	10	240	3291	70,00
17	12	288	3712	75,00
18	11	264	3620	63,64
19	11	264	3495	72,73
20	13	312	3734	76,92
			Mean	73,21



Σχήμα 6.2.1.2.γ.: Επιτυχής εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ υπό διαφορετικά σενάρια κίνησης

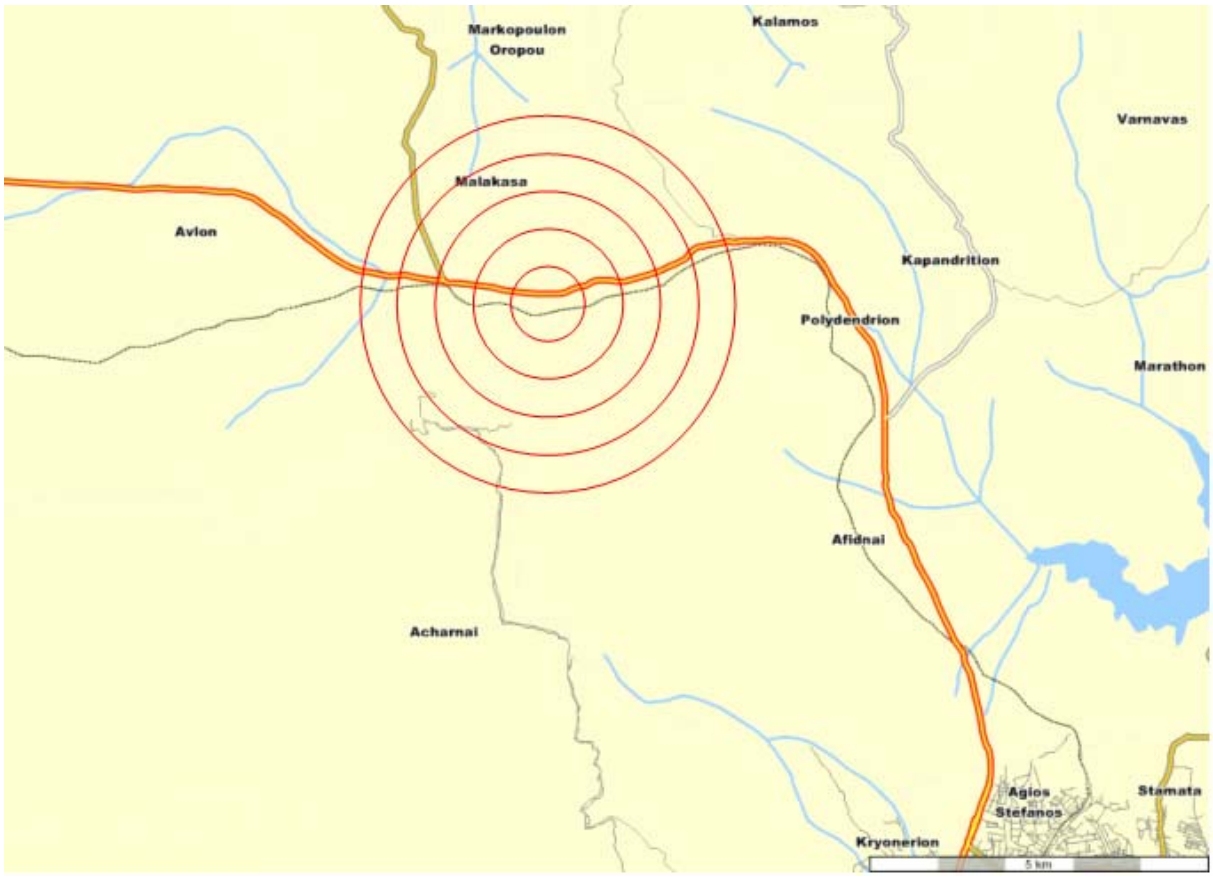
6.2.1.3. Χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης (μη αστικό περιβάλλον – GSM δίκτυο)

Το τμήμα της εξεταζόμενης οδού έχει μήκος 5.67 χλμ. ενώ μοντελοποιήθηκαν και οι δύο κατευθύνσεις της. Η μοντελοποίηση της παραγράφου 4.5.1.1. καθορίζει και τη διακύμανση της ταχύτητας του εξεταζόμενου οχήματος, η οποία και απεικονίζεται στο σχήμα 6.2.1.3.β..

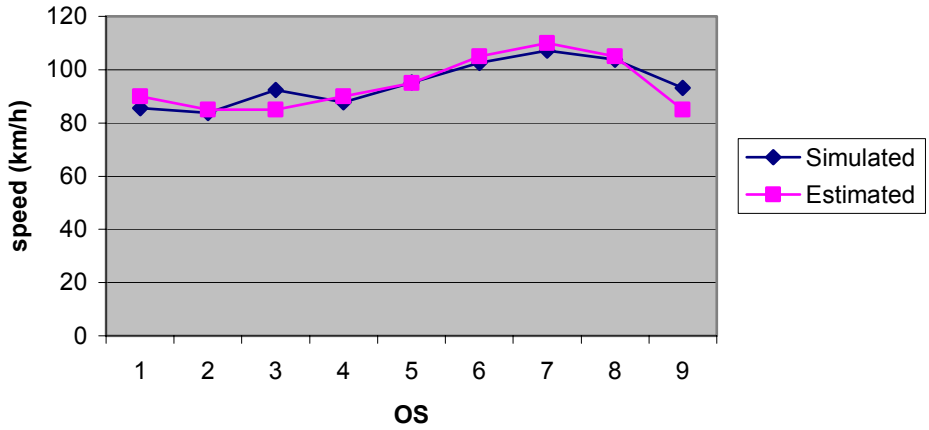
Πίνακας 6.2.1.3.α. : Σύγκριση της υπολογιζόμενης και πραγματικής ταχύτητας του δοκιμαστικού οχήματος

OS	Ταχύτητα Οχήματος	Πιθανά Μοντέλα Ταχύτητας	Χρονικό Διάστημα	Διανυθείσα Απόσταση	Επιτυχής Εκτίμηση
1	85,52	sp14_TA4_E sp15_TA4_E (90)	24	570	Yes
2	83,76	sp13_TA3_E sp14_TA3_E (85)	24	558	Yes
3	92,42	sp13_TA2_E sp14_TA2_E	24	616	No
4	87,66	sp14_TA1_E sp15_TA1_E (90)	24	584	Yes
5	95,09	sp15_TA0_E sp16_TA0_E (95)	24	634	Yes
6	102,56	sp17_TA0_E sp18_TA0_E (105)	24	684	Yes
7	107,11	sp18_TA2_E sp19_TA2_E (110)	24	714	Yes
8	103,76	sp17_TA3_E sp18_TA3_E (105)	24	692	Yes
9	93,13	sp13_TA4_E sp14_TA4_E	24	621	No
		Total	216 sec	5.67 km	77.78%

Στον πίνακα 6.2.1.3.α., επεξηγούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσής μας χρησιμοποιώντας τις αναφορές μέτρησης ενός ΚΤ ευρισκόμενου σε ένα όχημα, που διανύει την απόσταση των 5.67 χλμ. και εννέα (9) ακολουθιών παρατήρησης. Η συγκεκριμένη διαδρομή διασχίζει 5 ΤΑ ζώνες (ΤΑ- 0, ΤΑ-1, ΤΑ-2, ΤΑ-3, ΤΑ-4) και έχει διάρκεια 216 δευτερολέπτων. Η σύγκριση των ακολουθιών παρατήρησης με τις κλάσεις ταχύτητας στη βάση δεδομένων, δίνει τη στήλη 3. Σύμφωνα με τον πίνακα 6.2.1.3.β., παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του οχήματος προσεγγίζεται από το ανώτερο όριο των επιλεγμένων μοντέλων ταχύτητας από τη βάση δεδομένων. Επιτυχής εκτίμηση της ταχύτητας ΚΤ επιτυγχάνεται στο 77,78% των περιπτώσεων, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο κατάτμησης K-Means. Οι αναφερόμενες κλάσεις ταχύτητας ανήκουν στο αποδεκτό διάστημα απόκλισης, με τις υπογραμμισμένες κλάσεις να είναι αυτές με επιτυχή εκτίμηση αποτελέσματος.



Σχήμα 6.2.1.3.α.: TA-zones 0, 1 και 2

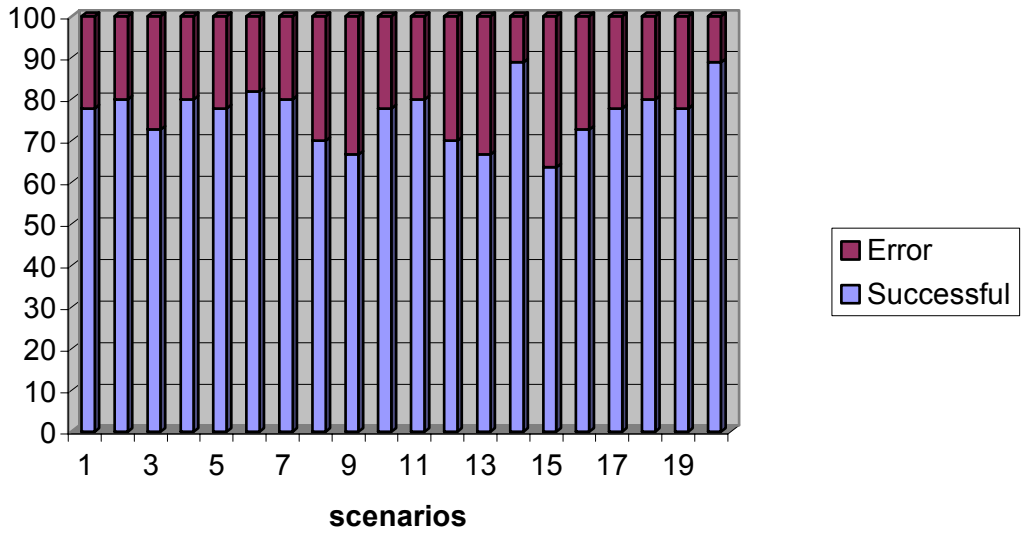


Σχήμα 6.2.1.3.β.: Ταχύτητα προσομοιούμενου οχήματος και εκτίμηση αυτής

Στον πίνακα 6.2.1.3.β. παραθέτουμε 20 διαφορετικά σενάρια συμπεριλαμβανομένου και αυτού, το οποίο έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά. Τα ποσοστά επιτυχούς εκτίμησης ξεκινούν από 64% φθάνοντας σχεδόν έως 90%. Στο σχήμα 6.2.1.3.γ. απεικονίζεται το λάθος της εκτιμούμενης ταχύτητας για διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, ως ποσοστό (%).

Πίνακας 6.2.1.3.β. : Διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης

scenario	**#OS**	**Time Duration (sec)**	**Distance Covered (m)**	**Successful Estimation (%)**
1	9	216	5670	77,78
2	10	240	5510	80,00
3	11	264	5690	72,73
4	10	240	5523	80,00
5	11	264	5410	77,78
6	11	264	5490	81,82
7	10	240	5312	80,00
8	10	240	5196	70,00
9	9	216	4998	66,67
10	9	216	4988	77,78
11	10	240	5192	80,00
12	10	240	5184	70,00
13	9	216	4884	66,67
14	9	216	4736	88,89
15	9	216	4916	63,64
16	11	264	5453	72,73
17	11	264	5295	77,78
18	10	240	5543	80,00
19	11	264	5578	77,78
20	9	216	5310	88,89
			Mean	76,55



Σχήμα 6.2.1.3.γ.: Επιτυχής εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ υπό διαφορετικά σενάρια κίνησης

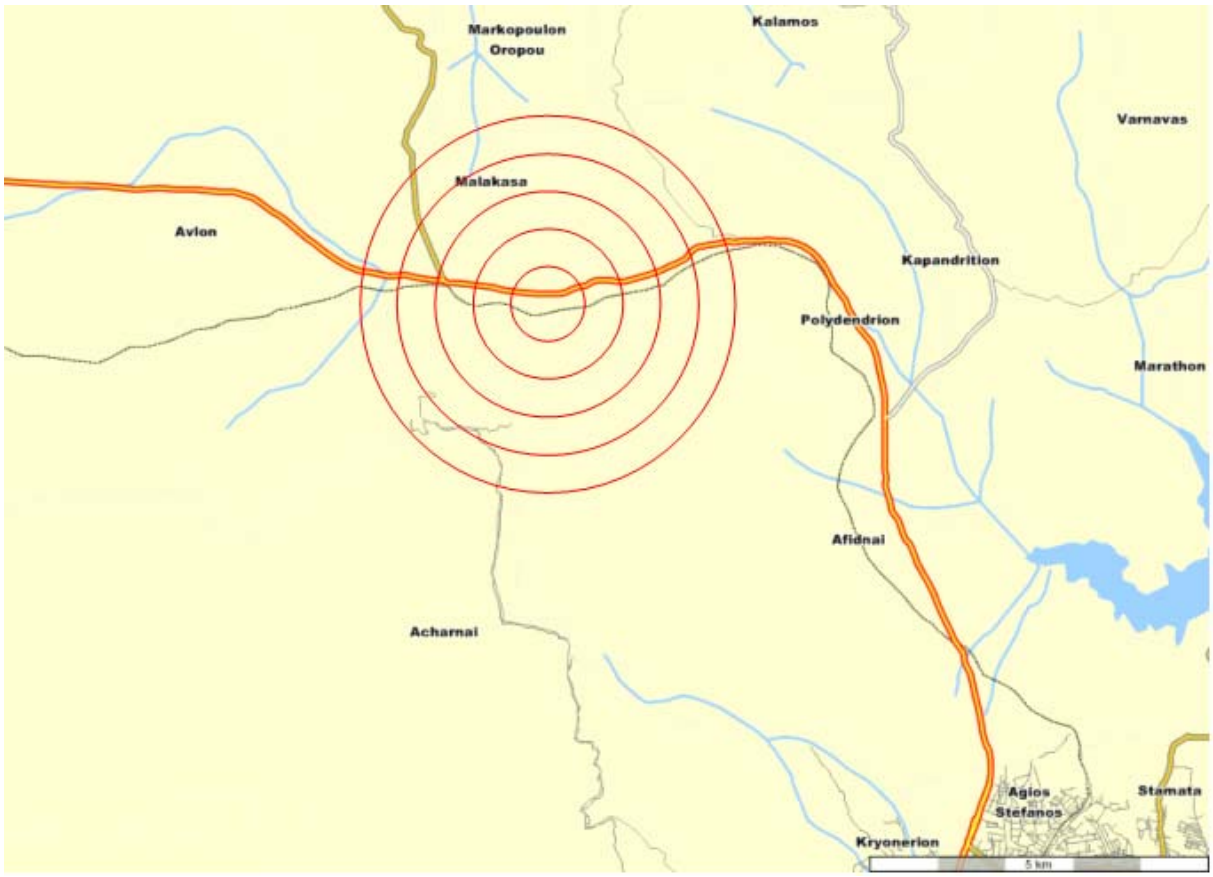
6.2.1.4. Χρήση μοντέλου διάδοσης σήματος (μη αστικό περιβάλλον – GSM δίκτυο)

Το τμήμα της εξεταζόμενης οδού έχει μήκος 5.53 χλμ. ενώ μοντελοποιήθηκαν και οι δύο κατευθύνσεις της. Η μοντελοποίηση της παραγράφου 4.5.1.1. καθορίζει και τη διακύμανση της ταχύτητας του εξεταζόμενου οχήματος, η οποία και απεικονίζεται στο σχήμα 6.2.1.4.β.. Το μοντέλο διάδοσης σήματος που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε στην παράγραφο 5.4.2.1..

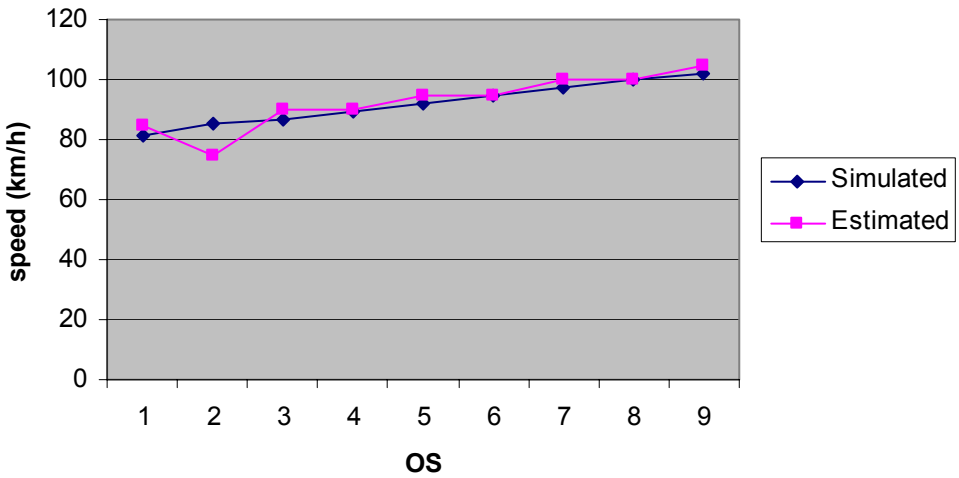
Πίνακας 6.2.1.4.α. : Σύγκριση της υπολογιζόμενης και πραγματικής ταχύτητας του δοκιμαστικού οχήματος

OS	Ταχύτητα Οχήματος	Πιθανά Μοντέλα Ταχύτητας	Χρονικό Διάστημα	Διανυθείσα Απόσταση	Επιτυχής Εκτίμηση
1	81,55	sp13_TA4_E sp14_TA4_E (85)	24	544	Yes
2	84,15	sp11_TA3_E sp12_TA3_E	24	561	No
3	86,76	sp14_TA2_E sp15_TA2_E (90)	24	578	Yes
4	89,39	sp14_TA1_E sp15_TA1_E (90)	24	596	Yes
5	92,03	sp15_TA0_E sp16_TA0_E (95)	24	614	Yes
6	94,68	sp15_TA1_E sp16_TA1_E (95)	24	631	Yes
7	97,34	sp16_TA2_E sp17_TA2_E (100)	24	649	Yes
8	100,00	sp16_TA3_E sp17_TA3_E (100)	24	667	Yes
9	102,33	sp17_TA4_E sp18_TA4_E (105)	24	682	Yes
		Total	216 sec	5.53 km	88.89%

Στον πίνακα 6.2.1.4.α., επεξηγούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσής μας χρησιμοποιώντας τις αναφορές μέτρησης ενός ΚΤ ευρισκόμενου σε ένα όχημα, που διανύει την απόσταση των 5.53 χλμ. και εννέα (9) ακολουθιών παρατήρησης. Η συγκεκριμένη διαδρομή διασχίζει 5 ΤΑ ζώνες (ΤΑ- 0, ΤΑ-1, ΤΑ-2, ΤΑ-3, ΤΑ-4) και έχει διάρκεια 216 δευτερολέπτων. Η σύγκριση των ακολουθιών παρατήρησης με τις κλάσεις ταχύτητας στη βάση δεδομένων, δίνει τη στήλη 3. Σύμφωνα με τον πίνακα 6.2.1.4.β., παρατηρούμε ότι η ταχύτητα του οχήματος προσεγγίζεται από το ανώτερο όριο των επιλεγμένων μοντέλων ταχύτητας από τη βάση δεδομένων. Επιτυχής εκτίμηση της ταχύτητας ΚΤ επιτυγχάνεται στο 88,89% των περιπτώσεων, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο κατάτμησης K-Means. Οι αναφερόμενες κλάσεις ταχύτητας ανήκουν στο αποδεκτό διάστημα απόκλισης, με τις υπογραμμισμένες κλάσεις να είναι αυτές με επιτυχή εκτίμηση αποτελέσματος.



Σχήμα 6.2.1.4.α.: TA-zones 0, 1 και 2

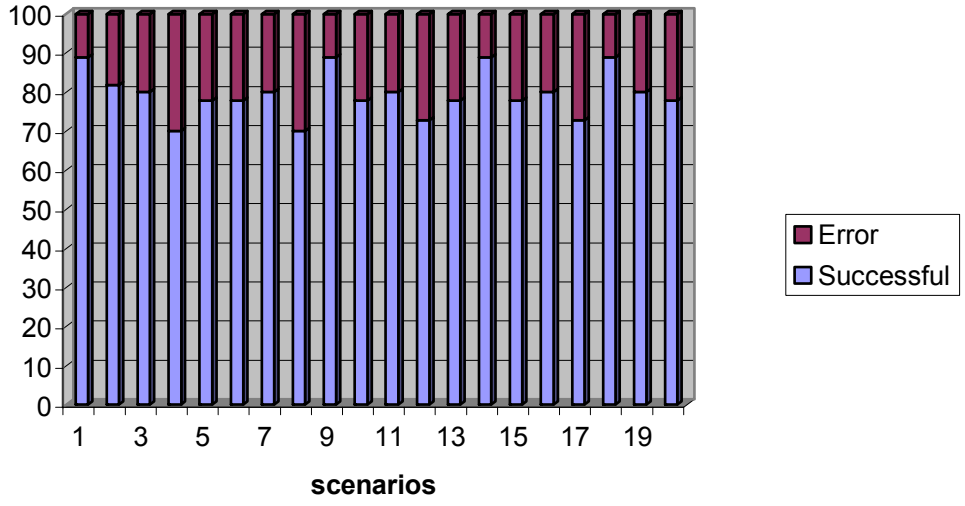


Σχήμα 6.2.1.4.β.: Ταχύτητα προσομοιούμενου οχήματος και εκτίμηση αυτής

Στον πίνακα 6.2.1.4.β. παραθέτουμε 20 διαφορετικά σενάρια συμπεριλαμβανομένου και αυτού, το οποίο έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά. Τα ποσοστά επιτυχούς εκτίμησης είναι όλα πάνω από 70% φθάνοντας σχεδόν 89% σε μια περίπτωση, ενώ στο σχήμα 6.2.1.4.γ. απεικονίζεται το λάθος της εκτιμούμενης ταχύτητας για διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, ως ποσοστό (%).

Πίνακας 6.2.1.4.β. : Διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης

scenario	**#OS**	**Time Duration (sec)**	**Distance Covered (m)**	**Successful Estimation (%)**
1	11	264	5670	88,89
2	11	264	5510	81,82
3	10	240	4932	80,00
4	10	240	5019	70,00
5	9	216	4512	77,78
6	9	216	4511	77,78
7	10	240	5044	80,00
8	10	240	4892	70,00
9	9	216	4319	88,89
10	9	216	4277	77,78
11	10	240	5192	80,00
12	11	264	5584	72,73
13	11	264	5284	77,78
14	9	216	4736	88,89
15	9	216	4916	77,78
16	10	240	5453	80,00
17	11	264	5295	72,73
18	9	216	5143	88,89
19	10	240	5578	80,00
20	11	264	5310	77,78
			Mean	79,48



Σχήμα 6.2.1.4.γ.: Επιτυχής εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ υπό διαφορετικά σενάρια κίνησης

6.2.1.5. Συμπεράσματα

Κατά τη προσομοίωση ΚΤ κινούμενου σε αστικό ή μη περιβάλλον, είτε κάνοντας χρήση χάρτη ραδιοκάλυψης, είτε βασιζόμενοι σε μοντέλο διάδοσης σήματος, καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Υψηλά ποσοστά επιτυχούς εκτίμησης ταχύτητος ΚΤ, παρατηρούνται σε περιπτώσεις όπου η ακολουθία μετρήσεων στάθμης σήματος κατερχόμενης ζεύξης περιέχει σύνορο TA ή RTT ζώνης. Δεδομένου ότι το μήκος TA ζώνης (480m) είναι μεγαλύτερο από το μήκος RTT ζώνης (70m), είναι αναμενόμενο σε UMTS δίκτυα να έχουμε υψηλότερα ποσοστά επιτυχούς εκτίμησης ταχύτητος ΚΤ σε σύγκριση με δίκτυα GSM.
- Μεγάλες αυξομειώσεις στη ταχύτητα του εξεταζόμενου ΚΤ έχουν σαν αποτελέσματα μείωση της ακρίβειας εκτίμησης ταχύτητος του ΚΤ. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η ακολουθία μετρήσεων στάθμης σήματος κατερχόμενης ζεύξης σε δίκτυο GSM αποτελείται από 50 μετρήσεις, οπότε η χρονική διάρκειά της είναι 24 sec, ενώ σε δίκτυα UMTS, η αντίστοιχη ακολουθία μετρήσεων στάθμης σήματος κατερχόμενης ζεύξης αποτελείται από 500 μετρήσεις, έχοντας ως αποτέλεσμα χρονική διάρκεια 5 sec. Είναι προφανές πως η αυξομείωση της ταχύτητας του ΚΤ, επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελέσματα σε δίκτυο GSM και σε μικρότερο βαθμό σε δίκτυο UMTS.
- Η μοντελοποίηση τόσο των κύριων όσο και δευτερευουσών οδών θα αύξανε τις επιδόσεις του μοντέλου εκτίμησης ταχύτητας σε περιπτώσεις αλλαγής κατεύθυνσης του ΚΤ, από την κύρια οδό σε δευτερεύουσες οδούς.
- Σχεδόν στο σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων, η εκτιμούμενη ταχύτητα από τη μοντελοποίηση είναι υψηλότερη από την ταχύτητα του προσομοιούμενου ΚΤ αλλά σε καμία περίπτωση μεγαλύτερη του 1% της ταχύτητας του ΚΤ. Θεωρούμε ότι η παραπάνω διαφορά θα μειώνεται αναλόγως της μείωσης του διαστήματος μεταξύ των κλάσεων ταχύτητας κατά τη μοντελοποίηση. Τη στιγμή αυτή το διάστημα μεταξύ των κλάσεων ταχύτητας είναι 5 km/h.
- Στα σενάρια προσομοίωσης παρατηρείται ότι η ακρίβεια εκτίμησης ταχύτητος του ΚΤ είναι ανάλογη της διάρκειας προσομοίωσης και αυξάνεται αυξανομένης της διάρκειας προσομοίωσης.
- Κατά τη προσομοίωση κίνησης ΚΤ σε μη αστικό περιβάλλον, παρατηρούμε μεγαλύτερα επίπεδα ακρίβειας σε σύγκριση με την προσομοίωση κίνησης ΚΤ σε αστικό περιβάλλον. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε μη αστικό περιβάλλον έχουμε συνθήκες διάδοσης LOS και μόνο αυτές, σε αντίθεση με συνθήκες διάδοσης τόσο LOS όσο και NLOS που έχουμε σε αστικό περιβάλλον.
- Κατά την προσομοίωση κίνησης ΚΤ σε μη αστικό περιβάλλον παρατηρούμε ότι ακόμα και όταν το ΚΤ κινείται με μια μέση ταχύτητα της τάξης των 100 km/h, το διάστημα που διατρέχει κατά το χρονικό διάστημα μιας πλήρους ακολουθίας μετρήσεων στάθμης σήματος κατερχόμενης

ζεύξης (24 sec) είναι της τάξεως των 670 μέτρων. Δεδομένου ότι το διάστημα αυτό υπερβαίνει το εύρος μιας ΤΑ ζώνης, η μοντελοποίηση τέτοιου μεγέθους διαστημάτων καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη, ενώ πιθανές αυξομειώσεις της ταχύτητας θα είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ακρίβειας εκτίμησης της ταχύτητας του ΚΤ.

- Βελτίωση της προτεινόμενης μεθόδου θα είχαμε αν:
    - εξετάζαμε συγκεκριμένα σύνολα κλάσεων ταχύτητας ανάλογα με την ώρα υπολογισμού. Σε ώρες κυκλοφοριακής αιχμής τα εξεταζόμενα σύνολα κλάσεων ταχύτητας θα αντιστοιχούσαν σε μικρά και μεσαία επίπεδα ταχύτητας (βελτίωση ως προς την πολυπλοκότητα).
    - κατά τη μοντελοποίηση, μειώναμε το διάστημα μεταξύ των κλάσεων ταχύτητας (βελτίωση ως προς την ακρίβεια εκτίμησης).

6.2.2. Επάρκεια πλήθους οχημάτων

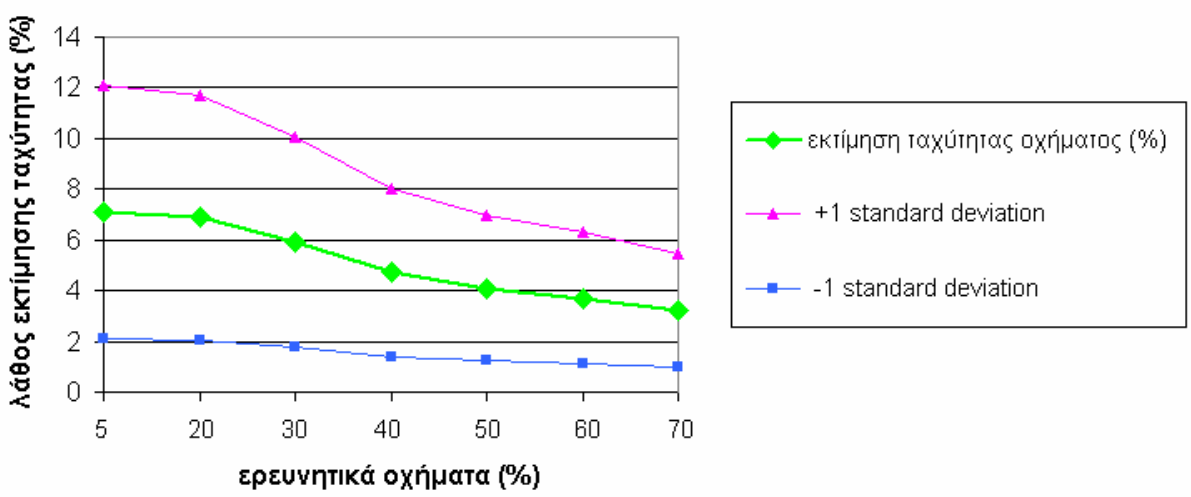
Στην περιγραφείσα προσομοίωση, οχήματα εισάγονται στο δίκτυο με σταθερή ταχύτητα, που υπακούει σε δύο τύπους κατανομών: τη Gaussian κατανομή και τη δίπλευρη Poisson κατανομή. Δημιουργήσαμε διαφορετικά σενάρια που αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταστάσεις δικτύων και κίνησης λωρίδων, ενώ θέσαμε διαφορετικές παραμέτρους πλήθους οχημάτων και ταχύτητας για τις δύο λωρίδες του, υπό προσομοίωση, αυτοκινητόδρομου. Το μήκος της, υπό προσομοίωση διαδρομής, διαιρέθηκε σε τμήματα του 1.5 km. Κατά τη μοντελοποίηση προσμετράται ο αριθμός των οχημάτων ανά τμήμα διαδρομής, καθώς και η ταχύτητά τους, για περίοδο μιας ώρας. Τα αποτελέσματα είναι εκτιμήσεις λάθους ταχύτητας, υπολογισμένες με τον αρμονικό μέσο όρο (ΑΜ). Η χρήση του ΑΜ προκειμένου να υπολογίσουμε το λάθος ταχύτητας του οχήματος, έχει σαν σκοπό το φιλτράρισμα ακραίων τιμών ταχύτητας που παράγονται κατά την προσομοίωση (βλέπε 5.5.3.). Τρεις περιπτώσεις διερευνούνται καλύπτοντας αστικού τύπου διαδρομές (δύο λωρίδες με / χωρίς ελεύθερη ροή), ενώ τα αποτελέσματα απεικονίζονται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν. Στόχος μας είναι να αποδείξουμε πως το θεωρητικό όριο του 5% επί του συνολικού πλήθους των οχημάτων όπως αυτό αποδείχτηκε στη παράγραφο 4.3., είναι επαρκές για την αντιπροσώπευση του συνολικού πλήθους οχημάτων στην υπό εξέταση οδό.

6.2.2.1. Gaussian κατανομή ταχύτητας

Στη περίπτωση αυτή, τα οχήματα εισάγονται στο δίκτυο έχοντας σταθερή ταχύτητα, η οποία ακολουθεί τη Gaussian κατανομή. Δοκιμάσαμε διαφορετικές μέσες τιμές με μικρές τιμές απόκλισης (δεδομένου ότι η ταχύτητα οχημάτων τα οποία κινούνται σε μποτιλιαρισμένους δρόμους έχει τέτοια χαρακτηριστικά).

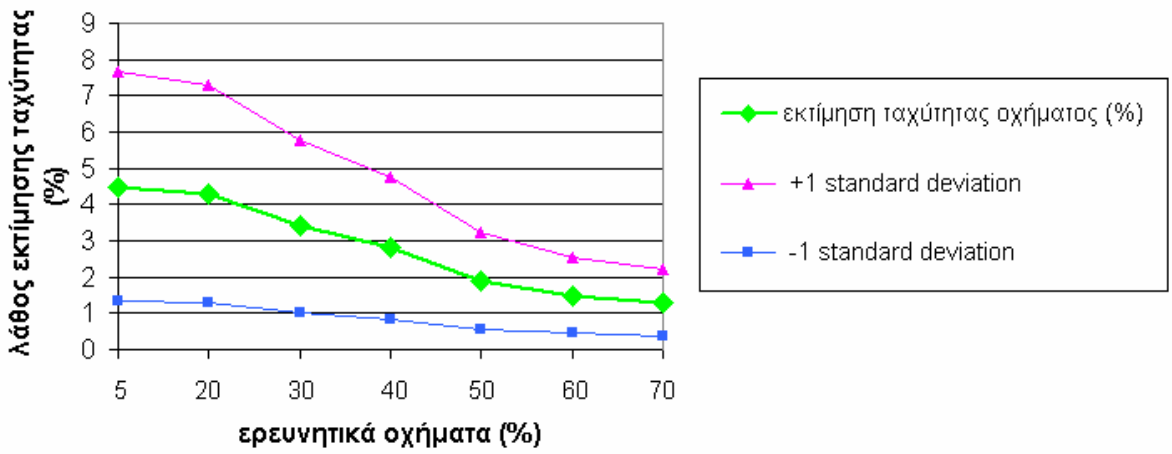
Περίπτωση 1: ελεύθερη ροή κίνησης και στις δύο λωρίδες

	μέση ταχύτητα	πυκνότητα
λωρίδα 1	90 km/h	1800 v/h
λωρίδα 2	80 km/h	2400 v/h



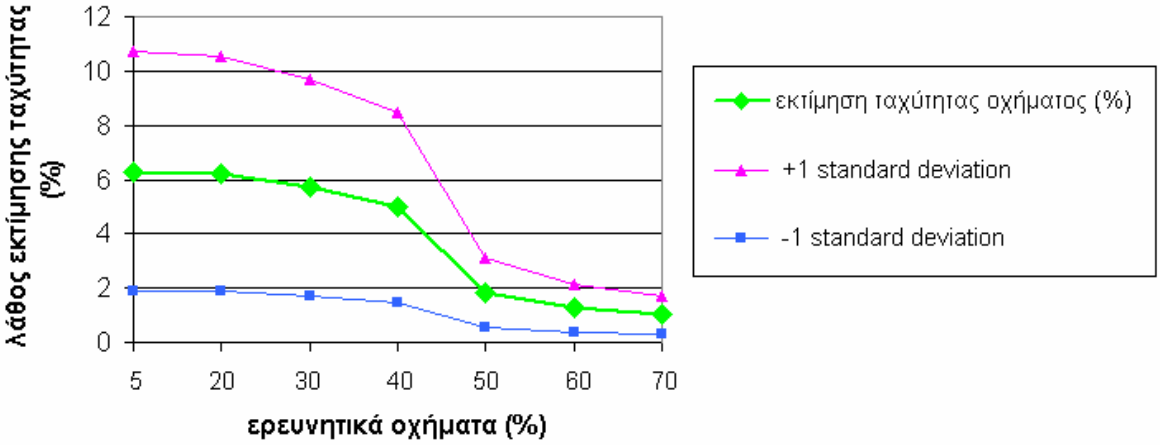
Περίπτωση 2 : χαμηλή ροή κίνησης και στις δύο λωρίδες

	μέση ταχύτητα	πυκνότητα
λωρίδα 1	30 km/h	1000 v/h
λωρίδα 2	40 km/h	1200 v/h



Περίπτωση 3: ελεύθερη ροή κίνησης στη μία λωρίδα και χαμηλή ροή κίνησης στην άλλη λωρίδα - διαφορές στην εκτίμηση της τιμής ταχύτητας για την αργή λωρίδα

	μέση ταχύτητα	**πυκνότητα**
λωρίδα 1	30 km/h	1000 v/h
λωρίδα 2	90 km/h	1800 v/h



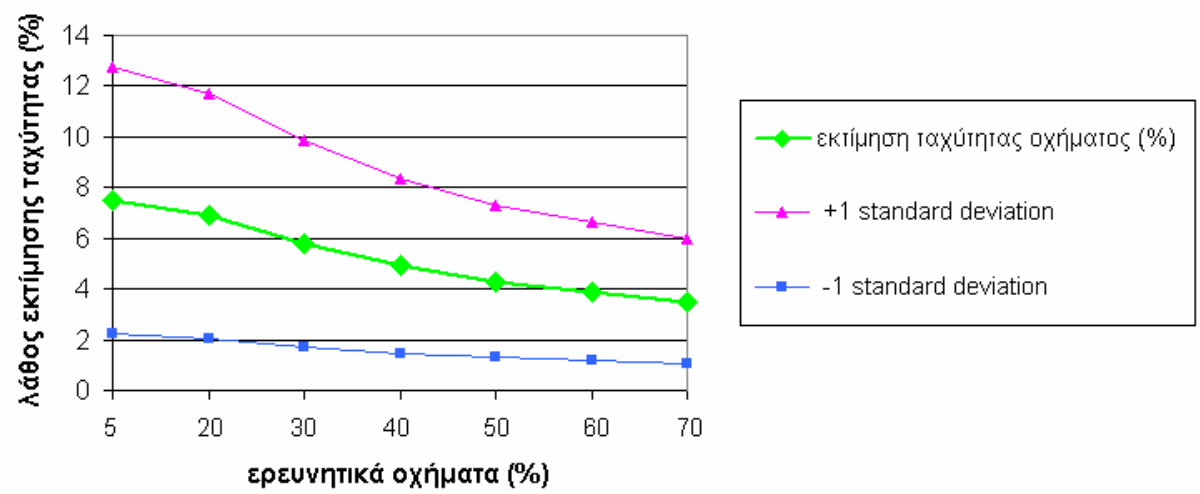
6.2.2.2. Δίπλευρη (two-sided) Poisson κατανομή ταχύτητας

Στη περίπτωση αυτή, τα οχήματα εισάγονται στο δίκτυο έχοντας σταθερή ταχύτητα, η οποία ακολουθεί τη δίπλευρη κατανομή Poisson. Οι τιμές της δίπλευρης κατανομής Poisson πρέπει να τηρούν τον ακόλουθο κανόνα:

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = 1 .$$

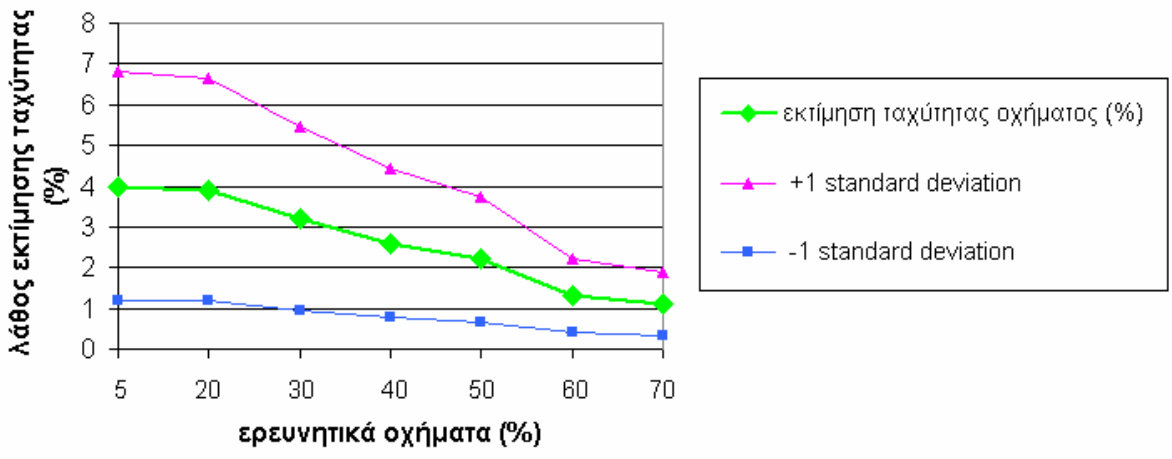
Περίπτωση 1: ελεύθερη ροή κίνησης και στις δύο λωρίδες

	μέση ταχύτητα	πυκνότητα
λωρίδα 1	90 km/h	1800 v/h
λωρίδα 2	80 km/h	2400 v/h



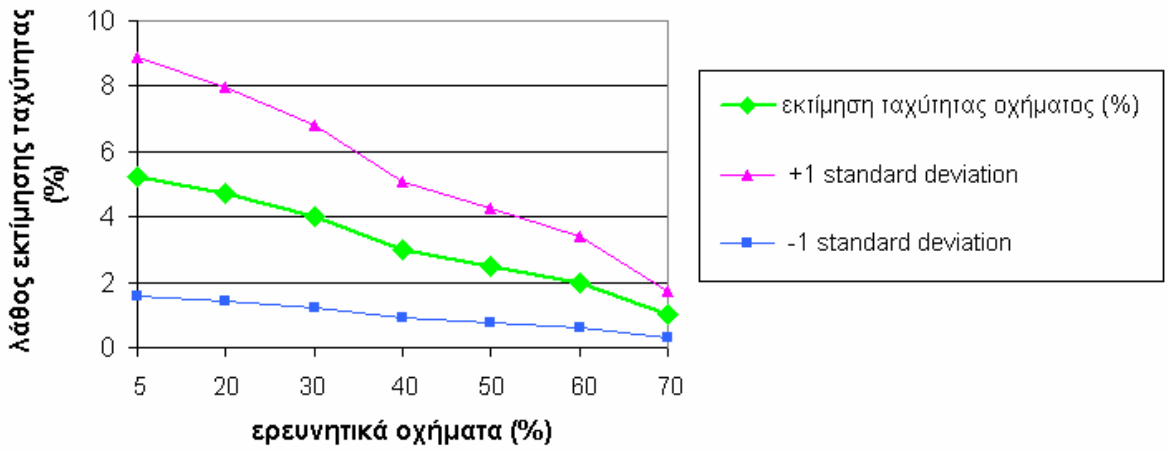
Περίπτωση 2: χαμηλή ροή κίνησης και στις δύο λωρίδες

	μέση ταχύτητα	πυκνότητα
λωρίδα 1	30 km/h	1000 v/h
λωρίδα 2	40 km/h	1200 v/h



Περίπτωση 3: ελεύθερη ροή κίνησης στη μία λωρίδα και χαμηλή ροή κίνησης στην άλλη λωρίδα - διαφορές στην εκτίμηση της τιμής ταχύτητας για την αργή λωρίδα

	μέση ταχύτητα	**πυκνότητα**
λωρίδα 1	30 km/h	1000 v/h
λωρίδα 2	90 km/h	1800 v/h



6.2.3. Εξαγωγή αναφορών για κίνηση οδικού δικτύου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση της κίνησης όπου:

- στοιχεία από το τμήμα Πολικών Μηχανικών χρησιμοποιούνται προκειμένου να κρίνουμε αν οι γραφικές παραστάσεις των "VD" (ροής-πυκνότητας) και "SD" (ταχύτητας-πυκνότητας) διαγραμμάτων από το προτεινόμενο μοντέλο κίνησης τα περιγράφουν επαρκώς (βλέπε παράγραφο 6.2.3.1).
- στοιχεία τόσο από τη βιβλιογραφία όσο και από το εργαλείο προσομοίωσης (που αφορούν το πλήθος και τη ταχύτητα οχημάτων που έχουν ΚΤ) χρησιμοποιούνται προκειμένου να εξάγουμε τις γραφικές παραστάσεις των "VD" (ροής-πυκνότητας) και "SD" (ταχύτητας-πυκνότητας) διαγραμμάτων από το προτεινόμενο μοντέλο κίνησης (βλέπε παράγραφο 6.2.3.2).

6.2.3.1. Επαλήθευση μοντελοποίησης κίνησης με τη χρήση πραγματικών δεδομένων

(Δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τη δοκιμή αυτή).

6.2.3.2. Επαλήθευση μοντελοποίησης κίνησης με τη χρήση δεδομένων προσομοίωσης

Κατά τη μοντελοποίηση κίνησης οδικού δικτύου επεξεργαζόμαστε είτε πραγματικά στοιχεία ([PS91]) (παράγραφος 6.2.3.2.1.) είτε στοιχεία προσομοίωσης που έχει ήδη εκτελεστεί στη παράγραφο 6.2.1. (παράγραφοι 6.2.3.2.2., 6.2.3.2.3., 6.2.3.2.4.).

Σε κάθε ένα από τα παρακάτω σενάρια, πρωταρχικό ρόλο παίζει η εξεταζόμενη οδός. Για κάθε οδό ορίζονται οι χαρακτηριστικές της παράμετροι όπως μέγιστη πυκνότητα k_m, μέγιστη ροή q_m, απόσταση μεταξύ των οχημάτων l, όριο ταχύτητας V_l. Οι παράμετροι αυτοί προκύπτουν από τον αριθμό λωρίδων κίνησης, από την ρύθμιση των σηματοδοτών στη συγκεκριμένη περιοχή σε περίπτωση ύπαρξη των τελευταίων καθώς και από το όριο ταχύτητας της εξεταζομένης οδού.

Το διάγραμμα "SD" (ταχύτητας-πυκνότητας) επεξεργάζεται από το "Curve Fitting Tool" του MATLAB με διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Κριτήριο για τον υπολογισμό της ταχύτητας $V_{\max}$ είναι το SSE (Sum of Squares due to Error) ή αλλιώς η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων στηρίζεται στη δοκιμή "Χι τετράγωνο" ($\chi^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left[y_i - f(x_i, \alpha, \beta)\right]^2}{\sigma_i^2}$ όπως περιγράφηκε στη παράγραφο 4.5.2.1.) σε περίπτωση που τα y_i ακολουθούν την κανονική κατανομή.

6.2.3.2.1. Αστικό περιβάλλον (σενάριο 1) – πραγματικά στοιχεία

Στη παράγραφο αυτή χρησιμοποιούμε πραγματικά στοιχεία κίνησης οδικού δικτύου ([PS91]). Για την εξεταζόμενη οδό, οι παράμετροι που την χαρακτηρίζουν φαίνονται στον πίνακα 6.2.3.2.1.α.:

λ = 31,61	a = 0.32
l = 7 m	V_l = 13.8 m/sec

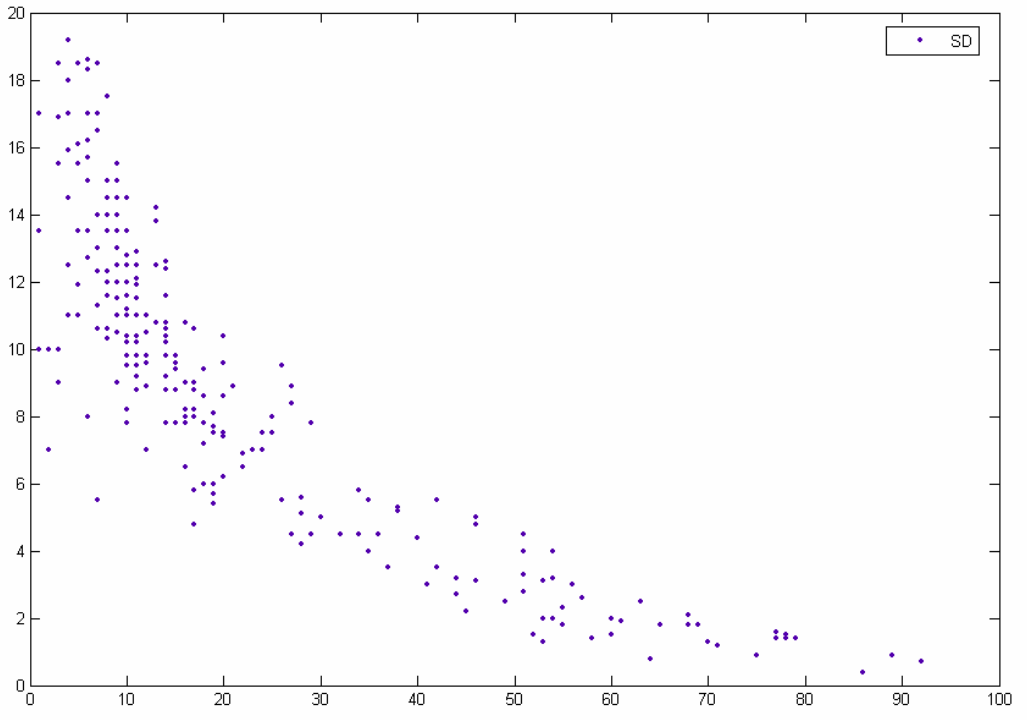
Πίνακας 6.2.3.2.1.α. Τιμές Παραμέτρων

Χρησιμοποιώντας το "Curve Fitting Toolbox" του προγράμματος MATLAB, παίρνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα (πίνακας 6.2.3.2.1.β.):

q_m (veh/sec)	0,23	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27
$V_{\max}$ (m/sec)	15,5	16	16,5	17.09	17,5	18	18,5
(SSE)	8.76 e+001	3.67 e+001	1.23 e+001	8.47 e-002	2.96 e+001	3.42 e+001	7.82 e+001

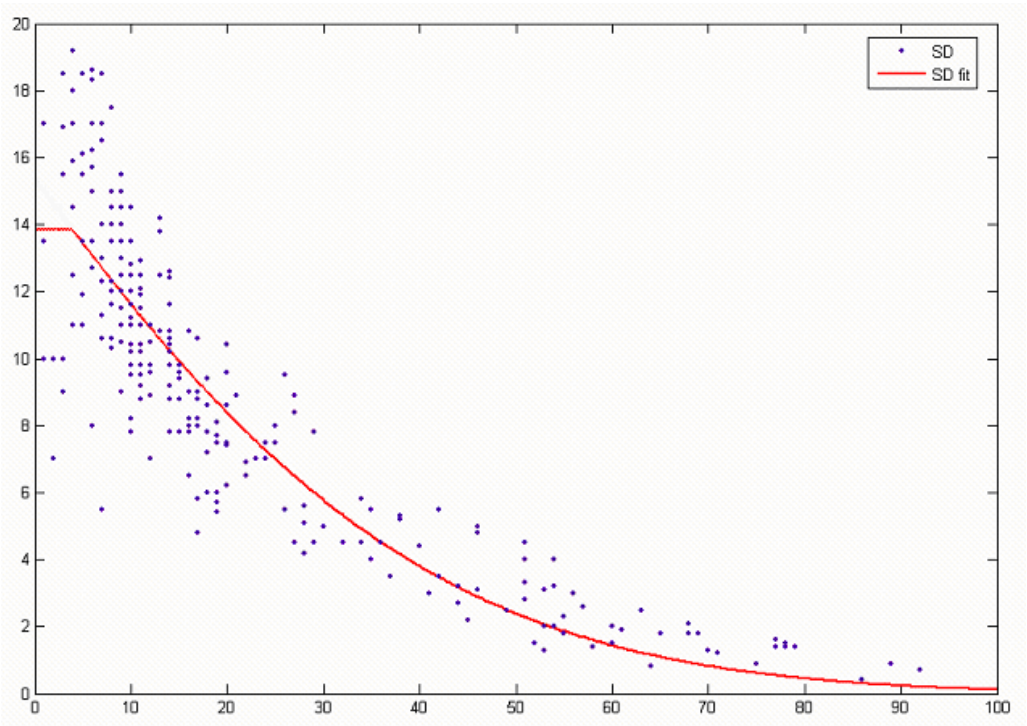
Πίνακας 6.2.3.2.1.β. Αποτελέσματα δοκιμής σεναρίου 1

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που απεικονίζονται στο σχήμα 6.2.3.2.1.α., η γραφική παράσταση με την καλύτερη απόδοση με κριτήριο το SSE παρουσιάζεται για $V_{\max}$ = 17.1 m/sec. Σύμφωνα με τη μοντελοποίησή μας αυτή είναι η μέγιστη ταχύτητα κίνησης οχημάτων στην εξεταζόμενη οδό. Επειδή $V_{\max} > V_l$, τα στοιχεία χαρακτηρίζουν την εξεταζόμενη οδό από κίνηση ελευθέρας ροής. Στο σχήμα 6.2.3.2.1.β. βλέπουμε και την προσαρμοσμένη γραφική παράσταση.



Σχήμα 6.2.3.2.1.α. SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα

(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)



Σχήμα 6.2.3.2.1.β. SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα

(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)

6.2.3.2.2. Αστικό περιβάλλον (σενάριο 2) –στοιχεία προσομοίωσης (πρώτη οδός)

Κατά το σενάριο 2 στηριζόμαστε στη εξεταζόμενη οδό της παραγράφου 6.2.1.1.1.. Το τμήμα της οδού Αλεξάνδρας περιέχεται στη ζώνη ΤΑ-0, μήκους περίπου 1100 μέτρων. Το χρονικό διάστημα καταγραφής οχημάτων είχε διάρκεια 5 λεπτά. Τα ΚΤ εισάγονται στο δίκτυο έχοντας σταθερή ταχύτητα, η οποία ακολουθεί τη Gaussian κατανομή. Για το τμήμα της εξεταζομένης οδού, οι παράμετροι που την χαρακτηρίζουν φαίνονται στον πίνακα 6.2.3.2.2.α.:

# ΚΤ = 113	λ = 27.09	a = 0.32
duration = 300 sec	l = 6 m	V_l = 11.2 m/sec

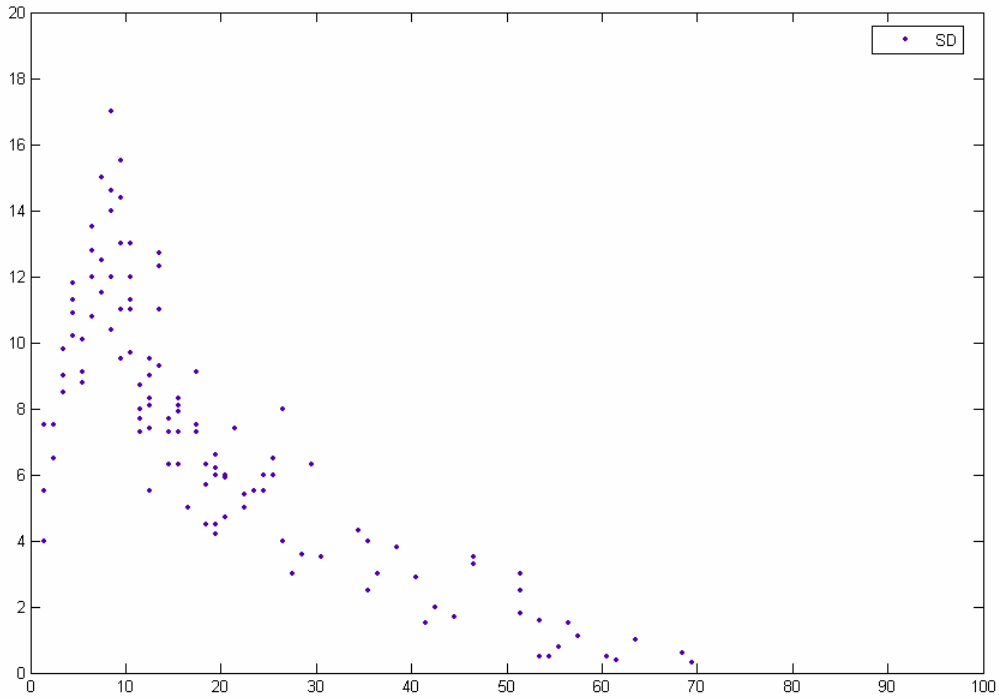
Πίνακας 6.2.3.2.2.α. Τιμές Παραμέτρων

Χρησιμοποιώντας το "Curve Fitting Toolbox" του προγράμματος MATLAB, παίρνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα (πίνακας 6.2.3.2.1.β.):

q_m (veh/sec)	0,24	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28
$V_{\max}$ (m/sec)	14.0	14.5	15.0	15.23	15.5	16.0	16.5
(SSE)	2.16 e+002	3.27 e+001	1.33 e+001	2.98 e-03	3.22 e+001	8.33 e+001	1.28 e+002

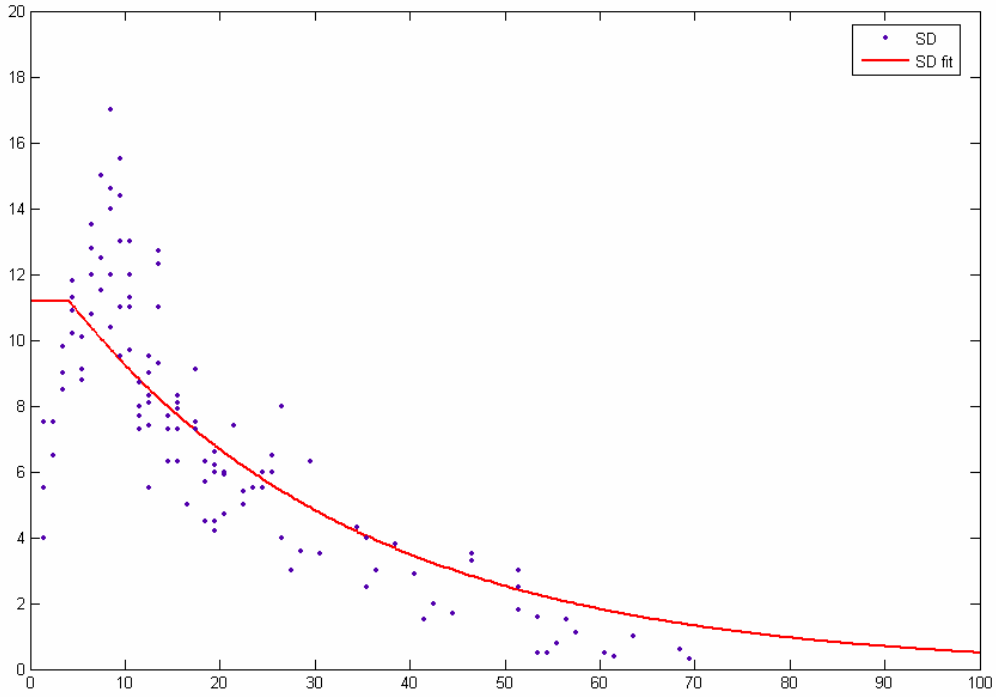
Πίνακας 6.2.3.2.2.β. Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου 2

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που απεικονίζονται στο σχήμα 6.2.3.2.2.α., η γραφική παράσταση με την καλύτερη απόδοση με κριτήριο το SSE παρουσιάζεται για $V_{\max}$ = 15.23 m/sec. Επειδή $V_{\max} > V_l$, η εξεταζόμενη οδός χαρακτηρίζεται από ελεύθερη ροή κίνησης. Στο σχήμα 6.2.3.2.2.β. βλέπουμε και την προσαρμοσμένη γραφική παράσταση.



Σχήμα 6.2.3.2.2.α. SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα

(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)



Σχήμα 6.2.3.2.2.β. SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα

(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)

6.2.3.2.3. Αστικό περιβάλλον (σενάριο 3) –στοιχεία προσομοίωσης (δεύτερη οδός)

Κατά το σενάριο 3 στηριζόμαστε στη εξεταζόμενη οδό της παραγράφου 6.2.1.2.. Το τμήμα της οδού Κηφισίας περιέχεται στη ζώνη ΤΑ-1, μήκους περίπου 570 μέτρων. Το χρονικό διάστημα καταγραφής οχημάτων είχε διάρκεια 5 λεπτά. Τα ΚΤ εισάγονται στο δίκτυο έχοντας σταθερή ταχύτητα, η οποία ακολουθεί τη Gaussian κατανομή. Για το τμήμα της εξεταζομένης οδού, οι παράμετροι που την χαρακτηρίζουν φαίνονται στον πίνακα 6.2.3.2.3.α.:

# ΚΤ = 101	λ = 22.58	a = 0.32
duration = 300 sec	l = 5 m	V_l = 9.7 m/sec

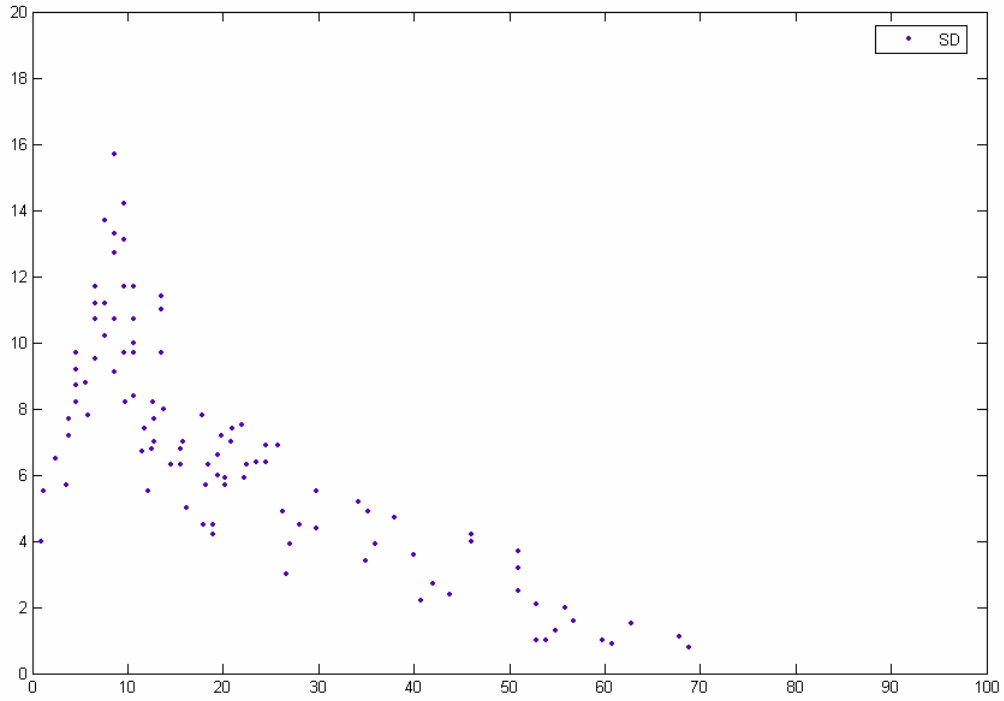
Πίνακας 6.2.3.2.3.α. Τιμές Παραμέτρων

Χρησιμοποιώντας το "Curve Fitting Toolbox" του προγράμματος MATLAB, παίρνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα (πίνακας 6.2.3.2.3.β.):

q_m (veh/sec)	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20
$V_{\max}$ (m/sec)	7,5	8	8,5	8,79	9	9,5	10
(SSE)	8.34 e+002	2.25 e+002	2.77 e+001	9.97 e-002	2.27 e+001	3.43 e+001	5.58 e+001

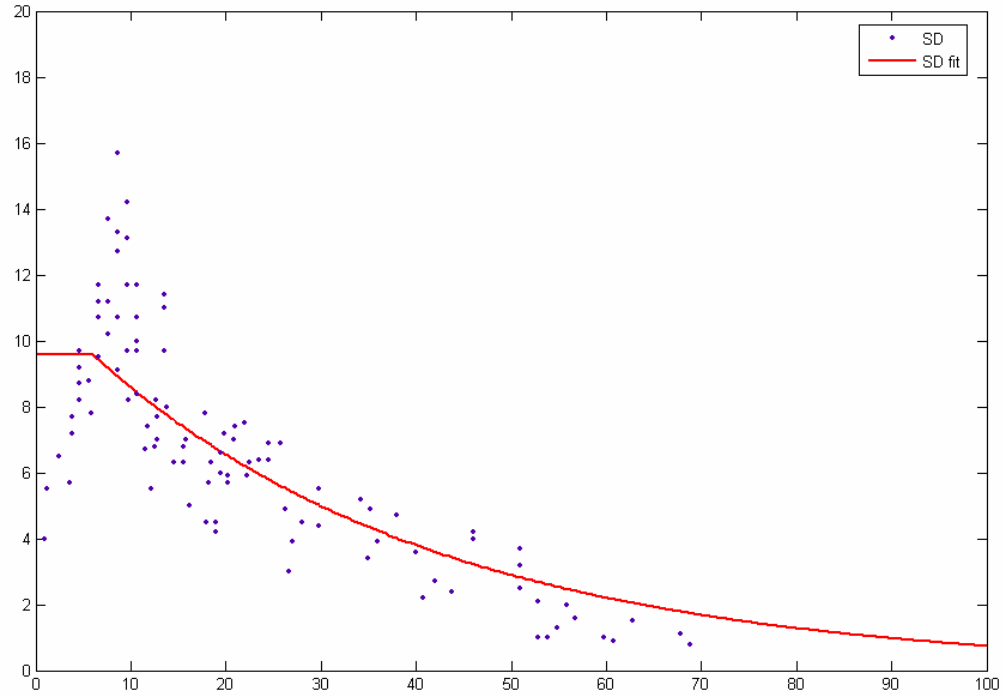
Πίνακας 6.2.3.2.3.β. Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου 3

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που απεικονίζονται στο σχήμα 6.2.3.2.3.α., η γραφική παράσταση με την καλύτερη απόδοση με κριτήριο το SSE παρουσιάζεται για $V_{\max}$ = 8.79 m/sec. Επειδή $V_{\max} < V_l$, η εξεταζόμενη οδός χαρακτηρίζεται από χαμηλή ροή κίνησης. Στο σχήμα 6.2.3.2.3.β. βλέπουμε και την προσαρμοσμένη γραφική παράσταση.



Σχήμα 6.2.3.2.3.α. SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα

(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)



Σχήμα 6.2.3.2.3.β. SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα

(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)

6.2.3.2.4. Μη αστικό περιβάλλον (σενάριο 4) –στοιχεία προσομοίωσης

Κατά το σενάριο 4 στηριζόμαστε στη εξεταζόμενη οδό ταχείας κυκλοφορίας της παραγράφου 6.2.1.3.. Το τμήμα της εξεταζομένης οδού είναι τμήμα του αυτοκινητόδρομου Αθηνών – Θεσσαλονίκης στη περιοχή της Μαλακάσας και περιέχεται στη ζώνη ΤΑ-0, μήκους περίπου 1100 μέτρων. Το χρονικό διάστημα καταγραφής οχημάτων είχε διάρκεια 10 λεπτά. Τα ΚΤ εισάγονται στο δίκτυο έχοντας σταθερή ταχύτητα, η οποία ακολουθεί τη Gaussian κατανομή. Για το τμήμα της εξεταζομένης οδού, οι παράμετροι που την χαρακτηρίζουν φαίνονται στον πίνακα 6.2.3.2.4.α.:

# ΚΤ = 220	λ = 45.16	a = 0.32
duration = 600 sec	l = 10 m	V_l = 27.8 m/sec

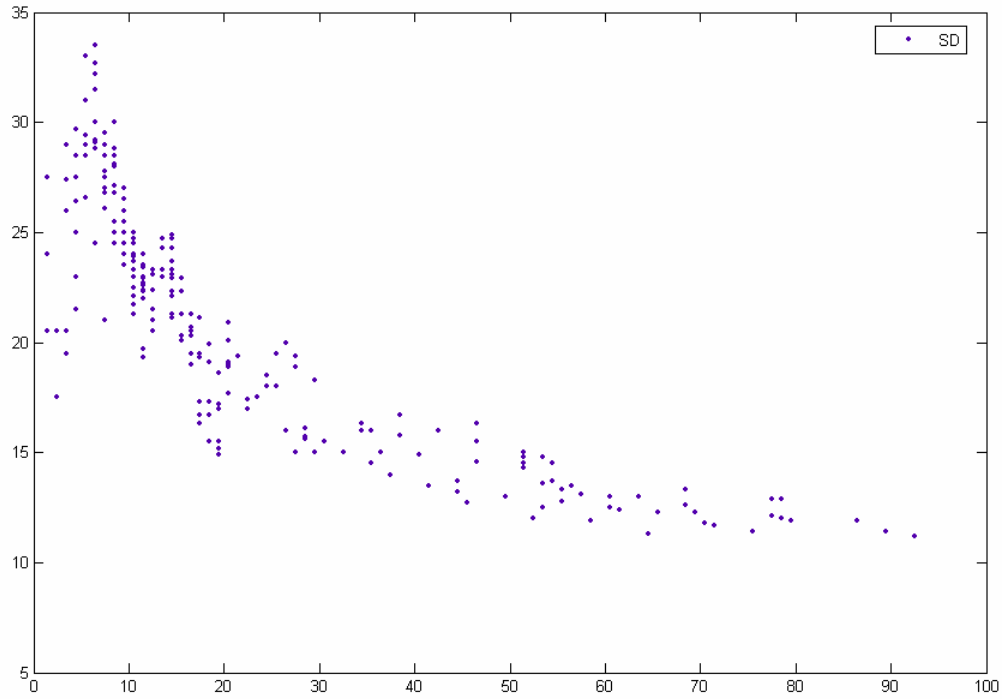
Πίνακας 6.2.3.2.4.α. Τιμές Παραμέτρων

Χρησιμοποιώντας το "Curve Fitting Toolbox" του προγράμματος MATLAB, παίρνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα (πίνακας 6.2.3.2.4.β.):

q_m (veh/sec)	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35
$V_{\max}$ (m/sec)	32	32,5	33	33,2	33,5	34	34,5
(SSE)	2.76 e+002	3.67 e+001	1.23 e+001	2.96 e-004	3.42 e+001	8.47 e+001	1.82 e+002

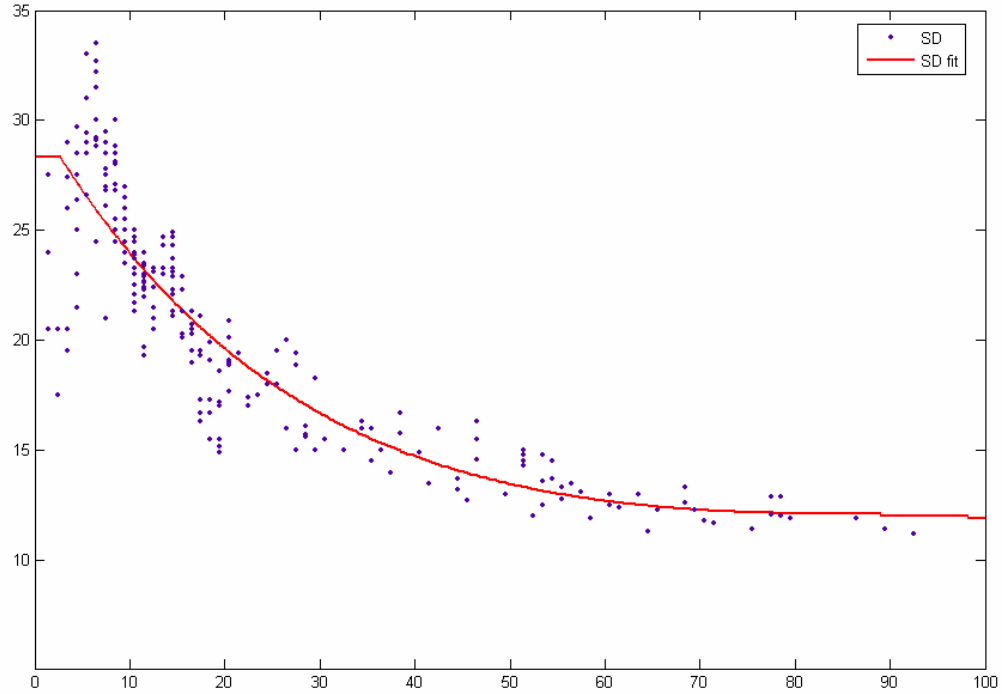
Πίνακας 6.2.3.2.4.β. Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου 4

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που απεικονίζονται στο σχήμα 6.2.3.2.4.α., η γραφική παράσταση με την καλύτερη απόδοση με κριτήριο το SSE παρουσιάζεται για $V_{\max}$ = 33.2 m/sec. Επειδή $V_{\max} > V_l$, η εξεταζόμενη οδός χαρακτηρίζεται από ελεύθερη ροή κίνησης. Στο σχήμα 6.2.3.2.4.β. βλέπουμε και την προσαρμοσμένη γραφική παράσταση.



Σχήμα 6.2.3.2.4.α. SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα

(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)



Σχήμα 6.2.3.2.4.β. SD (ταχύτητα-πυκνότητα) διάγραμμα

(S: m/sec, D: πλήθος οχημάτων ανά μονάδα μήκους εξεταζόμενης διαδρομής)

6.2.4. Δοκιμή της μεθόδου με χρήση πραγματικών δεδομένων (Vodafone Pilotentwicklung GmbH)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε στοιχεία από το τμήμα της Vodafone στη Γερμανία (Vodafone Pilotentwicklung GmbH). Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται η δομή των στοιχείων ενώ στο δεύτερο μέρος έχουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση των παραπάνω στοιχείων.

6.2.4.1. Δομή των στοιχείων

Μεταξύ άλλων, οι αναφορές μέτρησης περιείχαν τους ακόλουθους τύπους μηνυμάτων: Measurement Report, Channel release, Channel activation, System Information 6. Το σημαντικότερο από τα παραπάνω μηνύματα (Measurement Report), περιγράφονται στον πίνακα 6.2.4.1..

Πίνακας 6.2.4.1. Δομή στοιχείων (Measurement Report)

Field No	Field name	Description	Format	Example
1	Identifier	Message short name	7 characters	MEASREP
2	Date	Message date and time	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.000	2003-10-09 19:23:44.327
3	Probe	Probe number	1 decimal digit (1-5)	3
4	Line	E1-Measurement line number	1 decimal digit (1-8)	5
5	E1TS	E1 timeslot number	2 decimal digits (1-31)	27
6	TEI	Terminal endpoint identifier	3 decimal digits	11
7	TS	Time slot number	1 decimal digit	7
8	Ch	Channel	2 decimal digits (0-31)	8
9	mrn	Measurement result number	3 decimal digits (0-255)	123
10	bsp	BS Power level (Pn –x dB)	2 decimal digits	14
11	msp	MS power level (dBm)	2 decimal digits	38
12	TA	Timing advance	2 decimal digits	4
13	RXLEVallSlots	RXLEV all slots (-dBm)	3 decimal digits	104
14	RXLEVsubsetOfSlots	RXLEV subset of slots (-dBm)	3 decimal digits	72
15	RXLEVfullServCell	RXLEV full serving cell (-dBm)	3 decimal digits	79
16	RXLEVsubServCell	RXLEV sub serving cell (-dBm)	3 decimal digits	60
17	RXLevNCell1	RXLEV-NCELL 1 (-dBm)	3 decimal digits	50
18	BcchFreqNCell1	BCCH-Freq-NCELL 1	2 decimal digits	1
19	BsicNccNCell1	BSIC-NCC-NCELL 1	1 decimal digit	7
20	BsicBccNcell1	BSIC-BCC-NCELL 1	1 decimal digit	0
	|	|	|	|
	|	|	|	|
37	RXLevNCell6	RXLEV-NCELL 6 (-dBm)	3 decimal digits	110
38	BcchFreqNCell6	BCCH-Freq-NCELL 6	2 decimal digits	0
39	BsicNccNCell6	BSIC-NCC-NCELL 6	1 decimal digit	0
40	BsicBccNcell6	BSIC-BCC-NCELL 6	1 decimal digit	0

Βάση της παραπάνω δομής, μια η αναφορά μέτρησης του πίνακα 6.2.4.1. θα είχε την εξής μορφή:

MEASREP,2003-10-01 09:30:13.841,1,1,23,3,7,1,3,0,33,5,107,92,108,101,92,0,6,1,99,1,7,1,103,2,6,6

Ακολουθούν τα σημαντικότερα από τα μηνύματα που περιέχονται στις αναφορές μέτρησης. Σε αυτά περιέχονται καταρχάς το μήνυμα "System Information 6", όπου χρησιμοποιείται για την ανάθεση του probe, line, E1-timeslot και TEI σε συγκεκριμένη κυψέλη. Τα μηνύματα "Channel activation" και "Channel release" χρησιμοποιούνται αντίστοιχα κατά τη δέσμευση/αποδεύσμευση καναλιού για εξυπηρέτηση εισερχομένης κλήσεως.

Πίνακας 6.2.4.2. Δομή στοιχείων (System Information 6)

Field name	Description	Format	Example
Identifier	Message short name	7 characters	SYSINF6
Date	Message date and time	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.000	2003-10-09 19:23:44.327
Probe	Probe number	1 decimal digit (1-5)	3
Line	E1-Measurement line number	1 decimal digit (1-8)	5
E1TS	E1 timeslot number	2 decimal digits (1-31)	27
TEI	Terminal endpoint identifier	3 decimal digits	11
CI	Cell identifier	5 decimal digits	19531

Βάση της παραπάνω δομής, μια αναφορά μέτρησης του πίνακα 6.2.4.2. θα είχε την εξής μορφή: SYSINF6,2003-10-08 22:35:42.478,3,5,17, 11,19531

Πίνακας 6.2.4.3. Δομή στοιχείων (Channel activation)

Field name	Description	Format	Example
Identifier	Message short name	7 characters	CHNAV
Date	Message date and time	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.000	2003-10-09 19:23:44.327
Probe	Probe number	1 decimal digit (1-5)	3
Line	E1-Measurement line number	1 decimal digit (1-8)	5
E1TS	E1 timeslot number	2 decimal digits (1-31)	27
TEI	Terminal endpoint identifier	3 decimal digits	11
TS	Time slot number	1 decimal digit (0-7)	7
Ch	Channel	2 decimal digits (0-31)	8 { = SDDCH +ACCH + ch 0 }
ActTyp	Type of activation	1 decimal digit	1
TA	Timing advance	2 decimal digits	5
HORV	Handover reference value	3 decimal digits	123
EncKey	Encryption Key (if specified)	16 characters	E35543D49A125F00

Βάση της παραπάνω δομής, μια αναφορά μέτρησης του πίνακα 6.2.4.3. θα είχε την εξής μορφή:

CHNAV, 2003-10-09 19:23:44.327,3,5,27, 11,7, 8,1, 5,123,E35543D49A125F00

Πίνακας 6.2.4.4. Δομή στοιχείων (Channel release)

Field name	Description	Format	Example
Identifier	Message short name	7 characters	RCHRA
Date	Message date and time	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.000	2003-10-08 20:23:56.355
Probe	Probe number	1 decimal digit (1-5)	3
Line	E1-Measurement line number	1 decimal digit (1-8)	5
E1TS	E1 timeslot number	2 decimal digits (1-31)	27
TEI	Terminal endpoint identifier	3 decimal digits	11
TS	Time slot number	1 decimal digit	7
Ch	Channel	2 decimal digits (0-31)	8

Βάση της παραπάνω δομής, μια αναφορά μέτρησης του πίνακα 6.2.4.4. θα είχε την εξής μορφή:

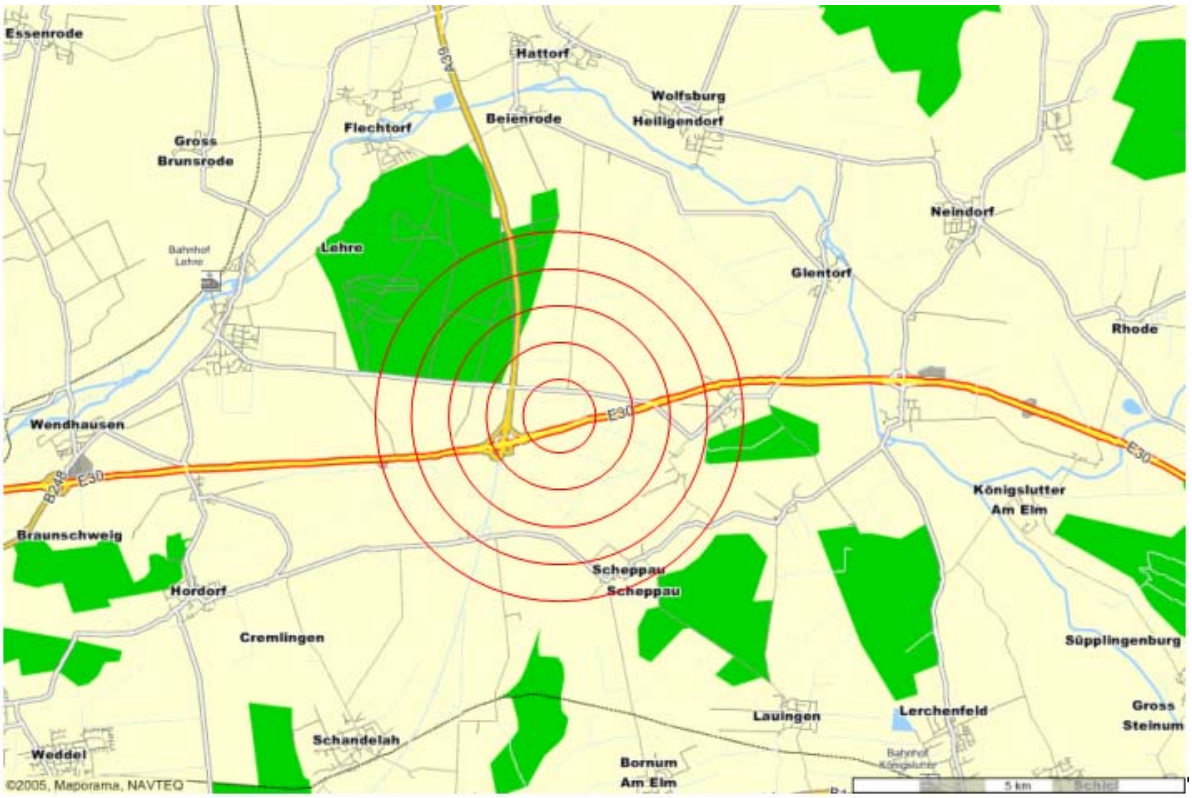
RCHRA,2003-10-08 20:23:56.355,3,5, 27, 11,7,8

Τέλος αξίζει να αναφερθεί η ύπαρξη μιας εφαρμογής που χρησιμοποιείται από το R&D τμήμα της Vodafone στη Γερμανία, το “HandOver Tracker”. Η παραπάνω εφαρμογή, συσχετίζει διαπομπές κυψέλης με ζώνες προπορείας συγχρονισμού κατά τη διάρκεια κλήσεων, εξετάζοντας την Abis διεπαφή. Στοιχεία από την παραπάνω εφαρμογή θα έκαναν ευκολότερη την δημιουργία ιστορικού κίνησης της υπό εξέταση περιοχής.

6.2.4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Προκειμένου να αποδείξουμε την άμεση εφαρμογή που θα μπορούσε να έχει η προτεινόμενη μέθοδος, χρησιμοποιήσαμε αναφορές μέτρησης υπάρχοντος δικτύου κινητής τηλεφωνίας που ευγενικά μας παραχώρησε το τμήμα της Vodafone στη Γερμανία (Vodafone Pilotentwicklung GmbH). Οι αναφορές μέτρησης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποστέλονται από το ΚΤ στο BSC μέσω του ΣΒ, με σκοπό τη διαχείριση των διαπομπών καθώς και του επιπέδου σήματος του ΚΤ. Το λογισμικό στον BSS Software αποφασίζει για τις διαπομπές βασισμένος στην λαμβανόμενη πληροφορία από το ΚΤ στις αναφορές μέτρησης. Οι αναφορές μέτρησης, όπως έχει ήδη περιγραφεί, στέλνονται από το ΚΤ κάθε 480ms κατά τη διάρκεια κλήσεως (TS+Ch), πληροφορώντας το ΣΒ για τη στάθμη σήματος των ΣΒ/ΚΤ (bsp/msp), τη προπορεία συγχρονισμού (TA) καθώς και τη ποιότητα και ισχύ (RXLEV) του σήματος που λαμβάνει το ΚΤ. Οι αναφορές μέτρησης περιέχουν επίσης πληροφορία για τη στάθμη σήματος των γειτονικών ΣΒ (BCCHFreq, BSICNCC BSICBCC). Το ΚΤ μετρά την ισχύ του λαμβανομένου BCCH σήματος, για τον κάθε ένα γειτονικό ΣΒ, από τη λίστα με τους γειτονικούς ΣΒ (βλέπε πίνακα 6.2.4.1.).

Η εξεταζόμενη περιοχή απεικονίζεται στο σχήμα 6.2.4.2.. Πιο συγκεκριμένα, η εξεταζόμενη περιοχή είναι τμήμα του αυτοκινητοδρόμου Ε30 στη Γερμανία. Το εξεταζόμενο τμήμα περιέχει 5 TA ζώνες (TA- 0, TA-1, TA-2, TA-3, TA-4) Κατά την προσομοίωση σε αυτή τη περίπτωση είχαμε μικρότερο πλήθος ακολουθιών μετρήσεων στάθμης σήματος κατερχόμενης ζεύξης συγκριτικά με τις προσομοιώσεις στις ενότητες της παραγράφου 6.2.4.1.. Τα δεδομένα προέρχονταν από ΚΤ τα οποία είχαν ως εξυπηρετών ΣΒ τον HXB488. Από τα δεδομένα που πήραμε και τα οποία αντιστοιχούσαν σε 5 ώρες πραγματικής κίνησης δικτύου κινητής τηλεφωνίας, μπορέσαμε και δημιουργήσαμε επτά (7) κλάσεις ταχύτητας: 110km/h (3 ακολουθίες ταχύτητας), 83km/h (2 ακολουθίες σήματος), 75km/h (4 ακολουθίες σήματος), 60km/h (5 ακολουθίες σήματος), 50km/h (4 ακολουθίες), 40km/h (2 ακολουθίες), 25km/h (2 ακολουθίες σήματος). Συγκρίνοντας ακολουθία σήματος των οποίων ήταν γνωστή η κλάση ταχύτητάς τους, μπορέσαμε να προσεγγίσουμε ικανοποιητικά την κλάση ταχύτητας στην οποία ανήκουν. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.2.4.2..

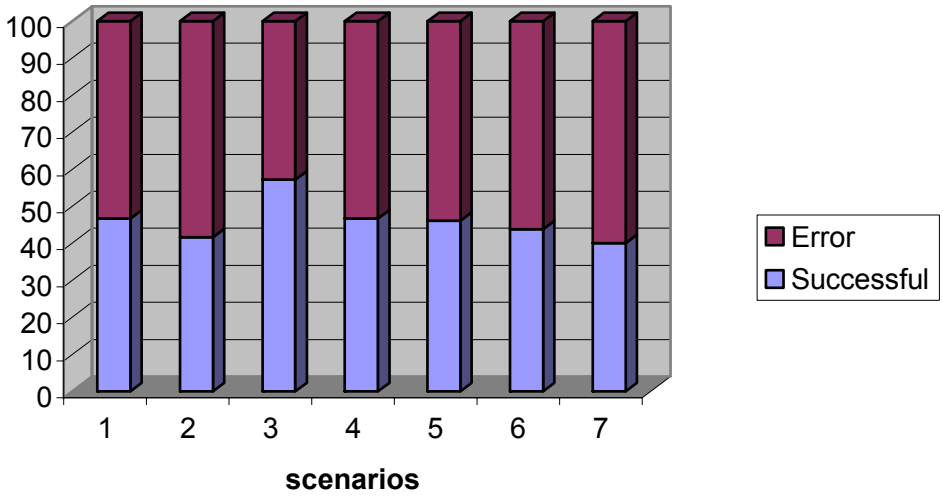


Σχήμα 6.2.4.2.1: Η υπό προσομοίωση περιοχή

Επιτυχής εκτίμηση της ταχύτητας ΚΤ επιτυγχάνεται κατά μέσο όρο στο 46% των περιπτώσεων, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο κατάτμησης CLARA. Τα ποσοστά επιτυχούς εκτίμησης ξεκινούν από 40% ξεπερνώντας το 58%. Παρατηρούμε ότι αυξανομένου του πλήθους ακολουθιών εκπαίδευσης, αυξάνεται και η ακρίβεια εκτίμησης της ταχύτητας του ΚΤ (κάτι αναμενόμενο το οποίο όμως αποδεικνύεται κιόλας). Στο σχήμα 6.2.4.2.2. απεικονίζεται το λάθος της εκτιμούμενης ταχύτητας για διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, ως ποσοστό (%).

Πίνακας 6.2.4.2.1. : Σύγκριση της υπολογιζόμενης και πραγματικής ταχύτητας του δοκιμαστικού οχήματος

Σενάριο	**Κλάση ταχύτητας**	**Πλήθος ακολουθιών εκπαίδευσης**	**Πλήθος δοκιμών**	**Επιτυχής Εκτίμηση (%)**
1	110km/h	4	15	46,67 (7)
2	83km/h	2	12	41,67 (5)
3	75km/h	6	14	57,14 (8)
4	60km/h	5	15	46,67 (7)
5	50km/h	4	13	46,15 (6)
6	40km/h	2	16	43,75 (7)
7	25km/h	2	15	40,00 (6)
				46,01



Σχήμα 6.2.4.2.2.: Επιτυχής εκτίμηση ταχύτητας ΚΤ για διαφορετικές κλάσεις ταχύτητας

Παραπομπές

[MK99] S. Mangold, S. Kyriazakos, Chair of Communication Networks, RWTH Aachen, "*Applying Pattern Recognition Techniques based on Hidden Markov Models for Vehicular Position Location in Cellular Networks*", IEEE VTC 1999-Fall, September 1999, Amsterdam.

[NH02] T. Nypan, O. Hallingstad, "*A cellular positioning system based on database comparison -The hidden Markov model based estimator versus the Kalman filter*", NORSIG, Norway, October 2002.

[PS91] M. Papageorgiou and G. Schmidt, "Freeway Traffic Modeling, (Technische Universität München, Germany) – Concise encyclopedia of traffic & transportation systems", p.162-167, M. Papageorgiou Ed., Pergamon Press 1991.

[SKS03] Theodore Stamoulakatos, George Karetsos, Efstathios Sykas, "*A Location Based Information Service reliant on DCM cellular network location method*", 7th International Conference "Information Technologies and Telecommunications" in the Baltic Sea and CEE Region (Wireless Workshop), Riga, Latvia, April 2-5, 2003.

[SKS04] Theodore Stamoulakatos, Sofoklis Kyriazakos and Efstathios Sykas, "***Hidden Markov Modeling and Macroscopic Traffic Filtering supporting Location Based Service***", Second International Working Conference, HET-NETs '04, Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks, Ilkley, West Yorkshire, U.K., July 26-28, 2004.

[SKS05] Theodore Stamoulakatos, Sofoklis Kyriazakos and Efstathios Sykas, "***Hidden Markov Modeling and Macroscopic Traffic Filtering supporting Location Based Service***", Journal of Computer Communications, 2005 (accepted with minor changes).

[SMA05] Theodore S. Stamoulakatos, Antonis S. Markopoulos, Miltiadis E. Anagnostou, Michalis E. Thelogou, "***Vehicle Velocity Estimation Based on RSS Measurements***", Journal of Wireless Personal Communications, 2005 (accepted with minor changes).

[SS031] Theodore Stamoulakatos, Efstathios Sykas, "***Hidden Markov Modeling and Macroscopic Traffic Filtering supporting Location Based Services***", Wireless Communications and Mobile Computing., (in press), DOI: 10.1002 /wcm.350.

[SS032] Theodore Stamoulakatos, Efstathios Sykas, "*Signal Pattern Recognition, Hidden Markov Modeling and Traffic Flow Modeling Filters Applied in Existing Signaling of Cellular Networks for Vehicle Volume Estimation*", ISICT '03, International Symposium on Information and Communication Technologies, Trinity College, Dublin, Ireland, September 24-26, 2003.

[SYVS04] Theodore S. Stamoulakatos, Angelos Yannopoulos, Theodora Varvarigou, Efstathios D. Sykas, "*Hidden Markov Filtering with Microscopic Traffic Modeling for Vehicle Load Estimation in cellular networks*", IASTED International Conference on Communication Systems and Networks (CSN 2003), Marbella, Spain, September 1-3, 2004.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

7.0. Εισαγωγή

Όπως αναδείχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το προτεινόμενο μοντέλο εκτίμησης κυκλοφοριακής κίνησης, απέδειξε την αποτελεσματικότητά του κατά τον προσδιορισμό της κυκλοφοριακής κίνησης σε κεντρικές οδικές αρτηρίες της πόλης, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο εφαρμογές ΥΚΚ σε χρήστες ΚΤ.

Καταρχάς κατά την προσομοίωση κίνησης ερευνητικού οχήματος σε αστικό ή αγροτικό περιβάλλον, η ακρίβεια εκτίμησης της ταχύτητας του ΚΤ ξεκινά από 63,64% φτάνοντας το 89%, κάνοντας χρήση είτε χάρτη ραδιοκάλυψης, είτε μοντέλου διάδοσης σήματος. Τα υψηλά ποσοστά ακριβείας δείχνουν την καταλληλότητα της επιλογής των Κρυφών Μαρκοβιανών Μοντέλων, κατά την επεξεργασία σήματος κατερχόμενης ζεύξης (βλέπε παράγραφο 6.2.1.). Τα αποτελέσματα κατά την προσομείωση οχημάτων κατά τη δοκιμασία επάρκειας πλήθους, αποδεικνύουν ότι το θεωρητικό όριο του 5% επαρκεί για να αντιπροσωπεύσει το συνολικό πλήθος οχημάτων, στον υπό εξέταση δρόμο (βλέπε παράγραφο 6.2.2.).

Το προτεινόμενο μοντέλο κίνησης, αποδεικνύεται αξιόπιστο κατά την εξαγωγή συμπερασμάτων για ελεύθερη ή χαμηλή ροή κίνησης, χρησιμοποιώντας δεδομένα κυκλοφοριακής κίνησης τα οποία έχουν παραχθεί κατά τη προσομοίωσή μας (βλέπε παράγραφο 6.2.3.). Τέλος, εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μοντελοποίηση, σε πραγματικά δεδομένα σηματοδοσίας δικτύου κινητής τηλεφωνίας, από το τμήμα R&D της Vodafone Γερμανίας, κρίνουμε τα αποτελέσματα ως ικανοποιητικά, λαμβάνοντας βέβαια υπόψην το μικρό όγκο δεδομένων που επεξεργάστηκαμε (βλέπε παράγραφο 6.2.4.).

Το κόστος της εφαρμογής τέτοιων τεχνολογιών και σίγουρα οι προοπτικές πιθανών εσόδων από μια πλήρη εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά. Η ερώτηση που τίθεται δεν είναι το αν χρειάζεται να γνωρίζουμε ή όχι την πληροφορία για τους χρόνους μετακίνησης και ποια είναι η προθυμία του τελικού χρήστη να πληρώσει. Η κύρια ερώτηση είναι πώς η τεχνολογία δικτύων κινητής τηλεφωνίας μπορεί να ανταγωνιστεί την υποδομή δικτύου αισθητήρων για τα οδικά τμήματα, που δεν είναι ακόμα εξοπλισμένα με αυτήν την τεχνολογία.

Μια γενική εκτίμηση αξιολόγησης της αγοράς δείχνει ότι το κόστος εφαρμογής της υποδομής δικτύου κινητής τηλεφωνίας είναι €300.000 ανά 100 χλμ. Το κόστος της υποδομής βρόχων, προκειμένου να εξοπλιστεί η ίδια απόσταση του αυτοκινητόδρομου (και προς τις δύο κατευθύνσεις)

είναι κατά προσέγγιση €800.000. Δεν κάναμε οποιεσδήποτε εκτιμήσεις των τρεχουσών δαπανών και στις δύο περιπτώσεις. Το κατά πολύ υψηλότερο κόστος εγκατάστασης της υποδομής βρόχων, μπορεί μερικώς να εξηγηθεί από τη συνεχή ανάγκη συντήρησης των αισθητήρων οδικού δικτύου. Πιθανά προβλήματα με αυτούς τους αισθητήρες θα μπορούσε να οδηγήσει σε βλάβη ολόκληρου του δικτύου, οπότε και αδυναμία παροχής πληροφοριών όπως συνέβη στην Αθήνα το 2004, όπου τεχνικά προβλήματα δεν επέτρεψαν τη λειτουργία του δικτύου των αισθητήρων του Ε.Μ.Π. σε συνεργασία με το Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών, για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Οι δαπάνες εγκατάστασης δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα, δεδομένου ότι οι δύο τεχνολογίες δεν έχουν ακριβώς τις ίδιες λειτουργίες. Εντούτοις η κάθε μία έχει πολλές άλλες επιχειρησιακές εφαρμογές στην περιοχή της, καλύπτοντας κατά πολύ τις υπηρεσίες που σχετίζονται με την εκτίμηση χρόνων μετακίνησης. Η εκτίμηση της χρονικής διάρκειας μετακίνησης βασισμένη σε τεχνολογία κινητών τηλεπικοινωνιών, είναι ένα σημαντικό βήμα, προς την κατεύθυνση του ενεργού ρόλου που καλείται να παίξει ο τομέας ασύρματων τηλεπικοινωνιών στη λεωφόρο της κοινωνίας της πληροφορίας. Όσο ένας πάροχος χρησιμοποιεί τη δικτυακή του υποδομή, προκειμένου να υπολογίσει τις ταχύτητες κίνησης των οχημάτων που το τελευταίο καλύπτει, οπότε και να είναι σε θέση παράσχει πληροφορίες σε τρίτους, δεν υπάρχει θέμα εμπιστευτικότητας. Οποιοσδήποτε πάροχος ξέρει οποιαδήποτε στιγμή ποιος καλεί και από που, για λόγους τιμολόγησης. Η συγκέντρωση όλων αυτών των στοιχείων για παροχή επιπλέον υπηρεσιών στους διαχειριστές οδικής κυκλοφορίας, παραμένει απολύτως ανώνυμη.

7.1. Περαιτέρω Έρευνα

7.1.1. Επεκτείνοντας τη μελέτη μας σε περιβάλλον WCDMA

Αντίστοιχη της μεθόδου μέτρησης προπορείας συγχρονισμού (timing advance-TA) του δικτύου GSM, είναι η μέτρηση του χρόνου πλήρους διαδρομής (round trip time) σε δίκτυο UMTS, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο όπως και στο δίκτυο GSM. Βασιζόμενοι λοιπόν στην έννοια της εκτίμησης της καθυστέρησης διάδοσης, η επιτεύξιμη ακρίβεια θέσης μπορεί να υπολογιστεί από το γεγονός ότι κάθε chip αντιστοιχεί σε περίπου 70m σε απόσταση διάδοσης, αντί των 554m σε δίκτυο GSM ([HT01]). Η τιμή αυτή μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα είδος κατώτερου ορίου απόδοσης για την εκτίμηση θέσεως. Τέλος, τέτοια επίπεδα ακριβείας σε δίκτυο WCDMA έχει σαν επακόλουθο τη δημιουργία βάσης δειγμάτων, που θα παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια, κατά τον υπολογισμό ταχύτητας ΚΤ, από τη στιγμή που οι κυψέλες είναι μικρότερες. Ήδη έχουμε παρουσιάσει αποτελέσματα προσομοιώνοντας τη κίνηση ΚΤ σε περιβάλλον UMTS. Περισσότερα αποτελέσματα θα αναδείκνυαν τις δυνατότητες του προτεινόμενου συστήματος.

7.1.2. ΚΤ σε κατάσταση ανενεργούς σύνδεσης

Όταν το ΚΤ είναι σε κατάσταση ανενεργούς σύνδεσης, δεν στέλνει αναφορές μέτρησης στο δίκτυο. Ανεξάρτητα από τη κατάσταση του ΚΤ, αυτό πραγματοποιεί πάντοτε μετρήσεις, οι οποίες σε περίπτωση που θα μεταδίδονταν, θα είχαν ως αποτέλεσμα μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση της ταχύτητας μεμονωμένου οχήματος, σύμφωνα με τη μοντελοποίηση που έχει προταθεί στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Ένας τρόπος προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, θα ήταν η αποθήκευση των αναφορών μέτρησης κατά το τελευταίο λεπτό στο ΚΤ. Οι ικανότητες των σημερινών ΚΤ καλύπτουν αυτήν την απαίτηση. Προκειμένου να αυξηθεί το μέγεθος των δεδομένων προς αποθήκευση, διάφορες μέθοδοι κωδικοποίησης μπορούν να εφαρμοστούν όπως οι διαφορικοί κώδικες. Με αυτό τον τρόπο, μέρη του διανύσματος του σήματος τα οποία έχουν πολύ χαμηλή διαφορική τιμή, μπορούν να αποκλειστούν. Επίσης, με τη χρήση μιας μεθόδου συμπίεσης, η απαιτούμενη χωρητικότητα σε μνήμη είναι πολύ χαμηλή και τα δεδομένα μπορούν να αποθηκευθούν είτε στη μνήμη του ΚΤ, είτε στη κάρτα SIM. Προδιαγράφοντας αυτό το χαρακτηριστικό στο δίκτυο GSM, ο πάροχος είναι σε θέση να έχει σε οποιαδήποτε στιγμή μια αναφορά μέτρησης (από το κανάλι SACCH). Δεδομένου ότι θα είχαμε περισσότερες ακολουθίες παρατηρήσεων, θα μπορούσε να επιτευχθεί μια ακριβέστερη εκτίμηση της ταχύτητας μεμονωμένου οχήματος. Για το λόγο αυτό, πρέπει να υπάρξει επέκταση στις υπάρχουσες προδιαγραφές, προκειμένου να επιτευχθεί μια αναφορά μέτρησης κατόπιν αιτήματος. Επιπλέον πρέπει να υπάρξει και νέα επέκταση λογισμικού ειδικά για το ΚΤ.

7.1.3. Διανύσματα σήματος πολλών διαστάσεων

Όλες οι αναφορές μετρήσεων που αναλύθηκαν, περιείχαν πληροφορίες στάθμης σήματος από την εξυπηρετούσα κυψέλη. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο συνδρομητής επικοινωνεί με το ΣΒ αλλά το σήμα εξασθενεί, λόγω της ύπαρξης των κτιρίων μεταξύ του ΣΒ και του ΚΤ. Μια γειτονική κυψέλη ενδεχομένως να βρίσκεται σε μεγάλη μεν απόσταση από τον συνδρομητή, οπότε και το σήμα είναι πιθανότερο να είναι χαμηλότερης στάθμης, αλλά επειδή η γειτονική κυψέλη δεν σκιάζεται από κανένα κτίριο, ο υπολογισμός της θεωρητικής τιμής στάθμης σήματος κατερχόμενης ζεύξης ενδεχομένως να είναι ακριβέστερη. Με άλλα λόγια θα ήταν πολύ χρήσιμη η χρήση της μεταδιδόμενης πληροφορίας, τόσο από τον εξυπηρετών ΣΒ όσο και από τις γειτονικούς ΣΒ.

Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί κάνοντας χρήση του ήδη ορισμένου RSSI διανύσματος, όπως αυτό έχει οριστεί στην παράγραφο 5.3.. Το μοναδικό αυτό διάνυσμα RSSI διάστασης $(N+1)\times 2$ για κάθε θέση του ΚΤ, ουσιαστικά απεικονίζει τη θέση του ΚΤ σε $(N+1)$ διαστάσεις. Τρισδιάστατη αναπαράσταση έχει χρησιμοποιηθεί σε άλλες διατυπώσεις, όπως επεξεργασία και κατανομή τρισδιάστατων δομών βιολογικών μακρομοριακών στοιχείων (όπως πρωτεΐνες) ή της γεω-

κωδικοποίησης που καλύπτει την ορυκτή εξερεύνηση, σχεδίαση εθνικών οδών και γενικότερα υπηρεσίες GIS (γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών).

Κατά τη χρήση μοντέλου HMM $(N+1)$ διαστάσεων, κάθε σημείο θα περιγράφεται με ένα RSSI διάνυσμα που θα περιέχει πληροφορία ραδιοκύματος από $(N+1)$ ΣΒ. Η διαδικασία θα είναι η ίδια με αυτή της επεξεργασίας μονοδιάστατου μοντέλου HMM αλλά η ακρίβεια της συγκεκριμένης μοντελοποίησης αναμένεται πολύ υψηλότερη.

7.1.4. Αυξάνοντας την ακρίβεια του μοντέλου

Δεδομένου ότι η ανάπτυξη και εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τροποποιήσεις ούτε στο ΚΤ αλλά ούτε και στην υποδομή του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, την κάνει ελκυστική λύση σε παρόχους κινητής τηλεφωνίας που προσφέρουν εφαρμογές ΥΠΘ. Στις ακόλουθες παραγράφους περιγράφουμε τρόπους με τους οποίους θα μπορούσε να αυξηθεί η ακρίβεια του μοντέλου. Στην παράγραφο 7.1.4.1. αναφερόμαστε σε μεθόδους οι οποίες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν κατά την εξέταση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας δίνοντας καλύτερης ποιότητας πληροφορία για τη θέση και ταχύτητα των ΚΤ. Στην παράγραφο 7.1.4.2. αναφερόμαστε σε μοντελοποιήσεις οι οποίες εφαρμοζόμενες θα βοηθούσαν στην εξαγωγή ακριβέστερων αναφορών κυκλοφοριακής κίνησης στις υπό εξέταση οδούς. Στο βαθμό που οι προαναφερόμενες λύσεις είναι ευκολότερα εφαρμόσιμες από το παροχέα θα καταστούν και αμεσότερα υλοποίησημες.

7.1.4.1. Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας

Σε ένα κυψελοειδές περιβάλλον υπάρχουν προφανώς και άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν στην επιτεύξιμη ακρίβεια. Για να εξαλείψουμε την επίδραση του προβλήματος (near-far) ενός ΚΤ, το οποίο βρίσκεται πολύ κοντά σε ΣΒ, οι προδιαγραφές περιέχουν επίσης μια μέθοδο εισαγωγής ανενεργών περιόδων, κατά τη μετάδοση του ΣΒ. Αυτό θα επέτρεπε τις μετρήσεις συγχρονισμού από γειτονικούς ΣΒ, των οποίων η ισχύς σήματός τους σε αντίθετη περίπτωση θα ήταν πολύ χαμηλή, λόγω της κοντινής αποστάσεως του ΚΤ με τον εξυπηρετών ΣΒ ([K00]).

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο αποτελεσματικό φιλτράρισμα των πιθανών λαθών μέτρησης. Καταρχήν το μήκος των τμημάτων των εξεταζόμενων οδών θα επηρέαζε τη κατανομή του όγκου των οχημάτων, οπότε και την ακρίβεια του αποτελέσματος. Η διαδικασία δειγματοληψίας οχημάτων είναι σημαντική, δεδομένου ότι μόνο ένα ποσοστό ΚΤ μπορεί να μετρηθεί. Σε περίπτωση που υπάρχουν παράλληλοι δρόμοι κοντά στην κύρια οδό που εξετάζουμε, θα μπορούσαμε να οδηγηθούμε σε ανάθεση οχημάτων σε λανθασμένο δρόμο. Επιπλέον πρέπει να είμαστε προσεκτικοί κατά την κατασκευή της βάσεως δεδομένων, με μετρήσεις ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξης για

την κάθε οδό αλλά και για τις διαφορετικές κατανομές της ταχύτητας των οχημάτων στην εξεταζόμενη περιοχή.

Επιπλέον, ανάλογα με το είδος του οχήματος, οι διαφορετικές ταχύτητές τους (φορτηγά σε σύγκριση με αυτοκίνητα) ή η διαφορετική συγκέντρωση ΚΤ (λεωφορεία σε σύγκριση με αυτοκίνητα), θα καταγραφεί και κατά συνέπεια, ειδικό φιλτράρισμα πρέπει να εφαρμοστεί προκειμένου να ξεπεραστούν πιθανά λάθη που ενδεχομένως να προκύψουν. Τέλος, θα μπορούσαν επίσης να εμφανιστούν λάθη που ενδεχομένως να προκύψουν λόγω του λάθους υπολογισμού της κατεύθυνσης της κίνησης. Αποτελεσματικός τρόπος για το φιλτράρισμα αυτού του είδους των λαθών, είναι η χρήση του επιπέδου ισχύος σήματος των γειτονικών κυψελών, που αναφέρεται σαν συνδυασμός του BSIC (κώδικας προσδιορισμού πομποδεκτών σταθμών βάσης) και του καναλιού BCCH. Όσο το ΚΤ είναι σε κατάσταση ενεργούς σύνδεσης και κινείται, οι γειτονικές εκπεμπόμενες κυψέλες δεν παραμένουν ίδιες σε όλη τη διάρκεια της κλήσης, δίνοντάς μας μια ένδειξη για την κατεύθυνση της μετακίνησής του.

Επιπλέον είναι πολύ χρήσιμο να βρεθούν τα σημεία όπου ο χρήστης δεν κινείται. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια από τα σημεία της καμπύλης του επιπέδου ισχύος του κατερχόμενου σήματος, όπου το επίπεδο ισχύος είναι σχεδόν σταθερό (+- 3dBm). Η υπόθεση της παραμονής στα φανάρια σε συνδυασμό με τη βάση δεδομένων, μπορεί να περιορίσει ακόμη περισσότερο την εξεταζόμενη περιοχή. Ανάλογη είναι η περίπτωση σε δίκτυο UMTS, όπου ο δείκτης SIR παραμένει σταθερός όταν το ΚΤ είναι ακίνητο, κατά την εξέταση του εξωτερικού ελέγχου ισχύος βρόχων (outer loop power control) ([LLC02]). Επίσης, βοήθεια κατά τον υπολογισμό της ταχύτητας αποτελεί ο προσδιορισμός του είδους δρόμου της εξεταζόμενης περιοχής. Περιέχοντας η βάση δεδομένων ακριβή μοντέλα κλάσεων ταχύτητας για συγκεκριμένα τμήματα οδών, μας επιτρέπει να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια την τιμή της ταχύτητας του οχήματος.

7.1.4.2. Οδικό δίκτυο

Προκειμένου να χαρακτηρίσουμε αποτελεσματικότερα μια οδό είτε χαμηλής ροής κίνησης είτε ελεύθερης ροής κίνησης θα μπορούσαμε να συγκρίνουμε την μέση ταχύτητα κίνησης των οχημάτων στην υπό εξέταση οδό με την ταχύτητα “πράσινου κύματος” για την συγκεκριμένη οδό. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μέση διάρκεια παραμονής των αυτοκινήτων στις διασταυρώσεις (φωτεινούς σηματοδότες) οπότε και να προκύψει μείωση εκπεμπόμενων ρύπων, οι συγκοινωνιολόγοι για κάθε κεντρική οδό έχουν καθορισεί ως ταχύτητα διάδοσης του “πράσινου κύματος”, τη ταχύτητα με την οποία αν εκινείτο το υπό εξέταση όχημα, δεν θα σταματούσε σε κανένα φωτεινό σηματοδότη, κατά μήκος συγκεκριμένης οδικής αρτηρίας. Η ταχύτητα διάδοσης του “πράσινου κύματος” μεταβάλλεται τόσο σε ημερήσιο όσο και σε εβδομαδιαίο κύκλο, χωρίς να

έχουμε μεταβολές ακόμα και με την εποχή του χρόνου. Στην Αθήνα οι κύριες οδικές αρτηρίες έχουν ταχύτητες διάδοσης "πράσινου κύματος" που κυμαίνονται από 40χλμ/ω έως 70χλμ/ω.

Γνώση ιστορικών στοιχείων, όπως η μεταβαλόμενη ώρα κυκλοφοριακής αιχμής ανάλογα με το χρόνο εξέτασης της συγκεκριμένης οδού ή μοντελοποίηση της χρησιμοποίησης οδών μέσω πινάκων OD (Origin-Destination), θα λειτουργούσε εποικοδομητικά κατά την εκτίμηση κυκλοφοριακής κίνησης για συγκεκριμένη οδό. Πίνακες OD είναι σημαντικό στοιχείο κατά την ανάλυση κυκλοφοριακής κίνησης ([P91]). Οι τελευταίοι περιέχουν πληροφορία του πλήθους των οχημάτων που μετακινούνται μεταξύ διαφορετικών ζωνών μιας περιοχής. Όρια ζωνών μιας περιοχής στην δική μας περίπτωση θα μπορούσε να είναι οι διασταυρώσεις κεντρικών οδικών αρτηριών, οπότε ο πίνακας OD θα περιέγραφε κυκλοφοριακή κίνηση τμημάτων κυρίων οδικών αρτηριών.

7.1.5. Βελτιστοποίηση της εκτίμησης των παραμέτρων του Μαρκοβιανού μοντέλου

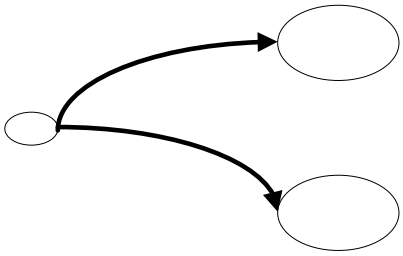
Άλλο ένα πρόβλημα το οποίο παρατηρείται κατά τη διαδικασία "εκμάθησης" των παραμέτρων του Μαρκοβιανού μοντέλου μέσω μεθόδων επανεκτίμησης προκύπτει μετά από τη θεώρηση ότι οι ακολουθίες ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι υποχρεωτικά πεπερασμένες. Έτσι πολλές φορές παρατηρείται μη επαρκές πλήθος παρατηρήσεων για ορισμένες καταστάσεις, προκειμένου να έχουμε καλή εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η αύξηση του μεγέθους του συνόλου των ακολουθιών εκμάθησης. Συχνά το τελευταίο δεν είναι και τόσο πρακτικό. Άλλη λύση θα ήταν η μείωση του μεγέθους του μοντέλου (όπως πλήθος καταστάσεων, πλήθος συμβόλων ανά κατάσταση κ.α.). Παρόλο μου αυτό είναι πάντοτε δυνατόν, φυσικοί λόγοι για τη σκοπιμότητα χρήσης του συγκεκριμένου μοντέλου, δεν επιτρέπουν την αλλαγή του μεγέθους του.

Μια τρίτη πιθανή λύση είναι η συσχέτιση των εκτιμημένων παραμέτρων ενός συνόλου με ένα άλλο σύνολο εκτιμημένων παραμέτρων ενός μοντέλου για το οποίο υπάρχει ένα επαρκές πλήθος παρατηρήσεων "εκμάθησης". Κατά τη μέθοδο αυτή, πρώτα δημιουργούνται ταυτόχρονα, τόσο το επιθυμητό μοντέλο όσο και το μικρότερο σε μέγεθος μοντέλο για το οποίο υπάρχει επαρκές πλήθος παρατηρήσεων για καλή εκτίμηση παραμέτρων και έπειτα συσχετίζονται οι εκτιμήσεις παραμέτρων από τα δύο μοντέλα. Το μικρότερο μοντέλο προκύπτει από την επεξεργασία μικρότερου πλήθους ακολουθιών εκμάθησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημουργία του μεγαλύτερου μοντέλου. Με αυτό το τρόπο, αν είχαμε εκτίμηση παραμέτρων για το πλήρες μοντέλο $\lambda = \{A, B, \pi)$, όπως επίσης και για το μικρότερης τάξης μοντέλο $\lambda' = \{A', B', \pi')$, τότε το μοντέλο συσχέτισης $\bar{\lambda} = \{\bar{A}, \bar{B}, \bar{\pi})$ προκύπτει από την παρακάτωσχέση:

$$\bar{\lambda} = \varepsilon \cdot \lambda + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda' ,$$

όπου το ε καθορίζει το βάρος των παραμέτρων του πλήρους και του μικρότερου μοντέλου.

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής του ε είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή μοντελοποίηση της εξεταζομένης κατάστασης. Αναμφισβήτητα όμως η τιμή του ε είναι συνάρτηση του πλήθους των παρατηρήσεων "εκμάθησης" (όσο το πλήθος των παρατηρήσεων "εκμάθησης" μεγαλώνει/μικραίνει, το ε τείνει προς το 1.0 / 0.0 αντίστοιχα).



Σχήμα 7.1.: Διάγραμμα καταστάσεων κατά τη συσχέτιση εκτιμημένων παραμέτρων πλήρους και μικρότερου μοντέλου

Παραπομπές

[HT01] H. Homa, A. Toskala, *WCDMA for UMTS*, revised edition, John Wiley & Sons, 2001.

[K00] T. Kohonen. "Self-Organizing Maps", Springer, New York, 3rd edition, 2000.

[LLC02] Lin, Y.-B., Lee, P.-J., and Chlamtac, I. Dynamic Periodic Location Area Update in Mobile Networks, IEEE Trans. on Veh. Technol.,51(6):1494-1501, 2002.

[P91] Markos Papageorgiou, editor. Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems, Pergamon Press, Oxford, 1991.

Παράρτημα

Α. Αναλυτικό Μοντέλο

Α.1.Ορισμοί

Έστω $T_i(t)$ ο πραγματικός χρόνος διανυθείσας αποστάσεως για ένα όχημα το οποίο μπαίνει στην i^{th} λουρίδα δρόμου τη χρονική στιγμή t.

Έστω $\overline{T}_i(t)$ ο ιστορικά μέσος καταγεγραμμένος χρόνος διανυθείσας αποστάσεως για ένα όχημα το οποίο μπαίνει στην i^{th} λουρίδα δρόμου τη χρονική στιγμή t.

Έστω $\widehat{\sigma}_i^2(t)$ η ιστορικά καταγεγραμμένη κατανομή του χρόνου διανυθείσας αποστάσεως για ένα όχημα το οποίο μπαίνει στην i^{th} λουρίδα δρόμου τη χρονική στιγμή t.

Έστω $\widehat{T}_i(t)$ ο αναμενόμενος (βασισμένος στη θέση του ΚΤ) χρόνος διανυθείσας αποστάσεως για ένα όχημα το οποίο μπαίνει στην i^{th} λουρίδα δρόμου τη χρονική στιγμή t.

Έστω $\widehat{\sigma}_i^2(t)$ η κατανομή του $\widehat{T}_i(t)$.

Έστω $\tilde{T}_i(t)$ η πρόβλεψη για την i^{th} λουρίδα δρόμου τη χρονική στιγμή t έτσι ώστε:

$$\tilde{T}_i(t) = \begin{Bmatrix} \widehat{T}_i(t) & (1) \\ \overline{T}_i(t) & (2) \end{Bmatrix},$$

όπου στη πρώτη περίπτωση (1) πληροφορία από το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας είναι διαθέσιμη για τη συγκεκριμένη λουρίδα δρόμου και τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή (ή πρόσφατα), ενώ στη δεύτερη περίπτωση (2), πληροφορία από το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας δεν είναι διαθέσιμη.

Μια περισσότερο πολύπλοκη προσέγγιση θα συνδύαζε τις 2 εκτιμήσεις, βασιζόμενη σε κάποια συνάρτηση συσχετισμού των δύο εκτιμήσεων.

Α.2. Αποτελεσματικότητα της Διαδικασίας Δειγματοληψίας

Έστω ότι στο οδικό δίκτυο υπάρχουν διαφορετικοί τύποι δρόμων που διακρίνονται από τις διαφορετικής πυκνότητας κυκλοφοριακή κίνηση (π.χ. αυτοκινητόδρομος, αστικός δρόμος, δρόμος υπαίθρου, …). Έστω N_R ο αριθμός τέτοιων τύπων και $\rho_i^{'}$ (i =1,…, N_R) η πυκνότητα κυκλοφοριακής κίνησης στον i^{th} τύπο δρόμου. Έστω M_i ο αριθμός των λουρίδων κάθε τύπου. Έστω M ο συνολικός αριθμός των λουρίδων δρόμου:

$$M = \sum_{i=1}^{N_R} M_i$$

Υποθέτουμε επίσης ότι κάθε λουρίδα δρόμου τύπου i έχει την ίδια πυκνότητα κυκλοφοριακής κίνησης, $\rho_i^{'}$, έτσι ώστε η πυκνότητα της k^{th} λουρίδας δρόμου να δίνεται από το τύπο:

$\rho_k = \rho_i^{'}$ όπου i είναι ο τύπος δρόμου για την k^{th} λουρίδα δρόμου.

Αν πάρουμε τώρα ένα δείγμα, η πιθανότητα δειγματοληψίας της k^{th} λουρίδας δρόμου, q_k, δίνεται από:

$q_k = \dfrac{\rho_k L}{\sum_{i=1}^{N_R} LM_i \rho_i^{'}}$, όπου L αντιπροσωπεύει το μήκος της λουρίδας δρόμου.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι $\rho_k L$ είναι ο αναμενόμενος αριθμός οχημάτων στην k^{th} λουρίδας δρόμου και $LM_i \rho_i^{'}$ είναι το συνολικό πλήθος οχημάτων στην i^{th} τύπου λουρίδα δρόμου. Η πιθανότητα, Q δείγματα να μην επιλεγούν στην k^{th} λουρίδας δρόμου είναι: $P(Q) = (1 - q_k)^Q$.

Ο αναμενόμενο πλήθος λουρίδων δρόμου που δεν καλύφθηκαν θα είναι:

$F(Q) = \sum_{k=1}^{M} (1 - q_k)^Q$ ή $F(Q) = M(1 - q)^Q$, σε περίπτωση που έχουμε μόνο ένα είδος δρόμου.

Διαιρώντας το πλήθος των λουρίδων δρόμου στους διαφορετικούς τύπους τους μας δίνει:

$F(Q) = \sum_{i=1}^{N_R} M_i (1 - q_i^{'})^Q$ όπου $q_i^{'} = \dfrac{\rho_i^{'} L}{\sum_{i=1}^{N_R} LM_i \rho_i^{'}}$.

$\overline{E}$ είναι η αναμενόμενη αποδοτικότητα, π.χ. το κλάσμα των λουρίδων δρόμου για τις οποίες υπάρχει μέτρηση και δίνεται από:

$$\overline{E} = \frac{M - F(Q)}{M} = 1 - \frac{F(Q)}{M}.$$

Θεωρώντας τώρα F(Q) για μεγάλα Q θα έχουμε:

$$F(Q) = \sum_{i=1}^{N_R} M_i e^{-q_i^{'} Q}.$$

Έτσι, αν N το συνολικό πλήθος οχημάτων στο οδικό δίκτυο και α το κλάσμα των οχημάτων τα οποία πήραμε σαν δείγμα θα έχουμε:

$$Q = \alpha N = \alpha \left(\sum_{i=1}^{N_R} \rho_i M_i L\right).$$

Ισχύει επίσης $q_i^{'} = \dfrac{\rho_i L}{\sum_{i=1}^{N_R} \rho_i M_i L}$, οπότε θα έχουμε:

$F(Q) = \sum_{i=1}^{N_R} M_i e^{-\alpha \rho_i L}$ και άρα:

$$\bar{E} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_R} M_i e^{-\alpha \rho_i^{'} L}}{M} = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} M_i}{M} - \frac{\sum_{i=1}^{N_R} M_i e^{\alpha \rho_i^{'} L}}{M} = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} M_i (1 - e^{-\alpha \rho_i^{'} L})}{M} \quad \text{(F).}$$

Ο τύπος (F) έχει την "βολική" ιδιότητα ότι οι πυκνότεροι τύποι δρόμων που εξετάζουμε παρέχουν εκθετικά ταχύτερο όγκο πληροφορίας (ως συνάρτηση του α). Σε περίπτωση που υπάρχει μόνο ένας τύπος δρόμου, $\rho = \rho_1 = \rho_1^{'}$, οπότε και $\overline{E} = 1 - e^{-\alpha \rho L}$.

B1. Αποτελέσματα (παράγραφος 6.2.0.1.)

states = 8

sequences = 5

length of sequence = 200

threshold = .2e-5

loglik1 = -652.934431

loglik2 = -664.810879

loglik3 = -672.848484

B2. Αποτελέσματα (παράγραφος 6.2.0.1.)

dckMeans(data,5)

distance = 797.487756

dckMeans(data,8)

distance = 499.86

dckMeans(data,11)

distance = 427.110589

states = 8

sequences = 5

length of sequence = 500

threshold = .2e-5

loglik0 = -8018.504671

loglik1 = -1543.999470

loglik2 = -1563.095642

loglik3 = -1586.217943

Γ. GSM/UMTS – Τεχνικά Δεδομένα

Παράμετρος	**πρότυπο GSM**
Frequency range	890-915 MHz (uplink) 935-960 MHz (downlink)
Access method	TDMA
Duplex method	FDD
Suplex separation	45 kHz
Channel grid	200 kHz
Number of channels	8 (16)
Frequency carrier	124
Number of traffic channels	992 (1984)
Modulation	GMSK
Speech codec	RLE-LTP
TCH-transmission rate	22.8 kbit/s
Datea rate	270.8 kbit/s
Min C/I	> 9
Max speed	120 km/h
User data rate	9.6 kbit/s
Network capacity (normal)	20 Erl./km^2
Network capacity (microcells)	400 Erl./km^2

CDMA παράμετρος	**πρότυπο UMTS**
Channel bandwidth	5, 10, 20 MHz
Chiprate	4.096/8.192/16.384 Mchips/s
Carrier space (4.096 Mcps)	4.4…5.2 MHz with 200kHz Raster
Frame length	10 ms
Frequency spectrum FDD	1920-1980 and 2110-2170 MHz
Frequency spectrum TDD	35 MHz
Modulation	QPSK (downlink) BPSK (uplink)
Spreading factor $S_f = \frac{256}{2^k} \quad k \in (0,...,6)$	4-256 (4.096 Mchips/s)
Bitrate	32-2048 kbit/s
Spreading methods	Variable orthogonal sequnces (channel separation) Gold sequences (cell and user separation)
Multirate	Variable spreading factors and Multicode
Channel codec	Faltungscode (1/2, 1/3) Reed Solomon Code (4/5)

Δ. Κωδικοποίηση της προσομοίωσης

Η επεξεργασία των ακολουθιών ισχύος σήματος κατερχόμενης ζεύξεως έγινε στα τρία πρώτα στάδια ενώ στο τέταρτο παρουσιάζεται η κωδικοποίηση της γραφικής αναπαράστασης του μοντέλου κυκλοφοριακής κίνησης.

Πρώτο στάδιο:

Κατά τη διαδικασία της κατάτμησης χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι K-Means για ακολουθίες 50 στοιχείων από δίκτυο GSM (παράγραφοι 6.2.1.1.1., 6.2.1.2., 6.2.1.3., 6.2.1.4.) και CLARA για ακολουθίες 500 στοιχείων από δίκτυο UMTS και δεδομένων της Vodafone (παράγραφοι 6.2.1.1.2., 6.2.4.). Στη παρακάτω κωδικοποίηση Ο αντιπροσωπεύει το πλήθος των στοιχείων για κάθε ακολουθία.

Το πλήθος των καταστάσεων τόσο σε δίκτυο GSM όσο και σε δίκτυο UMTS ήταν Q = 16; %#states (έτσι σε κάθε κατάσταση αντιστοιχούσαν 4 παρατηρήσεις), δεδομένου όπως έχει προαναφερθεί ότι οι τιμές λαμβανομένου σήματος σε δίκτυο GSM βρίσκεται στο διάστημα [-110, -48](dBm) (62 τιμές) ενώ σε δίκτυο UMTS βρίσκεται στο διάστημα [-94, -32](dBm) (62 τιμές).

```
##1
function [centres, options, post, errlog] = KM(centres, data, options)
%KM      Trains a k means cluster model.

[ndata, data_dim] = size(data);
[ncentres, dim] = size(centres);

if dim ~= data_dim
  error('Data dimension does not match dimension of centres')
end

if (ncentres > ndata)
  error('More centres than data')
end

% Sort out the options
if (options(14))
  niters = options(14);
```

```
else
  niters = 100;
end

store = 0;
if (nargout > 3)
  store = 1;
  errlog = zeros(1, niters);
end

% Check if centres and posteriors need to be initialised from data
if (options(5) == 1)
  % Do the initialisation
  perm = randperm(ndata);
  perm = perm(1:ncentres);

  % Assign first ncentres (permuted) data points as centres
  centres = data(perm, :);
end
% Matrix to make unit vectors easy to construct
id = eye(ncentres);

% Main loop of algorithm
for n = 1:niters

  % Save old centres to check for termination
  old_centres = centres;

  % Calculate posteriors based on existing centres
  d2 = dist2(data, centres);
  % Assign each point to nearest centre
  [minvals, index] = min(d2', [], 1);
  post = id(index,:);

  num_points = sum(post, 1);
  % Adjust the centres based on new posteriors
  for j = 1:ncentres
```

```
  if (num_points(j) > 0)
    centres(j,:) = sum(data(find(post(:,j)),:), 1)/num_points(j);
  end
end

% Error value is total squared distance from cluster centres
e = sum(minvals);
if store
  errlog(n) = e;
end
if options(1) > 0
  fprintf(1, 'Cycle %4d  Error %11.6f\n', n, e);
end

if n > 1
  % Test for termination
  if max(max(abs(centres - old_centres))) < options(2) & ...
      abs(old_e - e) < options(3)
    options(8) = e;
    return;
  end
end
old_e = e;
end

% If we get here, then we haven't terminated in the given number of
% iterations.
options(8) = e;
if (options(1) >= 0)
  disp('Warning: Maximum number of iterations has been exceeded');
end
```

Δεύτερο στάδιο:

Στο στάδιο αυτό έχουμε τον υπολογισμό του μοντέλου Διακριτών Κρυφών Μαρκοβιανών Αλυσίδων HMM ($\lambda = \{A, B, \pi\}$) από τις ακολουθίες μετρήσεων σήματος κατερχόμενης ζεύξης (ή αλλιώς

ακολουθίες εκμάθησης). Γίνεται χρήση του Baum Welch αλγορίθμου για την εκτίμηση παραμέτρων που παρουσιάζουν τη μέγιστη πιθανοφάνεια.

Για τον υπολογισμό της αρχικής τιμής του λ, μπορούμε είτε να κάνουμε χρήση των αλγορίθμων κατάτμησης (αναφέρονται στο πρώτο στάδιο) είτε να χρησιμοποιήσουμε, τυχαίες τιμές όπως συνέβει σε αντίστοιχες περιπτώσεις κατά τη βιβλιογραφία (πάντοτε όμως διαφόρων του 0).

```
% initial estimation of parameters
prior0 = normalise(rand(Q,1));
transmat0 = mk_stochastic(rand(Q,Q));
obsmat0 = mk_stochastic(rand(Q,O));

%Given an observation sequence (data) we adjust the model parameters ([prior, transmat, %obsmat]) to maximize the probability  (loglik).
% improve guess of parameters using EM
max_iter = 50;
thresh = .2e-3;
[LL1, prior1, transmat1, obsmat1] = ld_hmm(data, prior0, transmat0, obsmat0, max_iter, thresh);
plot(LL11);
```

Τρίτο στάδιο:

Στο στάδιο αυτό συγκρίνουμε την υπό εξέταση ακολουθία μετρήσεων κατερχόμενης ζεύξης με τα διάφορα HMM μοντέλα $\lambda = \{A, B, \pi)$ τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις ταχύτητας. Το μοντέλο HMM το οποίο μετά τη σύγκριση δίνει την υψηλότερη τιμή πιθανοφάνειας, φανερώνει και την κλάση ταχύτητας της υπό εξέταση ακολουθίας.

```
%Given an observation sequence (data) and a model ([prior, transmat, obsmat]), how do we efficiently %compute (loglik).
% use model to compute log likelihood
loglik1 = loglik_dhmm(data, prior1, transmat1, obsmat1);
fprintf(1, 'loglik1 = %f\n', loglik1)

##1
function [LL, prior, transmat, obsmat, gamma] = ld_hmm(data, prior, transmat, obsmat, max_iter, thresh, ... verbose, act, adj_prior, adj_trans, adj_obs, dirichlet)
% ld_hmm finds the ML parameters of an HMM with discrete outputs using EM.
%
```

```
% computes maximum likelihood estimates of the following parameters,
% where, for each time t, Q(t) is the hidden state, and
% Y(t) is the observation
%   prior(i) = Pr(Q(1) = i)
%   transmat(i,j) = Pr(Q(t+1)=j | Q(t)=i)
%   obsmat(i,o) = Pr(Y(t)=o | Q(t)=i)
% It uses PRIOR0 as the initial estimate of PRIOR, etc.
%
% Row l of DATA is the observation sequence for example l. If the sequences are of
% different lengths, you can pass in a cell array, so DATA{l} is a vector.
% If there is only one sequence, the estimate of prior will be poor.
% If all the sequences are of length 1, transmat cannot be estimated.
%
% LL is the "learning curve": a vector of the log likelihood values at each iteration.
%
% There are several optional arguments, which should be passed in the following order
%   ld_hmm (DATA, PRIOR, TRANSMAT, OBSMAT, MAX_ITER, THRESH, VERBOSE)
% These have the following meanings
%   max_iter = max. num EM steps to take (default 10)
%   thresh = threshold for stopping EM (default 1e-4)
%   verbose = 0 to suppress the display of the log lik at each iteration (Default 1).
%
% If the transition matrix is non-stationary (e.g., as in a POMDP),
% then TRANSMAT should be a cell array, where T{a}(i,j) = Pr(Q(t+1)=j|Q(t)=i,A(t)=a).
% The last arg should specify the sequence of actions in the same form as DATA:
%   ld_hmm (DATA, PRIOR, TRANSMAT, OBSMAT, MAX_ITER, THRESH, VERBOSE, As)
% The action at time 1 is ignored.
%
% If you want to clamp some of the parameters at fixed values, set the corresponding adjustable
% argument to 0 (default: everything is adjustable)
%   ld_hmm (..., VERBOSE, As, ADJ_PRIOR, ADJ_TRANS, ADJ_OBS)
%
% To avoid 0s when estimating OBSMAT, specify a non-zero equivalent sample size (e.g., 0.01) for
% the Dirichlet prior: LD_HMM(..., ADJ_OBS, DIRICHLET)
%
% When there is a single sequence, the smoothed posteriors using the penultimate set of
% parameters are returned in GAMMA:
```

```
%   [LL, PRIOR, TRANSMAT, OBSMAT, GAMMA] = LD_HMM(...)
% This can be useful for online learning and decision making.

%ld_hmm(data, prior, transmat, obsmat, max_iter, thresh, verbose, act, adj_prior, adj_trans, adj_obs, dirichlet)
if nargin < 5, max_iter = 10; end
if nargin < 6, thresh = 1e-4; end
if nargin < 7, verbose = 1; end
if nargin < 8
  act = [];
  A = 0;
else
  A = length(transmat);
end
if nargin < 9, adj_prior = 1; end
if nargin < 10, adj_trans = 1; end
if nargin < 11, adj_obs = 1; end
if nargin < 12, dirichlet = 0; end

previous_loglik = -inf;
loglik = 0;
converged = 0;
num_iter = 1;
LL = [];

if ~iscell(data)
  data = num2cell(data, 2); % each row gets its own cell
end
if ~isempty(act) & ~iscell(act)
  act = num2cell(act, 2);
end
numex = length(data);



while (num_iter <= max_iter) & ~converged
  % E step
  [loglik, exp_num_trans, exp_num_visits1, exp_num_emit, gamma] = ...
     compute_ess(prior, transmat, obsmat, data, act, dirichlet);
```

```
  if verbose, fprintf(1, 'iteration %d, loglik = %f\n', num_iter, loglik);
  %           fprintf(1, 'prior  = %f, transmat = %f, obsmat = %f\n', prior, transmat, obsmat);
  end
  num_iter =  num_iter + 1;

  % M step
  if adj_prior
    prior = normalise(exp_num_visits1);
  end
  if adj_trans & ~isempty(exp_num_trans)
    if isempty(act)
      transmat = mk_stochastic(exp_num_trans);
    else
      for a=1:A
              transmat{a} = mk_stochastic(exp_num_trans{a});
      end
    end
  end
  if adj_obs
    obsmat = mk_stochastic(exp_num_emit);
  end

  converged = em_converged(loglik, previous_loglik, thresh);
  previous_loglik = loglik;
  LL = [LL loglik];
end


#2
function [loglik, exp_num_trans, exp_num_visits1, exp_num_emit, gamma] = ...
    compute_ess(prior, transmat, obsmat, data, act, dirichlet)
%
% Compute the Expected Sufficient Statistics for a discrete Hidden Markov Model.
%
% Outputs:
% exp_num_trans(i,j) = sum_l sum_{t=2}^T Pr(X(t-1) = i, X(t) = j| Obs(l))
```

```
% exp_num_visits1(i) = sum_l Pr(X(1)=i | Obs(l))
% exp_num_emit(i,o) = sum_l sum_{t=1}^T Pr(X(t) = i, O(t)=o| Obs(l))
% where Obs(l) = O_1 .. O_T for sequence l.

numex = length(data);
[S O] = size(obsmat);
if isempty(act)
  exp_num_trans = zeros(S,S);
  A = 0;
else
  A = length(transmat);
  exp_num_trans = cell(1,A);
  for a=1:A
    exp_num_trans{a} = zeros(S,S);
  end
end
exp_num_visits1 = zeros(S,1);
exp_num_emit = dirichlet*ones(S,O);
loglik = 0;
estimated_trans = 0;

for ex=1:numex
  obs = data{ex};
  T = length(obs);
  olikseq = mkdhmm_obslik(obs, obsmat);
  if isempty(act)
    [gamma, xi, current_ll] = forwards_backwards(prior, transmat, olikseq);
  else
    [gamma, xi, current_ll] = forwards_backwards_pomdp(prior, transmat, olikseq, act{ex});
  end
  loglik = loglik +  current_ll;

  if T > 1
    estimated_trans = 1;
    if isempty(act)
      exp_num_trans = exp_num_trans + sum(xi,3);
    else
```

```
    % act(2) determines Q(2), xi(:,:,1) holds P(Q(1), Q(2))
    A = length(transmat);
    for a=1:A
            ndx = find(act{ex}(2:end)==a);
            if ~isempty(ndx)
              exp_num_trans{a} = exp_num_trans{a} + sum(xi(:,:,ndx), 3);
            end
    end
  end
 end

 exp_num_visits1 = exp_num_visits1 + gamma(:,1);

 if T < O
  for t=1:T
    o = obs(t);
    exp_num_emit(:,o) = exp_num_emit(:,o) + gamma(:,t);
  end
 else
  for o=1:O
    ndx = find(obs==o);
    if ~isempty(ndx)
            exp_num_emit(:,o) = exp_num_emit(:,o) + sum(gamma(:, ndx), 2);
    end
  end
 end
end

if ~estimated_trans
 exp_num_trans = [];
end


##3
function T = mk_stochastic(T)
% MK_STOCHASTIC Ensure the argument is a stochastic matrix, i.e., the sum over the last dimension is 1.
% T = mk_stochastic(T)
```

```
%
% From the MIT-toolbox by Kevin Murphy, 2003.
%
% If T is a vector, it will sum to 1.
% If T is a matrix, each row will sum to 1.
% If T is a 3D array, then sum_k T(i,j,k) = 1 for all i,j.

% Set zeros to 1 before dividing
% This is valid since S(j) = 0 iff T(i,j) = 0 for all j

if (ndims(T)==2) & (size(T,1)==1 | size(T,2)==1) % isvector
  T = normalise(T);
elseif ndims(T)==2 % matrix
  S = sum(T,2);
  S = S + (S==0);
  norm = repmat(S, 1, size(T,2));
  T = T ./ norm;
else % multi-dimensional array
  ns = size(T);
  T = reshape(T, prod(ns(1:end-1)), ns(end));
  S = sum(T,2);
  S = S + (S==0);
  norm = repmat(S, 1, ns(end));
  T = T ./ norm;
  T = reshape(T, ns);
end


##4
function [loglik, errors] = loglik_dhmm(data, prior, transmat, obsmat)
% LOGLIK_DHMM Compute the log-likelihood of a dataset using a discrete HMM
% [loglik, errors] = loglik_dhmm(data, prior, transmat, obsmat)
%
% data{m} is the m'th sequence
% errors  is a list of the cases which received a loglik of -infinity

if iscell(data)
```

```
  ncases = length(data);
else
  ncases = size(data, 2);
end
loglik = 0;
errors = [ ];
for m=1:ncases
  if  iscell(data)
    obslik = mkdhmm_obslik(data{m}, obsmat);
  else
    obslik = mkdhmm_obslik(data(:,m), obsmat);
  end
  [alpha, ll] = forwards(prior, transmat, obslik);
  if ll==-inf
    errors = [errors m];
  end
  loglik = loglik + ll;
end


##5
function B = mkdhmm_obslik(data, obsmat, obsmat1)
% MKDHMM_OBSLIK  Make the observation likelihood vector for a discrete HMM.
% B = mkdhmm_obslik(data, obsmat, obsmat1)
%
% Inputs:
% data(t) = y(t) = observation at time t
% obsmat(i,o) = Pr(Y(t)=o | Q(t)=i)
% obsmat1(i,o) = Pr(Y(1)=o | Q(1)=i). Defaults to obsmat if omitted.
%
% Output:
% B(i,t) = Pr(y(t) | Q(t)=i)

if nargin < 3, obsmat1 = obsmat; end

[Q O] = size(obsmat);
T = length(data);
```

```
B = zeros(Q,T);

t = 1;
B(:,t) = obsmat1(:, data(t));
for t=2:T
  B(:,t) = obsmat(:, data(t));
end


##6
function [alpha, loglik, xi] = forwards(prior, transmat, obslik, maximize)
% FORWARDS Compute the filtered probs. in an HMM using the forwards algorithm.
% [alpha, loglik, xi] = forwards_backwards(prior, transmat, obslik, maximize)
% Use obslik = mkdhmm_obslik(data, B) first.
%
% Inputs:
% prior(i) = Pr(Q(1) = i)
% transmat(i,j) = Pr(Q(t+1)=j | Q(t)=i)
% obslik(i,t) = Pr(y(t) | Q(t)=i)
% maximize is optional; if 1, we do max-product (as in Viterbi) instead of sum-product
%
% Outputs:
% alpha(i,t) = Pr(X(t)=i | O(1:t))
% loglik
% xi(i,j,t)  = Pr(X(t)=i, X(t+1)=j | O(1:t+1)), t <= T-1
%
% Computing xi can take up to 75% of the time. Hence
% We only compute xi if it is requested as a return argument.
%

if nargout < 3
  compute_xi = 0;
else
  compute_xi = 1;
end
if nargin < 4, maximize = 0; end
```

```
T = size(obslik, 2);
Q = length(prior);

scale = ones(1,T);
% scale(t) = Pr(O(t) | O(1:t-1))
% Hence prod_t 1/scale(t) = Pr(O(1)) Pr(O(2)|O(1)) Pr(O(3) | O(1:2)) ... = Pr(O(1), ... ,O(T)) = P
% or log P = sum_t log scale(t)

loglik = 0;
prior = prior(:);

alpha = zeros(Q,T);
if compute_xi
  xi = zeros(Q,Q,T);
else
  xi = [ ];
end

t = 1;
alpha(:,1) = prior .* obslik(:,t);
[alpha(:,t), scale(t)] = normalise(alpha(:,t));
transmat2 = transmat';
for t=2:T
  if maximize
    A = repmat(alpha(:,t-1), [1 Q]);
    m = max(transmat .* A, [], 1);
    [alpha(:,t),scale(t)] = normalise(m(:) .* obslik(:,t));
  else
    [alpha(:,t),scale(t)] = normalise((transmat2 * alpha(:,t-1)) .* obslik(:,t));
  end
  if compute_xi
    xi(:,:,t-1) = normalise((alpha(:,t-1) * obslik(:,t)') .* transmat);
  end
end
if any(scale==0)
  loglik = -inf;
else
```

```
  loglik = sum(log(scale));
end
```

Τέταρτο στάδιο:

Στο στάδιο αυτό συγκρίνουμε δημιουργούμε τις γραφικές παραστάσεις του προτεινόμενου μοντέλου κίνησης μακρο-μικρο κυκλοφορίας.

```
clear
%define the variables
k_sd_0 = 7;
k_vd_0 = 10;
k_m = 0 % the density at which the maximum volume q_m is is obtained
h_jam = 0 % the maximum density that corresponds to the maximum number of vehicles that can be contained per length unit
q_m = 0.25 %vehicles/sec
a = 0.32 % a = k_m / k_jam
V_l = 13.8 %m/sec 49.68km/h
ll = 7 %m

lamda = ll*((1-a)/a)*((1-a)/a)
V_max = (q_m*ll)/(a*a)
t = [0:1:100]; %time array
%_________________VOLUME_DENSITY_________________
for i= 1:k_vd_0,
   k = 0.000313 * i;
   y2(i) = k * V_l;
end
for i= k_vd_0:101,
   k = 0.000313 * i;
   y2(i) =  ((1-k*lamda)*V_max)/(lamda+(1/k)-ll);
%    y2(i) = (-ll*V_max)/((k*lamda+1-k*ll)*(k*lamda+1-k*ll)); %factorial
end

subplot(2,1,1)
plot(t,y2)
title('Volume-Density Diagram')
```

```
xlabel('density')
ylabel('volume')
%xlim([0 1500])
ylim([0 0.11])
%_________________SPEED_DENSITY_________________
for i= 1:k_sd_0,
   y1(i)= V_l;
   %    y1(i) = (((1-i*ll)/i)*((1-i*ll)/i) - lamda*ll)/((lamda+(1/i)-ll)*(lamda+(1/i)-ll)); %factorial
end

for i= k_sd_0:101,
   x1(i)= i;
   k = 0.00139*i;
   y1(i)= (((1/k) - ll)*V_max)/(lamda+(1/k)-ll);
   %y1(i) = (((1-k*ll)/k)*((1-k*ll)/k) - lamda*ll)/((lamda+(1/k)-ll)*(lamda+(1/k)-ll)); %factorial
end

subplot(2,1,2)
plot(t,y1)
%plot(t*1e9,ray)%plots the rf signal
title('Speed-Density Diagram')
xlabel('density')
ylabel('speed')
xlim([0 100])
%ylim([0 20])
```